

# CUBHIC 2.0: MANUAL DE USO



## Infraestructura Natural

para la Seguridad Hídrica





---

**Autoría:**

Boris F. Ochoa-Tocachi<sup>1,2</sup>

José Cuadros-Adriazola

Vivien Bonnesoeur<sup>3</sup>

---

**Revisión:**

Víctor Alarcón<sup>3</sup>

Peggy Stern<sup>4</sup>

Javier Antiporta<sup>3</sup>

Francisco Román<sup>3</sup>

Abel Aucasime<sup>1</sup>

Yessica Armas<sup>1</sup>

Alex Zambrano<sup>1</sup>

Claudia Lebel<sup>1</sup>

Daniel Tenelanda<sup>2,3</sup>

Wouter Buytaert<sup>5</sup>

Gena Gammie<sup>1</sup>

---

**Producción y cuidado de edición:** Gabriel Rojas Guillén<sup>1</sup>

**Corrección de estilo:** Antonio Luya Cierzo

**Diseño y diagramación:** Diana La Rosa

**Imagen de portada:** Milagros Torres Medina. Concurso "Naturaleza que Cuida"

---

**Editado por:** Forest Trends Association

RUC: 20606691204

Av. Ricardo Palma 698, Miraflores

Lima, Peru

Ira edición, agosto 2022

---

**Afiliaciones:**

1. Forest Trends; Washington D.C., Estados Unidos.

2. ATUK Consultoría Estratégica; Cuenca, Ecuador.

3. CONDESAN; Lima, Perú.

4. EcoDecisión; Quito, Ecuador.

5. Imperial College London; Londres, Reino Unido.

---

*Esta publicación es posible gracias al generoso apoyo del pueblo de los Estados Unidos de América a través de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá. Los contenidos son responsabilidad de los autores y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID, ni del gobierno de los Estados Unidos de América ni del Gobierno de Canadá.*



# Contenido



<b>Acerca de CUBHIC 2.0</b>	<b>7</b>
¿Cómo está estructurado este Manual de uso?	7
<b>Capítulo I: Manejo de la interfaz</b>	<b>8</b>
Ingreso de datos de entrada	8
Series de tiempo de datos observados	11
Definición de escenarios	12
Determinación del número de curva	14
Coeficientes de modelación	16
Cálculo de evapotranspiración	17
Cálculo de balance hídrico	18
Visualización de simulaciones	19
Cálculo de beneficios hidrológicos	20
Salidas de variables hidrológicas y de erosión	20
Análisis de umbrales para eventos extremos	24
Indicadores hidrológicos para cuantificar beneficios	28
Diferencias calculadas con respecto a línea base	31
Cálculo de beneficios económicos	33
Costos de implementación de los escenarios	35
Costo-eficiencia de los escenarios	36

## **Capítulo 2: Calculadoras de beneficios por intervención** **38**

1. Protección de bosques y restauración forestal	38
Uso de la interfaz	38
2. Conservación y restauración de pastizales altoandinos	41
Uso de la interfaz	41
3. Implementación de zanjas de infiltración	43
Uso de la interfaz	43
4. Construcción y recuperación de amunas	47
Uso de la interfaz	47
5. Construcción de qochas (microreservorios permeables)	52
Uso de la interfaz	52
6. Restauración y conservación de humedales altoandinos	56
Uso de la interfaz	56
7. Combinación de diferentes intervenciones sobre la infraestructura natural	60
Uso de la interfaz	60

## **Capítulo 3: Ejemplos de aplicación** **66**

Ejemplo 1. Conservación y restauración de pastos	66
Ejemplo 2. Implementación de Zanjas de infiltración	71
Ejemplo 3. Construcción de qochas	76



# Acerca de CUBHIC 2.0

La cuantificación de beneficios hidrológicos es clave para el diseño y evaluación de proyectos de infraestructura natural para la seguridad hídrica. La metodología CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas) 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.

La versión original de CUBHIC fue desarrollada en colaboración con la firma Kieser & Associates y publicada en 2019<sup>1</sup>, considerando las seis intervenciones sobre la infraestructura natural más comunes en el contexto peruano. La versión 2.0 de

CUBHIC construye sobre el original, presentando varias actualizaciones, cambios y mejoras que hemos encontrado útiles en su aplicación práctica, incluyendo mejoras en los cálculos, en las calculadoras de beneficios y en la presentación<sup>2</sup>.

Este documento presenta el *Manual de Uso* de la metodología CUBHIC 2.0, la cual ha sido implementada en siete calculadoras de beneficios<sup>3</sup>, compatibles con Microsoft Excel o similares. Cada calculadora de CUBHIC 2.0 permite la estimación de beneficios hídricos de intervenciones sobre la infraestructura natural en el sitio de un proyecto y a escala de cuenca, ofreciendo una opción práctica para la cuantificación de impactos sobre los servicios ecosistémicos prioritarios.

## ¿Cómo está estructurado este Manual de uso?

En este manual nos enfocamos directamente en guiar la utilización de las interfaces de las Calculadoras de beneficios. El detalle de las ecuaciones y enfoque conceptual se encuentra en cada uno de los documentos metodológicos de CUBHIC 2.0.

Este documento tiene tres capítulos:

1. **El primero presenta la interfaz básica de las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0, definición de escenarios, cálculo de resultados y beneficios hidrológicos y económicos.**
2. **El segundo indica las particularidades de uso de la interfaz de las calculadoras de beneficios para siete intervenciones sobre la infraestructura natural analizadas:**
  - i. Protección de bosques y restauración forestal.

- ii. Conservación y restauración de pastizales altoandinos.
- iii. Implementación de zanjas de infiltración.
- iv. Construcción y recuperación de amunas (canales ancestrales de infiltración).
- v. Construcción de qochas (microreservorios permeables).
- vi. Conservación y restauración de humedales altoandinos.
- vii. Combinación de diferentes intervenciones sobre la infraestructura natural.

3. **El tercero presenta dos ejemplos sencillos de aplicación de la metodología CUBHIC 2.0.**

<sup>1</sup> Foster, M. E., Chen, D., Kieser, M. S., & McLaughlin, D. B. (2019). CUBHIC: Metodologías de cuantificación de beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>2</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., Bonnesoeur, V., Román, F., & Gammie, G. (2022). CUBHIC 2.0: Presentación de Metodología. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>3</sup> Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., & Bonnesoeur, V. (2022). CUBHIC 2.0: Calculadoras de Beneficios. Forest Trends, Lima, Perú.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

# Capítulo I.

## Manejo de la interfaz

### Ingreso de datos de entrada

En las Calculadoras de Beneficios de CUBHIC 2.0, los cuadros de color naranja pueden ser editados para ingresar variables de entrada y parámetros de modelación:

#### 1234.56

En la pestaña **Entradas (Figura 1 y Figura 2)** se ingresa la información del caso de estudio:

- i. Parámetros del sitio de proyecto.
- ii. Umbrales para evaluación de eventos extremos.
- iii. Cobertura de vegetación y costos de cambio de cobertura.
- iv. Características de las intervenciones sobre la infraestructura natural.
- v. Costos de implementación de las intervenciones propuestas<sup>4</sup>.

Estos valores de parámetros deben ser determinados para el caso de estudio utilizando información de campo. Para ciertos parámetros (por ejemplo, número de curva, índice de área foliar, coeficiente de evapotranspiración, etc.) se pueden utilizar tablas y valores recomendados de la literatura. En las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0 se presentan tablas que ayudan a seleccionar valores, así como rangos de valores recomendados.

<sup>4</sup>En CUBHIC, el análisis de costos tiene un carácter ilustrativo con el fin de ofrecer resultados rápidos que puedan ser comparados. En realidad, el análisis de costos puede ser mucho más complejo que lo que se presenta en este modelo, incluyendo costos de oportunidad, mantenimiento en el tiempo, actualización, etc.

**Figura 1.** Ejemplo de interfaz de ingreso de datos de entrada de parámetros del sitio de proyecto en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Entradas			
Parámetros del sitio de proyecto			
<b>Características del sitio</b>			
Altitud (m snm)	3400		
Latitud (grados)	-13.5	(+) Norte	(-) Sur
Pendiente s (m/m)	0.05		
<b>Características del suelo</b>			
		<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>
Profundidad del suelo (mm)	150	75 – 1000	150
Capacidad de campo $f_c$ (mm/mm)	0.325	0 – 1	0.3
Punto de marchitez $w_p$ (mm/mm)	0.075	0 – 1	0.05
Factor K de USLE (adimensional)	0.3	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	20	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	70	20 – 100	70
<b>Características del acuífero</b>			
		<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>
Tiempo de residencia medio del agua infiltrada $\tau_{am}$ (día)	45	15 – 250	45
Percolación profunda al acuífero $r_o$ (mm/día)	1	0.305 – 305	1
Área de pampa de infiltración $A_i$ (ha)	12		
Área de percolación profunda $A_p$ (ha)	30		
Rendimiento del acuífero $Y_o$ (mm/mm)	0.15	0 – 1	0.15
Conductividad hidráulica $K_{sat,o}$ (mm/día)	35	0.305 – 305	35
*El tiempo de residencia medio (días) del agua infiltrada por la amuna puede considerarse similar al del caudal base o al del interflujo.			
**Estos valores afectan las entradas de agua subterránea al humedal y a la qocha. Esto es opcional. Si desea incluir el agua subterránea, cambie el input de recarga a un valor entre 0 y 1. La recarga describe la fracción del acuífero poco profundo del área de aporte que contribuye al humedal o a la qocha.			
<b>Coefficientes del modelo</b>			
		<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>
Coefficiente de nubosidad c	0.5	0.1 – 0.8	0.3
Ajuste factor USLE K	3.39	1 – 10	3.39
<b>Umbral de análisis de eventos extremos</b>			
		<b>Valor ref.</b>	<b>Referencia</b>
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q,alto}$ (mm)	3.0000	2.9549	3 veces la media
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q,bajo}$ (mm)	0.2150	0.2158	Percentil 10% ( $Q_{90}$ )
Umbral alto de sedimentos a analizar $UA_{alto}$ (ton/ha)	0.0100	0.0079	Percentil 95% ( $A_5$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $UA_{bajo}$ (ton/ha)	0.0015	0.0011	50% de la media

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 2.** Ejemplo de interfaz de ingreso de datos de entrada de parámetros de las intervenciones en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Entradas					
<b>Cambios de cobertura del suelo</b>					
<b>Coberturas del suelo</b>	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>	<b>Cobertura 4</b>	<b>Cobertura 5</b>
Número de curva CN (sin unidades)	80	62	49	75	67
Índice de área foliar LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1	1.25	1.5	1.5	2
Factor C de USLE (adimensional)	0.1	0.05	0.008	0.05	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.17	0.12	0.11	0.18	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	1	0.8	1.2	0.7	0.6
<b>Costos de cambio de cobertura</b>	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>	<b>Cobertura 4</b>	<b>Cobertura 5</b>
Costos de vegetación (USD/ha)	50	150	200	100	125
<b>Zanjas de infiltración</b>					
<b>Características de las zanjas</b>	<b>Zanjas 1</b>	<b>Zanjas 2</b>			
Longitud pendiente arriba L (m)	10	10	*Reemplace por cero si no hay zanjas.		
Ancho superior de la zanja T (cm)	20	20			
Ancho del fondo de la zanja b (cm)	15	15			
Profundidad de la zanja y (cm)	15	15			
<b>Costos de implementación de las zanjas</b>	<b>Zanjas 1</b>	<b>Zanjas 2</b>			
Costos de remoción de vegetación (USD/m <sup>2</sup> )	1	1			
Costos de excavación (USD/m <sup>3</sup> )	3	3			
<b>Humedales altoandinos</b>					
<b>Características de los humedales</b>	<b>Humedal 1</b>	<b>Humedal 2</b>			
Profundidad máxima del humedal $y_{wf}$ (m)	0.15	0.3	*En la Hoja Escenarios, reemplace el área de humedal por cero si no existe.		
Conductividad hidráulica en el humedal $K_{sat, wf}$ (mm/día)	3	3			
Profundidad de agua inicial en el humedal $y_o$ (m)	0	0			
Capacidad de campo del suelo del humedal $fc_{wf}$ (mm/mm)	0.39	0.39			
Punto de marchitez del suelo del humedal $wp_{wf}$ (mm/mm)	0.275	0.275			
Albedo del humedal $\alpha_{wf}$ (fracción)	0.2	0.2			
Coefficiente de ET de humedal $K_{c, wf}$ (adimensional)	0.4	0.4			
Recarga $r_o$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) (aporte de agua subterránea)	0	0			
<b>Costos de recuperación del humedal</b>	<b>Humedal 1</b>	<b>Humedal 2</b>			
Costos de recuperación del humedal (USD/ha)	600	300			
<b>Amunas</b>					
<b>Características de las amunas</b>	<b>Amuna 1</b>	<b>Amuna 2</b>			
Ancho superior del canal de amuna T (cm)	0	25	*Reemplace por cero si no hay amunas.		
Ancho del fondo del canal de amuna b (cm)	20	25			
Altura del canal de amuna y (cm)	30	25			
Rugosidad n de Chézy del canal de amuna (adimensional)	0.025	0.013			
Altitud de la bocatomina del canal de amuna $H_o$ (m snm)	3300	3300			
Altitud del final del canal de amuna $H_f$ (m snm)	3250	3250			
Longitud del canal de amuna $L_{am}$ (m)	3000	3000			
Caudal ecológico mínimo en el cauce $Q_{min}$ (l/s)	30	30			
Porcentaje de agua que vuelve inmediatamente al cauce $F_{ret}$ (%)	25%	0%			
<b>Costos de implementación de las amunas</b>	<b>Amuna 1</b>	<b>Amuna 2</b>			
Costos de remoción de vegetación (USD/m <sup>2</sup> )	1	1			
Costos de excavación (USD/m <sup>3</sup> )	6	6			
Costos de impermeabilización (USD/m <sup>2</sup> )	0	2			
<b>Qochas</b>					
<b>Características de las qochas</b>	<b>Qochas 1</b>	<b>Qochas 2</b>			
Altura máxima de agua en la qocha $y_{qc}$ (m)	1	4	*En la Hoja Escenarios, reemplace el área de la qocha por cero si no existe.		
Conductividad hidráulica en la qocha $K_{sat, qc}$ (mm/día)	4	4			
Altura inicial de agua en la qocha $y_o$ (m)	0	0			
Recarga $r_o$ (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) (aporte de agua subterránea)	0	0			
Uso de agua directo de la qocha $Q_{out}$ (m <sup>3</sup> /día)	1	1			
	1	1			
<b>Costos de implementación de las qochas</b>	<b>Qochas 1</b>	<b>Qochas 2</b>			
Costos de remoción de vegetación (USD/m <sup>2</sup> )	0.25	0.25			
Costos de excavación (USD/m <sup>3</sup> )	1	1			

Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Entradas** también se puede calibrar el modelo hidrológico para el escenario de línea base (**Figura 3**), utilizando los datos de caudal ingresados en la pestaña **Observaciones**. La calibración se puede realizar de manera manual, cambiando los parámetros uno a uno, o de manera automática utilizando la herramienta Solver de Excel, como recomendamos en la metodología de calibración de CUBHIC 2.0<sup>5</sup>. La disponibilidad o falta de datos de caudal o la no calibración del modelo no impide la utilización de la calculadora.

**Figura 3.** Ejemplo de interfaz de calibración en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Calibración			
Indicadores de desempeño	Indicador	Umbral	Aceptabilidad
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.94	0.5	SI
RMSE (mm)	0.22	0.4	SI
RSR	0.25	0.7	SI
PBIAS (%)	-1%	25%	SI
KGE	0.79	0.5	SI
OF	0.40	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.

## Series de tiempo de datos observados

En la pestaña **Observaciones** (**Figura 4**) se ingresan las series de tiempo de:

- i. Datos de temperatura máxima.
- ii. Datos de temperatura mínima.
- iii. Datos de precipitación.
- iv. Datos de evapotranspiración (en caso de que se cuente con mediciones).
- v. Datos de caudal (para la calibración de la línea base).
- vi. Datos adicionales (para ciertas intervenciones específicas, tales como ingreso de caudal trasvasado, drenaje de humedales o caudal aguas abajo).

Estas series de tiempo son para un periodo representativo de 365 días. Estos valores son automáticamente replicados en un año adicional consecutivo durante los cálculos. Aun así, se pueden ingresar dos años de datos en caso de contar con esta información.

Las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0 vienen con valores predeterminados, a manera de ejemplo, que corresponden a un sitio en Cusco (Perú) en el 2018. Se pueden ingresar datos alternativos en lugar de los datos predeterminados para

<sup>5</sup> Cuadros-Adriazola, J., Ochoa-Tocachi, B. F., Bonnesoeur, V., & Gammie, G. (2022). CUBHIC 2.0: Metodología de Calibración. Forest Trends, Lima, Perú.

una región o año diferente. Los datos de evapotranspiración pueden ser calculados utilizando las ecuaciones implementadas en la metodología CUBHIC 2.0, o pueden ser obtenidas de otras fuentes, por ejemplo, estaciones meteorológicas locales, bases de datos disponibles, o de productos satelitales o re-análisis. Si no se tienen

datos confiables de temperatura local, se recomienda utilizar la base de datos PISCO<sup>6</sup> ("Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations"), generada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), para Perú, o productos similares en otras regiones.

**Figura 4.** Ejemplo de interfaz de ingreso de datos climáticos en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Observaciones					
Día	Temperatura máxima - $T_{max}$ (°C)	Temperatura mínima - $T_{min}$ (°C)	Precipitación - $P$ (mm)	Evapotranspiración - $ET$ (mm)	Caudal observado - $Q_{obs}$ (mm)
1	19.8	8.0	20.1	2.6	4.6
2	20.0	7.5	0.8	2.6	1.0
3	21.0	8.1	15.5	2.6	3.1
4	19.5	8.9	2.3	2.6	1.1
5	20.6	6.9	9.6	2.6	1.7
6	18.5	8.4	17.1	2.6	3.7
7	19.2	8.4	0.7	2.6	1.2
8	19.0	9.4	0.0	2.6	1.2
9	20.4	7.8	0.0	2.6	1.1
10	20.5	7.8	0.1	2.6	1.1
11	19.5	7.0	2.9	2.5	1.1
12	15.5	9.2	17.7	2.5	4.0
13	21.2	6.5	0.4	2.6	1.2
14	18.0	9.5	0.4	2.6	1.2
15	18.2	9.2	0.5	2.6	1.2

Fuente: Elaboración propia.

## Definición de escenarios

En la pestaña **Escenarios (Figura 5)** se define la condición de línea de base y hasta dos escenarios de intervención. En CUBHIC 2.0, los escenarios se configuran como combinaciones de las coberturas de vegetación y uso de suelo, usando los valores ingresados en la pestaña **Entradas**. Esto permite mayor flexibilidad en la definición de escenarios que no necesariamente pueden ser caracterizados por una cobertura uniforme. Estas combinaciones se pueden interpretar como hectáreas de extensión de terreno o como porcentaje de cobertura del sitio de estudio. Por ejemplo, un escenario de línea base (escenario 0) puede representar una combinación de área de pastizal (ha), área de bosque 1 (ha), área de bosque 2 (ha), lo cual determina un total de área considerada (ha).

<sup>6</sup> Aybar Camacho, C., Lavado Casimiro, W., Huerta Julca, A., Fernández, C., Vega Jácome, F., Sabino Rojas, E., & Felipe Obando, O. G. (2017). Uso del producto grillado PISCO de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico. Nota técnica 001, SENAMHI-DHI-2017. Disponible en: <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>

**Figura 5.** Ejemplo de interfaz de definición de escenarios en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Escenarios			
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Área de Cobertura 1 (ha)	30	30	20
Área de Cobertura 2 (ha)	10	10	0
Área de Cobertura 3 (ha)	10	10	30
Total de área considerada (ha)	50.00	50.00	50.00
Validación (áreas iguales)		SI	SI
Área bruta total cubierta por las zanjas de infiltración $A_z$ (ha)		20	5
Validación (área de zanjas menor)		SI	SI
Parámetros combinados de los escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de curva $CN$ (sin unidades)	73.20	73.20	69.40
Índice de área foliar $LAI$ ( $m^2/m^2$ )	1.70	1.70	1.70
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.03	0.03	0.01
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.16	0.16	0.17
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.84	0.84	0.68

Fuente: Elaboración propia.

Cada tipo de cobertura tiene sus propios valores de número de curva (CN), índice de área foliar (LAI), factor C de USLE, albedo ( $\alpha$ ) y coeficiente de evapotranspiración de la vegetación ( $K_c$ ). Debido a que los escenarios son combinaciones de diferentes porcentajes de cobertura, CUBHIC 2.0 facilita un cálculo automático de las variables combinadas para cada escenario basado en un promedio ponderado. Por ejemplo, el número de curva (CN) de un escenario combinado  $i$ , se calcula como:

$$CN_{escenario_i} = \frac{\sum_1^3 (CN_{cobertura_j} \cdot \text{área}_{cobertura_j})}{\sum_1^3 (\text{área}_{cobertura_j})}$$

**Donde:**

- $CN_{escenario_i}$  : Número de curva del escenario  $i$ , siendo  $i=0,1,2$ .
- $CN_{cobertura_j}$  : Número de curva de la cobertura  $j$ , siendo  $j=1,2,3$ .
- $\text{área}_{cobertura_j}$  : Área de la cobertura  $j$ , siendo  $j=1,2,3$ .

De forma similar se calculan los valores ponderados de índice de área foliar (LAI), factor C de USLE, albedo ( $\alpha$ ) y coeficiente de evapotranspiración de vegetación ( $K_c$ ) (**Figura 5**).

Adicionalmente, es posible incrementar el número de coberturas por encima de 3. Esto se puede realizar editando manualmente la pestaña **Entradas** en la Calculadora de Beneficios (**Figura 1**). Sin embargo, por simplicidad, se recomienda utilizar un número corto de coberturas y, en caso de que se necesite añadir complejidad, se pueden realizar cálculos preliminares de variables ponderadas usando la misma calculadora de CUBHIC 2.0 y reemplazando los resultados ponderados en los datos de entrada.

La configuración de escenarios también involucra la consideración de intervenciones sobre la infraestructura natural particulares, las cuales son abordadas a detalle en el **Capítulo 2**.

## Determinación del número de curva

En la metodología CUBHIC 2.0, la escorrentía se calcula utilizando el método del número de curva. El número de curva (CN) se determina en función del grupo hidrológico del suelo y del tipo de vegetación<sup>7</sup>. Estos valores se pueden seleccionar usando tablas de búsqueda (**Tabla 1** y **Tabla 2**).

**Tabla 1.** Clasificación de tipos de suelo por textura.

Grupo de suelos	Textura	Máxima tasa de infiltración (mm/día)
<b>A</b>	Suelo arenoso o franco arenoso. Tiene un bajo potencial de escorrentía y altas tasas de infiltración incluso cuando está completamente mojado.	1220
<b>B</b>	Suelo franco limoso o franco.	270
<b>C</b>	Suelo franco arcillosos arenosos.	160
<b>D</b>	Suelo franco arcilloso, franco arcilloso limoso, arcillo arenoso, arcillo limoso o arcilloso.	60

Fuente: Chow et al., 1994.

<sup>7</sup> Chow, V.T., Maidment, D. R., & Mays, L.W. (1994). Hidrología aplicada. McGraw-Hill, Inc. Bogotá, Colombia.

Utilizando información de la cobertura y uso del suelo, su estado (pobre, regular, bueno) y el grupo de suelos subyacente, se determina el valor de CN para cada combinación específica (**Tabla 2**).

**Tabla 2.** Números de curva representativos para diversas combinaciones de cobertura y tipos de suelos.

Grupo de suelos	Textura	Grupo de suelos			
		A	B	C	D
<b>Bosque</b>	Condiciones pobres: Troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas	45	66	77	83
	Condiciones regulares	36	60	73	79
	Cubierta buena	25	55	70	77
	Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
<b>Cuerpos de agua</b>		98	98	98	98
<b>Vegetación herbácea (pastizales)</b>	Condiciones pobres	68	79	86	89
	Condiciones regulares	49	69	79	84
	Condiciones óptimas	39	61	74	80
<b>Tierra agropecuaria</b>	Sin tratamiento de conservación (En surco condiciones pobres)	72	81	88	91
	En surco condiciones buenas	67	78	85	89
	En fajas condiciones pobres	70	79	81	88
	En fajas condiciones buenas	65	75	82	86
	Fajas a nivel y terreno condiciones pobres	66	74	80	82
	Con tratamiento de conservación (Fajas a nivel y terreno condiciones buenas)	62	71	78	81
<b>Infraestructura</b>	Comercial	89	92	94	95
	Industrial	81	88	91	93
	Residencial de baja densidad	51	68	79	84
	Residencial de alta densidad	77	85	90	92
	Parqueaderos, techos, impermeable	98	98	98	98
<b>Otras tierras</b>	Barbecho	77	86	91	94
	Pavimentadas (roca desnuda)	98	98	98	98
	Gravas	76	85	89	91
	Tierras (suelo desnudo)	72	82	87	89

Fuente: Chow et al., 1994.

CN está en un rango entre 0 a 100, donde 0 corresponde a una generación de escorrentía nula, es decir, la cuenca infiltra la cantidad total de agua dentro del suelo. Un CN de 100 representa una generación de escorrentía con toda el agua de precipitación entrante, es decir, el suelo no tendría capacidad de retención e infiltración de agua. Mientras mejor sea el estado de conservación y la cobertura vegetal, menor es el CN para representar una mejor capacidad de infiltración y almacenamiento de agua en el suelo y baja generación de escorrentía superficial. Asimismo, mientras más degradado esté el suelo, o la cobertura y uso sean más intervenidos

o en peores condiciones, el CN es más alto para representar la generación excesiva de escorrentía y poca capacidad de infiltración.

En las calculadoras de beneficios se incluyen tablas simplificadas en la pestaña **Entradas** para ayudar a determinar valores por defecto de CN, que vienen acompañadas de valores de características de la vegetación (índice de área foliar, albedo y factor C de USLE) y características de suelos (capacidad de campo, punto de marchitez, y factor K de USLE) que influyen sobre la evapotranspiración, la infiltración de agua y la erosión del suelo.

## Coeficientes de modelación

La pestaña **Constantes** (Figura 6) realiza el cálculo intermedio automático de parámetros necesarios por la metodología y no requiere ser modificada. Estos datos pueden ser visualizados, consultados y extraídos según convenga, en caso de ser necesario.

**Figura 6.**  
Ejemplo de interfaz para la pestaña Constantes en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Constantes				
<b>Variables posición ET</b>				
Presión atmosférica (kPa)		68.42		
a		-13.51		
b		-10.77		
d		29.15		
<b>Variables meteorológicas ET</b>				
Nubosidad c		0.50		
Capacidad de campo $f_c$ (mm)		43.50		
Punto de marchitez $w_p$ (mm)		7.50		
<b>Escenario</b>	<b>LB</b>	<b>RF1</b>	<b>RF2</b>	
Coefficiente r de LAI	0.50	0.58	0.54	
Retención potencial S (mm)	56.51	233.99	141.64	
Albedo $\alpha$ (%)	0.17	0.11	0.13	
<b>Caudal subsuperficial</b>				
$\alpha_i$ (interflujo) (l/día)		0.03		
$\alpha_b$ (caudal base) (l/día)		0.01		
<b>Erosión</b>	<b>LB</b>	<b>RF1</b>	<b>RF2</b>	
K (met)	0.13			
$\theta$	0.05			
L · S	0.46			
K · L · S · C	0.01	0.00	0.00	

Fuente: Elaboración propia.

## Cálculo de evapotranspiración

La metodología CUBHIC contiene ecuaciones para realizar una estimación de la evapotranspiración ante la escasez de datos. Estas ecuaciones han sido implementadas en la pestaña **ETo** de las Calculadoras de Beneficios para calcular la

evapotranspiración en cada paso de tiempo (**Figura 7**). Esta pestaña no requiere ser modificada. Sus datos pueden ser visualizados, consultados y extraídos según convenga, en caso de ser necesario.

**Figura 7.** Ejemplo de interfaz de cálculos de evapotranspiración en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

Evapotranspiración									
Día	Temperatura promedio - T (°C)	Presión de vapor de saturación - e <sub>o</sub> (kPa)	Pendiente de la curva Temperatura - Presión de saturación - ! (kPa/°C)	Calor latente de vaporización - " (MJ/kg)	Constante psicrométrica (! <sub>esp."</sub> )/(!#" +\$)	Declinación solar - \$	Radiación de onda corta - H <sub>sw</sub>	Radiación de onda larga - H <sub>lw</sub>	
1	13.9	1.5891	0.1032	2.4682	0.0451	0.3551	-0.4026	19.5597	-4.3486
2	13.75	1.5736	0.1023	2.4685	0.0451	0.3542	-0.4014	19.5597	-4.3535
3	14.55	1.6574	0.1071	2.4666	0.0452	0.3593	-0.3999	19.5598	-4.3261
4	14.2	1.6203	0.1050	2.4675	0.0452	0.3570	-0.3984	19.5598	-4.3385
5	13.75	1.5736	0.1023	2.4685	0.0451	0.3542	-0.3968	19.5598	-4.3535
6	13.45	1.5432	0.1006	2.4692	0.0451	0.3522	-0.3950	19.5597	-4.3630
7	13.8	1.5788	0.1026	2.4684	0.0451	0.3545	-0.3931	19.5595	-4.3519
8	14.2	1.6203	0.1050	2.4675	0.0452	0.3570	-0.3911	19.5593	-4.3385
9	14.1	1.6098	0.1044	2.4677	0.0452	0.3564	-0.3890	19.5590	-4.3419
10	14.15	1.6151	0.1047	2.4676	0.0452	0.3567	-0.3867	19.5586	-4.3402
11	13.25	1.5232	0.0994	2.4697	0.0451	0.3509	-0.3844	19.5581	-4.3691
12	12.35	1.4360	0.0944	2.4718	0.0451	0.3450	-0.3819	19.5574	-4.3942
13	13.85	1.5839	0.1029	2.4683	0.0451	0.3548	-0.3794	19.5566	-4.3503
14	13.75	1.5736	0.1023	2.4685	0.0451	0.3542	-0.3767	19.5557	-4.3535
15	13.7	1.5685	0.1020	2.4687	0.0451	0.3539	-0.3739	19.5546	-4.3551

Fuente: Elaboración propia

Si bien estas ecuaciones ofrecen una estimación adecuada de la evapotranspiración en la zona de estudio, en un estudio interno del proyecto INSH se realizó un análisis de sensibilidad de la metodología CUBHIC, donde se determinó que es recomendable utilizar datos de evapotranspiración más precisos<sup>8</sup>. Esto se puede lograr utilizando mediciones de

variables climáticas o estaciones meteorológicas cercanas, o productos procesados específicos para el cálculo de la evapotranspiración como datos climáticos de entrada (**Figura 4**). Una de las bases de datos recomendadas para este fin es PISCO Evapotranspiración, generada por el SENAMHI y el proyecto INSH<sup>9</sup>.

<sup>8</sup> Ochoa-Tocachi, B. F. (2020). *Análisis de sensibilidad de las metodologías CUBHIC*. Forest Trends, Lima, Perú.

<sup>9</sup> Huerta, A., Bonnesoeur, V., Cuadros-Adriazola, J., Gutierrez, L., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Lavado-Casimiro, W. (2022). PISCOe<sub>o</sub>\_pm, a reference evapotranspiration gridded database based on FAO Penman-Monteith in Peru. *Scientific Data*, 9: 328. Datos disponibles en: [https://figshare.com/collections/A\\_reference\\_evapotranspiration\\_gridded\\_database\\_based\\_on\\_FAO\\_Penman-Monteith\\_in\\_Peru\\_during\\_1981-2016/5633182](https://figshare.com/collections/A_reference_evapotranspiration_gridded_database_based_on_FAO_Penman-Monteith_in_Peru_during_1981-2016/5633182)

## Cálculo de balance hídrico

La pestaña **Cálculos** realiza y muestra el procesamiento de las variables hidrológicas para el escenario de línea base (**Figura 8**):

- i. Escorrentía superficial.
- ii. Percolación.
- iii. Evapotranspiración.
- iv. Contenido de humedad en el suelo.
- v. Interflujo (generado por la humedad en el suelo).
- vi. Volumen en reservorio subsuperficial.
- vii. Caudal base (generado por el reservorio subsuperficial).
- viii. Caudal total simulado (escorrentía + interflujo + caudal base).
- ix. Pérdida de suelo (carga de sedimentos).
- x. Concentración de sedimentos (carga / caudal).

**Figura 8.** Ejemplo de interfaz de cálculos de cuantificación en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.

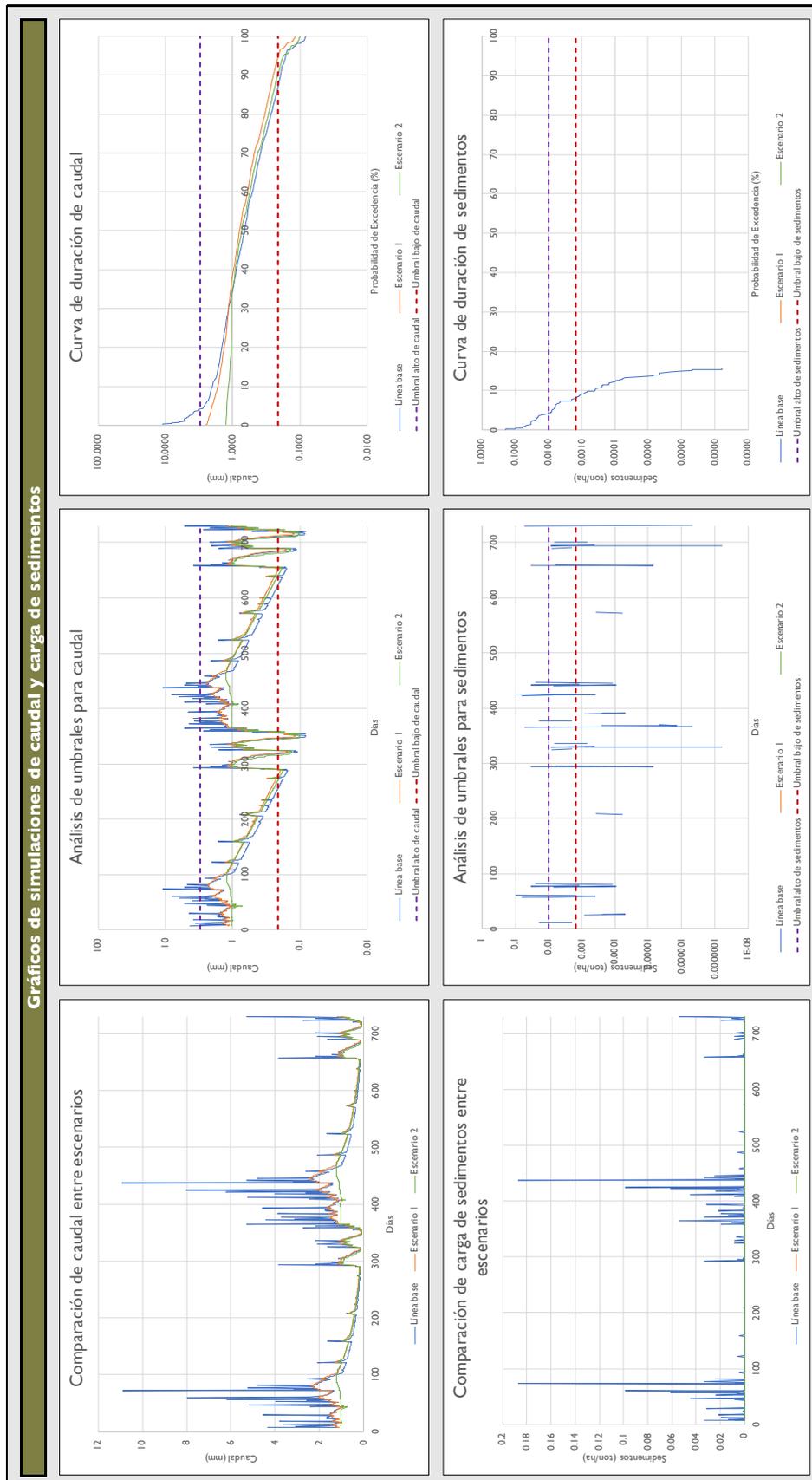
Línea base												
Día	Evapotranspiración potencial -ETP (mm/día)	Evapotranspiración real -ET (mm/día)	Escorrentía - q <sub>s</sub> (mm)	Percolación - p (mm)	Balace de agua - R <sub>s</sub> (mm)	Interflujo - q <sub>i</sub> (mm)	Reservorio subsuperficial - R <sub>s</sub> (mm)	Caudal base - q <sub>b</sub> (mm)	Caudal simulado - Q <sub>sim</sub> (mm)	Factor R de USLE - R <sub>UM</sub> (MJ-mm/ha-h)	Pérdida de suelo - A (t/ha)	Concentración de sólidos - c <sub>sim</sub> (g/m <sup>3</sup> )
0					75.0000	0.9293	75.0000	0.0000				
1	2.5827	1.6389	2.2012	17.8988	72.4318	0.8939	92.8988	0.1236	3.2188	4.4765	0.0080	249.6369
2	2.5746	1.6338	0.0000	0.0000	70.7041	0.8702	92.7751	0.1228	0.9929	0.0000	0.0000	0.0000
3	2.6175	1.6610	1.1337	10.0704	72.4689	0.8944	102.7228	0.1915	2.2196	1.6800	0.0030	135.8576
4	2.5988	1.6491	0.0000	0.0000	72.2254	0.8911	102.5313	0.1902	1.0813	0.0000	0.0000	0.0000
5	2.5747	1.6338	0.2502	6.5752	72.4751	0.8945	108.9163	0.2343	1.3790	0.2069	0.0004	26.9255
6	2.5586	1.6236	1.4701	13.1051	72.4819	0.8946	121.7871	0.3232	2.6879	2.4553	0.0044	163.9686
7	2.5773	1.6354	0.0000	0.0000	70.6518	0.8694	121.4639	0.3209	1.1904	0.0000	0.0000	0.0000
8	2.5987	1.6490	0.0000	0.0000	68.1334	0.8348	121.1430	0.3187	1.1535	0.0000	0.0000	0.0000
9	2.5933	1.6456	0.0000	0.0000	65.6530	0.8006	120.8242	0.3165	1.1171	0.0000	0.0000	0.0000
10	2.5959	1.6472	0.0000	0.0000	63.3052	0.7683	120.5077	0.3143	1.0826	0.0000	0.0000	0.0000
11	2.5476	1.6166	0.0000	0.0000	63.8203	0.7754	120.1934	0.3122	1.0876	0.0000	0.0000	0.0000
12	2.4992	1.5859	1.6060	4.9143	72.6387	0.8968	124.7955	0.3440	2.8468	2.7975	0.0050	176.3906
13	2.5794	1.6368	0.0000	0.0000	70.5051	0.8674	124.4515	0.3416	1.2090	0.0000	0.0000	0.0000
14	2.5739	1.6333	0.0000	0.0000	68.4044	0.8385	124.1100	0.3392	1.1777	0.0000	0.0000	0.0000
15	2.5710	1.6315	0.0000	0.0000	66.4344	0.8114	123.7707	0.3369	1.1483	0.0000	0.0000	0.0000

Fuente: Elaboración propia.

En general, esta pestaña no requiere ser modificada. Sus datos pueden ser visualizados, consultados y extraídos según convenga, en caso de ser necesario. Sin embargo, la columna inicial de cada escenario, Evapotranspiración potencial - ETP (mm/día), puede ser editada manualmente, de manera que se pueden ingresar datos observados, satelitales o de re-análisis (de la pestaña **Observaciones**) o datos calculados por CUBHIC 2.0 (de la pestaña ETo).

# Visualización de simulaciones

**Figura 9.** Ejemplo de interfaz de gráficos en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0.



Fuente: Elaboración propia.

La pestaña **Gráficos** permite visualizar los resultados de caudal (mm) y carga de sedimentos (ton/ha) generados con la metodología CUBHIC 2.0 (**Figura 9**). Se muestran seis figuras, correspondientes a simulaciones de caudal (fila superior) y carga de sedimentos (fila inferior). La columna izquierda muestra los resultados de series de tiempo para el escenario base y los dos escenarios evaluados.

La columna media muestra el análisis de umbrales máximos y mínimos en escala vertical logarítmica para evaluación de eventos extremos. La columna derecha muestra las curvas de duración de caudal y sedimentos para comparar probabilidad de excedencia y visualizar más claramente los efectos de los escenarios frente a la línea base.

## Cálculo de beneficios hidrológicos

En CUBHIC 2.0, cada escenario genera resultados de balance hídrico, caudal y erosión de suelo, los cuales son comparados entre ellos en la pestaña **Escenarios**. Debido a que CUBHIC 2.0 representa

procesos hidrológicos completos, se pueden calcular todas las salidas, beneficios y pérdidas hidrológicas sobre la cantidad y calidad del agua siguientes.

## Salidas de variables hidrológicas y de erosión

Salidas de variables hidrológicas y de erosión de los escenarios (**Figura 10**):

- i. Precipitación observada total.
- ii. Evapotranspiración real simulada.
- iii. Escorrentía simulada.
- iv. Percolación simulada.
- v. Caudal total simulado.
- vi. Caudal base simulado.
- vii. Generación de sedimentos simulada.
- viii. Concentración de sedimentos simulada.

Los resultados de los cálculos de balance hídrico son expresados en volúmenes de agua (mm). Un milímetro de agua equivale a un volumen de un litro por cada metro cuadrado de superficie ( $1 \text{ mm} = 1 \text{ l/m}^2$ ). Los beneficios hídricos son calculados en unidades de megalitros (ML), en toneladas métricas de sedimentos (ton) y en gramos de sedimento por metro cúbico de agua ( $\text{USD por g/m}^3$ ). Un megalitro equivale a un millón de litros o a mil metros cúbicos ( $1 \text{ ML} = 1000000 \text{ l} = 1000 \text{ m}^3$ ).

**Figura 10.** Ejemplo de interfaz de resultados hidrológicos en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0. Los colores verdes representan incrementos en la variable y los colores rojos representan reducciones.

<b>Resultados hidrológicos</b>			
<b>Salidas de variables hidrológicas</b>			
Precipitación observada (mm)	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
	786.0	786.0	786.0
Evapotranspiración real simulada (mm)	423.2	461.0	566.9
Escurrentía simulada (mm)	68.2	0.0	0.0
Percolación simulada (mm)	160.9	204.9	195.8
Caudal total simulado (mm)	362.6	328.4	259.4
Caudal base simulado (mm)	160.7	206.0	191.2
Generación de sedimentos simulada (ton)	509.2	0.0	0.0
Concentración de sedimentos simulada (g/m <sup>3</sup> )	117.9	0.0	0.0
<b>Análisis de umbrales para eventos extremos</b>			
Número de días por encima del umbral alto de caudal (día)	15.0	0.0	0.0
Volumen de caudal por encima del umbral alto (mm)	31.6	0.0	0.0
Caudal máximo (mm)	10.9	2.5	1.3
Número de días por debajo del umbral bajo de caudal (día)	50.0	19.0	36.0
Volumen de caudal por debajo del umbral bajo (mm)	76.0	77.6	76.5
Caudal mínimo (mm)	0.1	0.1	0.1
Número de días por encima del umbral alto de sedimentos (día)	27.0	0.0	0.0
Carga de sedimentos por encima del umbral alto (ton)	499.7	0.0	0.0
Carga de sedimentos máxima (ton)	119.9	0.0	0.0
Número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos (día)	329.0	365.0	365.0
Carga de sedimentos por debajo del umbral bajo (ton)	15.2	0.0	0.0
Carga de sedimentos mínima (ton)	0.0	0.0	0.0
<b>Indicadores hidrológicos</b>			
Índice de estacionalidad de lluvia $SINDX = (6/11) \sum(abs(Pmes - Paño/12)) / Paño$ (%)	45.3%		
Porcentaje de días con lluvia cero $PPO = días P=0 / total días$ (%)	60.4%		
Coefficiente de escurrentía $RR = caudal / precipitación anual$ (%)	46.1%	41.8%	33.0%
Índice de caudal base $BFI = caudal base / caudal total$ (%)	44.3%	62.7%	73.7%
Coefficiente de rendimiento de caudal base $BYC = caudal base / precipitación$ (%)	20.4%	26.2%	24.3%
Índice de humedad $RPPE = precipitación / evapotranspiración$ (%)	185.7%	170.5%	138.6%
Pendiente de la curva de duración de caudal $R2FDC = abs(\log(Q66) - \log(Q33)) / (0.33)$ (-)	1.16	0.97	1.05
Índice de rapidez de respuesta Richards-Baker $RBI = \sum(abs(Qi - Qi-1)) / \sum(Qi)$ (-)	0.41	0.06	0.04
Índice de estacionalidad de caudal $SINDQ = (6/11) \sum(abs(Qmes - Qaño/12)) / Qaño$ (%)	31.8%	26.3%	21.7%
Porcentaje de días con caudal cero $PQO = días Q=0 / total días$ (%)	0.0%	0.0%	0.0%
Rango de caudal = $Q_{máx} / Q_{mín}$ (%)	13080.1%	2060.6%	1235.6%
Coefficiente de variación de caudal $Qvar = Qstd / Qmedia$ (-)	1.12	0.63	0.51
<b>Beneficios hidrológicos</b>			
<b>Beneficios calculados con respecto a línea base</b>			
	Unidades	Escenario 1	Escenario 2
Cambio en la evapotranspiración	(x1000 m <sup>3</sup> )	+94.4	+359.2
Cambio en la escurrentía	(x1000 m <sup>3</sup> )	-170.3	-170.4
Cambio en la percolación	(x1000 m <sup>3</sup> )	+110.1	+87.4
Cambio en el caudal total	(x1000 m <sup>3</sup> )	-85.5	-257.8
Cambio en el caudal base	(x1000 m <sup>3</sup> )	+113.3	+76.4
Cambio en la carga de sedimentos	(ton)	-509.1	-509.2
Cambio en la concentración de sedimentos	(g/m <sup>3</sup> )	-117.9	-117.9
<b>Beneficios en eventos extremos con la línea base</b>			
	Unidades	Escenario 1	Escenario 2
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de caudal	(día)	-15.0	-15.0
Cambio en el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	-79.0	-79.0
Cambio en el caudal máximo	(x1000 m <sup>3</sup> )	-21.1	-24.2
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(día)	-31.0	-14.0
Cambio en el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	+4.1	+1.4
Cambio en el caudal mínimo	(x1000 m <sup>3</sup> )	+0.1	+0.0
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(día)	-67.5	-67.5
Cambio en la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(ton)	-499.7	-499.7
Cambio en la carga de sedimentos máxima	(ton)	-119.9	-119.9
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(día)	+36.0	+36.0
Cambio en la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(ton)	-15.2	-15.2
Cambio en la carga de sedimentos mínima	(ton)	0.0	0.0
<b>Beneficios calculados en indicadores hidrológicos</b>			
	Unidades	Escenario 1	Escenario 2
Cambio en el coeficiente de escurrentía	(%)	-4.3%	-13.1%
Cambio en el índice de caudal base	(%)	18.4%	29.4%
Cambio en el coeficiente de rendimiento de caudal base	(%)	5.8%	3.9%
Cambio en el índice de humedad	(%)	-15.2%	-47.1%
Cambio en la pendiente de la curva de duración de caudal	(mm/mm)	-0.20	-0.11
Cambio en el índice de rapidez de respuesta de Richards-Baker	(mm/mm)	-0.35	-0.37
Cambio en el índice de estacionalidad de caudal	(%)	-5.4%	-10.0%
Cambio en el número de días con caudal cero al año	(%)	0.0%	0.0%
Cambio en el rango $Q_{máx} / Q_{mín}$	(%)	-11019.5%	-11844.5%
Cambio en el coeficiente de variación de caudal	(mm/mm)	-0.49	-0.61

Fuente: Elaboración propia.

### i. Precipitación observada total:

$$V_P = \sum_1^n P_{(t)}$$

#### Donde:

- $V_P$ : Volumen acumulado de precipitación observada (mm).  
 $P_{(t)}$ : Precipitación observada en el paso de tiempo t (mm).  
t: Paso de tiempo (p.ej., día).  
n: Número de datos simulados.

### ii. Evapotranspiración real simulada:

$$V_{ET} = \sum_1^n ET_{(t)}$$

#### Donde:

- $V_{ET}$ : Volumen acumulado de evapotranspiración (mm).  
 $ET_{(t)}$ : Evapotranspiración simulada en el paso de tiempo t (mm).

### iii. Escorrentía simulada:

$$V_{q_o} = \sum_1^n q_{o(t)}$$

#### Donde:

- $V_{q_o}$ : Volumen acumulado de escorrentía (mm).  
 $q_{o(t)}$ : Escorrentía simulada en el paso de tiempo t (mm).

### iv. Percolación simulada:

$$V_p = \sum_1^n p_{(t)}$$

#### Donde:

- $V_p$ : Volumen acumulado de percolación (mm).  
 $p_{(t)}$ : Percolación simulada en el paso de tiempo t (mm).

#### v. Caudal total simulado:

$$V_Q = \sum_1^n Q_{sim(t)}$$

##### Donde:

$V_Q$ : Volumen acumulado de caudal total (mm).

$Q_{sim(t)}$ : Caudal total simulado en el paso de tiempo t (mm).

#### vi. Caudal base simulado:

$$V_{qb} = \sum_1^n q_{b(t)}$$

##### Donde:

$V_{qb}$ : Volumen acumulado de caudal base (mm).

$q_{b(t)}$ : Caudal base simulado en el paso de tiempo t (mm).

#### vii. Generación de sedimentos simulada:

$$M_A = \text{área} \sum_1^n A_{(t)}$$

##### Donde:

$M_A$ : Carga acumulada de sedimentos (ton).

área: Área total de la zona de estudio del proyecto (ha).

$A_{(t)}$ : Pérdida de suelo simulada en el paso de tiempo t (ton/ha).

#### viii. Concentración de sedimentos simulada:

$$\mu_c = \frac{\sum_1^n c_{sim(t)}}{n}$$

##### Donde:

$\mu_c$ : Promedio de concentración de sedimentos ( $g/m^3$ ).

$c_{sim(t)}$ : Concentración de sedimentos simulada en el paso de tiempo t ( $g/m^3$ ).



Foto: Ana Castañeda

## Análisis de umbrales para eventos extremos

Con el fin de estimar beneficios hidrológicos en el servicio ecosistémico de regulación de eventos extremos, se utilizan umbrales de valores altos y bajos. Este análisis se basa en la identificación del número de días por encima o por debajo de cierto umbral de caudal o sedimentos, el volumen de caudal o de carga de sedimentos por encima o por debajo de dicho umbral, y los valores mínimos y máximos de estas dos variables.

Salidas de análisis de umbrales (**Figura 10**):

- i. Número de días por encima del umbral alto de caudal.
- ii. Volumen de caudal por encima del umbral alto.
- iii. Caudal máximo.
- iv. Número de días por debajo del umbral bajo de caudal.
- v. Volumen de caudal por debajo del umbral bajo.
- vi. Caudal mínimo.
- vii. Número de días por encima del umbral alto de sedimentos.
- viii. Carga de sedimentos por encima del umbral alto.
- ix. Carga de sedimentos máxima.
- x. Número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos.
- xi. Carga de sedimentos por debajo del umbral bajo.
- xii. Carga de sedimentos mínima.

### i. Número de días por encima del umbral alto de caudal:

$$D_{ua,Q} = \sum_1^n i(t) \quad \text{cuando } Q_{sim(t)} > U_{Q,alto}$$

**Donde:**

- $D_{ua,Q}$ : Número de días por encima del umbral alto de caudal (día).  
 $i$ : Día del paso de tiempo actual (día).  
 $U_{Q,alto}$ : Umbral alto de caudal a analizar (mm).

Como referencia se puede utilizar tres veces la media de caudal observado.

**ii. Volumen de caudal por encima del umbral alto:**

$$V_{ua,Q} = \sum_1^n (Q_{sim(t)} - U_{Q,alto}) \quad \text{cuando } Q_{sim(t)} > U_{Q,alto}$$

**Donde:**

$V_{ua,Q}$ : Volumen de caudal que supera el umbral alto (mm).

**iii. Caudal máximo:**

$$Q_{max} = \max(Q_{sim(t)})$$

**Donde:**

$Q_{max}$ : Caudal máximo en el periodo de tiempo analizado (mm).

**iv. Número de días por debajo del umbral bajo de caudal:**

$$D_{ub,Q} = \sum_1^n i_{(t)} \quad \text{cuando } Q_{sim(t)} < U_{Q,bajo}$$

**Donde:**

$D_{ub,Q}$ : Número de días por debajo del umbral bajo de caudal (día),

$U_{Q,bajo}$ : Umbral bajo de caudal a analizar (mm).

Como referencia se puede utilizar el percentil 10% de caudal observado (Q90).

**v. Volumen de caudal por debajo del umbral bajo:**

$$V_{ub,Q} = \begin{cases} \sum_1^n Q_{sim(t)} & \text{cuando } Q_{sim(t)} < U_{Q,bajo} \\ \sum_1^n U_{Q,bajo} & \text{cuando } Q_{sim(t)} \geq U_{Q,bajo} \end{cases}$$

**Donde:**

$V_{ub,Q}$ : Volumen de caudal por debajo del umbral bajo (mm).

**vi. Caudal mínimo:**

$$Q_{min} = \min(Q_{sim(t)})$$

**Donde:**

$Q_{min}$ : Caudal mínimo en el periodo de tiempo analizado (mm).

**vii. Número de días por encima del umbral alto de sedimentos:**

$$D_{ua,A} = \sum_1^n i_{(t)} \quad \text{cuando } A_{(t)} > U_{A,alto}$$

**Donde:**

$D_{ua,A}$ : Número de días por encima del umbral alto de sedimentos (día).

$U_{A,alto}$ : Umbral alto de carga de sedimentos a analizar (ton).

Como referencia se puede utilizar el percentil 95% de sedimentos simulados (A5).

**viii. Carga de sedimentos por encima del umbral alto:**

$$A_{ua,A} = \sum_1^n (A_{(t)} - U_{A,alto}) \quad \text{cuando } A_{(t)} > U_{A,alto}$$

**Donde:**

$A_{ua,A}$ : Carga de sedimentos que supera el umbral alto (ton).

**ix. Carga de sedimentos máxima:**

$$A_{max} = \max(A_{(t)})$$

**Donde:**

$A_{max}$ : Carga de sedimentos máxima en el periodo de tiempo analizado (ton).

**x. Número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos:**

$$D_{ub,A} = \sum_1^n i_{(t)} \quad \text{cuando } A_{(t)} < U_{A,bajo}$$

**Donde:**

$D_{ub,A}$ : Número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos (día).

$U_{A,bajo}$ : Umbral bajo de carga de sedimentos a analizar (ton).

Como referencia se puede utilizar el 50% de la media de sedimentos (0.5  $\mu$ A).

**xi. Carga de sedimentos por debajo del umbral bajo:**

$$A_{ub,A} = \begin{cases} \sum_1^n A_{(t)} & \text{cuando } A_{(t)} < U_{A,bajo} \\ \sum_1^n U_{A,bajo} & \text{cuando } A_{(t)} \geq U_{A,bajo} \end{cases}$$

**Donde:**

$A_{ub,A}$ : Carga de sedimentos por debajo del umbral bajo (ton).

**xii. Carga de sedimentos mínima:**

$$A_{min} = \min(A_{(t)})$$

**Donde:**

$A_{min}$ : Carga de sedimentos mínima en el periodo de tiempo analizado (ton).

## Indicadores hidrológicos para cuantificar beneficios

Con el fin de estimar beneficios hidrológicos en los servicios ecosistémicos de rendimiento hídrico y regulación hidrológica, se utiliza un conjunto adicional de indicadores. Estos indicadores han sido derivados de un trabajo de varios años realizado por la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos<sup>10</sup> (iMHEA) y por el proyecto INSH.

Salidas de indicadores hidrológicos (**Figura 10**):

- i. Índice de estacionalidad de lluvia (SINDEX);
- ii. Porcentaje de días con lluvia cero (PPO);
- iii. Coeficiente de escorrentía (RR);
- iv. Índice de caudal base (BFI);
- v. Coeficiente de rendimiento de caudal base (BYC);
- vi. Índice de humedad (RPPE);
- vii. Pendiente de la curva de duración de caudal (R2FDC);
- viii. Índice de rapidez de respuesta Richards–Baker (RBI);
- ix. Índice de estacionalidad de caudal (SINDQ)
- x. Porcentaje de días con caudal cero (PQ0);
- xi. Rango de caudal ( $Q_{\text{máx}} / Q_{\text{mín}}$ );
- xii. Coeficiente de variación de caudal ( $Q_{\text{var}}$ );

### i. Índice de estacionalidad de lluvia:

$$SINDEX = \left(\frac{6}{11}\right) \frac{\sum_1^{12} |P_{\text{mes}} - \left(\frac{V_P}{12}\right)|}{V_P}$$

**Donde:**

SINDEX: índice de estacionalidad de lluvia (%),

$P_{\text{mes}}$ : precipitación mensual (mm).

<sup>10</sup> Ochoa-Tocachi BF, Buytaert W, Antiporta J, Acosta L, Bardales JD, Célleri R, Crespo P, Fuentes P, Gil-Ríos J, Guallpa M, Llerena C, Olaya D, Pardo P, Rojas G, Villacís M, Villazón M, Viñas P, De Bièvre B (2018), High-resolution hydrometeorological data from a network of head-water catchments in the tropical Andes. Scientific Data, 5: 180080.

**ii. Porcentaje de días con lluvia cero:**

$$PP0 = \frac{D_{P < RG_{res}}}{D_{total}}$$

**Donde:**

PP0: porcentaje de días con lluvia cero (%),

$D_{P < RG_{res}}$ : días donde la precipitación es menor al registro mínimo del pluviómetro (día),

$RG_{res}$ : resolución del pluviómetro (mm),

$D_{total}$ : número total de días considerados.

**iii. Coeficiente de escorrentía:**

$$RR = \frac{V_Q}{V_P}$$

**Donde:**

RR: coeficiente de escorrentía (%).

**iv. Índice de caudal base:**

$$BFI = \frac{V_{qb}}{V_Q}$$

**Donde:**

BFI: índice de caudal base (%).

**v. Coeficiente de rendimiento de caudal base:**

$$BYC = RR * BFI = \frac{V_{qb}}{V_P}$$

**Donde:**

BYC: coeficiente de rendimiento de caudal base (%).

**vi. Índice de humedad:**

$$RPPE = \frac{V_P}{V_{ET}}$$

**Donde:**

RPPE: Índice de humedad (%).

**vii. Pendiente de la curva de duración de caudal:**

$$R2_{FDC} = \frac{|\log(Q_{66}) - \log(Q_{33})|}{0.66 - 0.33}$$

**Donde:**

$R2_{FDC}$ : pendiente de la curva de duración de caudal (mm/mm),

$Q_{66}$ : percentil 33% de caudal total (mm),

$Q_{99}$ : percentil 66% de caudal total (mm).

**viii. Índice de rapidez de respuesta Richards–Baker:**

$$RBI = \frac{\sum_1^n |Q_{sim(t)} - Q_{sim(t-1)}|}{\sum_1^n |Q_{sim(t)}|}$$

**Donde:**

RBI: Índice de rapidez de respuesta Richards–Baker (mm/mm).

**ix. Índice de estacionalidad de caudal:**

$$SINDQ = \left(\frac{6}{11}\right) \frac{\sum_1^{12} \left| Q_{mes} - \left(\frac{V_Q}{12}\right) \right|}{V_Q}$$

**Donde:**

SINDQ: índice de estacionalidad de caudal (%),

$Q_{mes}$ : caudal mensual total (mm).

**x. Porcentaje de días con caudal cero:**

$$PQ0 = \frac{D_{Q=0}}{D_{total}}$$

**Donde:**

PQ0: porcentaje de días con caudal cero (%),

$D_{Q=0}$ : días donde el caudal es cero (día).

#### xi. Rango de caudal:

$$RANGO = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}$$

**Donde:**

RANGO: rango de caudal (%).

#### xii. Coeficiente de variación de caudal:

$$Q_{var} = \frac{Q_{std}}{Q_{medio}}$$

**Donde:**

$Q_{var}$ : coeficiente de variación de caudal diario (mm/mm),

$Q_{std}$ : desviación estándar del caudal diario (mm),

$Q_{medio}$ : promedio del caudal diario (mm).

## Diferencias calculadas con respecto a la línea base

Los cambios en las variables hidrológicas se calculan de la diferencia entre las salidas de los escenarios con las salidas de la línea base. Valores positivos representan un aumento en la variable de salida, mientras que valores negativos representan una reducción en la variable de salida (**Figura 10**).

- **Cambio en una variable con respecto a la línea base:**

$$\Delta_{var Ei} = (V_{var})_{Ei} - (V_{var})_{LB}$$

**Donde:**

$\Delta_{var Ei}$ : Cambio en una variable en el escenario i ( $\times 1000 \text{ m}^3$ , o ton, o  $\text{g/m}^3$ , o día).

$(V_{var})_{Ei}$ : Variable acumulada en escenario i ( $\times 1000 \text{ m}^3$ , o ton, o  $\text{g/m}^3$ , o día).

$(V_{var})_{LB}$ : Variable acumulada en escenario línea base ( $\times 1000 \text{ m}^3$ , o ton, o  $\text{g/m}^3$ , o día).

En el caso del cálculo de volúmenes de caudal, las unidades de mm de las salidas hidrológicas se convierten en  $1000 \text{ m}^3$  de volumen de agua multiplicándolas por un factor de 0.01 y el área de estudio.

En CUBHIC 2.0 cada escenario genera resultados de balance hídrico, caudal y erosión de suelo, los cuales son comparados entre ellos. Debido a que la metodología representa procesos hidrológicos completos, se pueden calcular las siguientes salidas, beneficios y pérdidas hidrológicas sobre la cantidad y calidad del agua. Para determinar si un aumento o una reducción de una variable es un beneficio o una pérdida, se utiliza la **Tabla 3**.

**Tabla 3.** Definición de salidas hidrológicas para la evaluación de beneficios de las intervenciones en cuencas con CUBHIC 2.0.

<b>Servicio ecosistémico hídrico</b>	<b>Variable</b>	<b>Unidad</b>	<b>Sentido del beneficio hídrico</b>
<b>Regulación hidrológica</b>	Escorrentía superficial.	×1000 m <sup>3</sup>	-
	Percolación.	×1000 m <sup>3</sup>	+
	Caudal base.	×1000 m <sup>3</sup>	+
	Índice de estacionalidad de lluvia.	%	-
	Porcentaje de días con lluvia cero.	%	-
	Índice de caudal base.	%	+
	Coefficiente de rendimiento de caudal base.	%	+
	Pendiente de la curva de duración de caudal.	mm/mm	-
	Índice de rapidez de respuesta Richards–Baker.	mm/mm	-
	Índice de estacionalidad de caudal.	%	-
	Porcentaje de días con caudal cero.	%	-
	Rango de caudal Q <sub>máx</sub> / Q <sub>mín</sub> .	%	-
	Coefficiente de variación de caudal.	mm/mm	-
<b>Rendimiento hídrico</b>	Evapotranspiración real.	×1000 m <sup>3</sup>	-
	Caudal total.	×1000 m <sup>3</sup>	+
	Coefficiente de escorrentía superficial.	%	+
	Coefficiente de rendimiento de caudal base.	%	+
	Índice de humedad.	%	+
<b>Calidad física del agua</b>	Carga de sedimentos.	ton	-
	Concentración de sedimentos.	g/m <sup>3</sup>	-
<b>Regulación de eventos extremos de caudal</b>	Número de días por encima de umbral alto de caudal.	día	-
	Caudal por encima del umbral alto.	×1000 m <sup>3</sup>	-
	Caudal máximo.	×1000 m <sup>3</sup>	-
	Número de días por debajo de umbral bajo de caudal.	día	-
	Caudal por debajo del umbral bajo.	×1000 m <sup>3</sup>	+
	Caudal mínimo.	×1000 m <sup>3</sup>	+
<b>Regulación de eventos extremos de sedimentos</b>	Número de días por encima de umbral alto de sedimentos.	día	-
	Carga de sedimentos por encima del umbral alto.	ton	-
	Carga de sedimentos máxima.	ton	-
	Número de días por debajo de umbral bajo de sedimentos.	día	+
	Carga de sedimentos por debajo de umbral bajo.	ton	-
	Carga de sedimentos mínima.	ton	-

Las salidas se expresan en unidades de: ×1000 m<sup>3</sup>: mil metros cúbicos de agua; ton: toneladas de sedimento; g/m<sup>3</sup>: gramos de sedimento por metro cúbico de agua; día: número de días por encima o por debajo de umbral; %: porcentaje; mm/mm: milímetros sobre milímetros o relación adimensional entre unidades similares de caudal.

Fuente: Elaboración propia.

El sentido del beneficio hídrico indica cuando se considera un beneficio hídrico. El signo más (+) representa que cuando el valor de la variable aumenta, entonces se considera un beneficio positivo. Por ejemplo, cuando aumenta el caudal mínimo o la magnitud de caudal bajo, o cuando aumenta el índice de caudal base o aumenta el número de días en el que la carga de sedimentos se encuentra por debajo del umbral. En contraste, el signo menos (-) representa que cuando el valor de la variable disminuye, entonces se considera como un beneficio. Por ejemplo, cuando disminuye la escorrentía superficial o la estacionalidad del caudal, o cuando disminuye el número de días por encima del umbral alto de caudal o disminuye la carga o concentración de sedimentos en el agua.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

## Cálculo de beneficios económicos

En CUBHIC 2.0, se consideran los costos de implementación (USD/ha) por cobertura de suelo, los costos por intervención sobre la infraestructura natural, y otros costos adicionales que pueden ser dictados directamente. Los costos de cambios de cobertura e intervenciones se ingresan en la pestaña **Entradas**, mientras que los costos adicionales se pueden dictar en la pestaña **Escenarios**. Debido a que cada escenario es una combinación de coberturas individuales, el costo del escenario (USD/ha) se estima mediante una comparación con el escenario base para determinar el costo diferencial de implementación (USD). Utilizando el costo total de implementación, se dividen los beneficios hidrológicos estimados y se obtiene la costo-eficiencia (**Figura 11**):

**Figura 11.** Ejemplo de interfaz de resultados económicos en las Calculadoras de Beneficios CUBHIC 2.0. Aquí los colores verdes representan efectos positivos y los colores rojos representan efectos negativos.

<b>Resultados económicos</b>				
<b>Costos de cambios de cobertura del suelo</b>		<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	
Costos de escenario por cambio de cobertura (USD)		\$0.00	\$29,375.00	
<b>Costos de implementación de las zanjas</b>		<b>Zanjas 1</b>	<b>Zanjas 2</b>	
Volumen de excavación total de las zanjas (m <sup>3</sup> )		1286.76	0.00	
Costos de remoción de vegetación en las zanjas (USD)		\$10,000.00	\$0.00	
Costos de excavación de las zanjas (USD)		\$3,860.29	\$0.00	
<b>Costos de conservación y restauración de humedales</b>		<b>Humedal 1</b>	<b>Humedal 2</b>	
Costos de recuperación de humedales (USD)		\$18,000.00	\$9,000.00	
<b>Costos de construcción y recuperación de amunas</b>		<b>Amuna 1</b>	<b>Amuna 2</b>	
Volumen de excavación total de los canales (m <sup>3</sup> )		0.00	187.50	
Costos de remoción de vegetación en los canales (USD)		\$0.00	\$750.00	
Costos de excavación de los canales (USD)		\$0.00	\$1,125.00	
Costos de impermeabilización de los canales (USD)		\$0.00	\$4,500.00	
<b>Costos de construcción de qochas</b>		<b>Qochas 1</b>	<b>Qochas 2</b>	
Volumen de excavación total de las qochas (m <sup>3</sup> )		6666.7	0.0	
Costos de remoción de vegetación en las qochas (USD)		\$5,000.00	\$0.00	
Costos de excavación de las qochas (USD)		\$6,666.67	\$0.00	
<b>Costos de implementación de los escenarios de intervenciones</b>		<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	
Otros costos adicionales (USD)		\$0.00	\$0.00	
Costo total de implementación (USD)		\$43,526.96	\$44,750.00	
<b>Costo-eficiencia</b>				
<b>Costo-eficiencia de los escenarios</b>		<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Costo-eficiencia para la escorrentía	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$255.52	-\$262.57	
Costo-eficiencia para la percolación	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$395.33	+\$511.87	
Costo-eficiencia para el caudal total	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$509.32	-\$173.56	
Costo-eficiencia para el caudal base	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$384.23	+\$586.11	
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos	(USD por ton)	-\$85.49	-\$87.89	
Costo-eficiencia para la concentración de sedimentos	(USD por g/m <sup>3</sup> )	-\$369.11	-\$379.44	
<b>Costo-eficiencia para eventos extremos</b>		<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de caudal	(USD por día)	-\$2,901.80	-\$2,983.33	
Costo-eficiencia para el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$551.05	-\$566.53	
Costo-eficiencia para el caudal máximo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$2,063.91	-\$1,850.63	
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por día)	-\$1,404.10	-\$3,196.43	
Costo-eficiencia para el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$10,543.97	+\$31,291.01	
Costo-eficiencia para el caudal mínimo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$466,764.61	+\$1,000,054.36	
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(USD por día)	-\$644.84	-\$662.96	
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(USD por ton)	-\$87.10	-\$89.55	
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos máxima	(USD por ton)	-\$363.12	-\$373.24	
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(USD por día)	+\$1,209.08	+\$1,243.06	
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(USD por ton)	-\$2,869.77	-\$2,945.16	
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos mínima	(USD por ton)	-	-	
<b>Costo-eficiencia para indicadores hidrológicos</b>		<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Costo-eficiencia para el coeficiente de escorrentía	(USD por %)	-\$1,000,815.96	-\$341,052.72	
Costo-eficiencia para el índice de caudal base	(USD por %)	+\$236,415.47	+\$152,280.72	
Costo-eficiencia para el coeficiente de rendimiento de caudal base	(USD por %)	+\$755,017.27	+\$1,151,701.80	
Costo-eficiencia para el índice de humedad	(USD por %)	-\$286,160.07	-\$95,083.13	
Costo-eficiencia para la pendiente de la curva de duración de caudal	(USD por mm/mm)	-\$222,876.97	-\$407,891.10	
Costo-eficiencia para el índice de rapidez de respuesta de Richards-Baker	(USD por mm/mm)	-\$123,668.24	-\$119,915.73	
Costo-eficiencia para el índice de estacionalidad de caudal	(USD por %)	-\$803,621.01	-\$446,952.18	
Costo-eficiencia para el número de días con caudal cero	(USD por %)	-	-	
Costo-eficiencia para el rango de caudal Q <sub>máx</sub> / Q <sub>mín</sub>	(USD por %)	-\$395.00	-\$377.81	
Costo-eficiencia para el coeficiente de variación de caudal	(USD por mm/mm)	-\$88,932.36	-\$73,276.22	

Fuente: Elaboración propia.

## Costos de implementación de los escenarios

- **Costos de escenario por cambio de cobertura:**

$$D_{cobEi} = \sum_1^3 \max\left(0, \left(\left(\text{área}_{cobertura_j}\right)_{Ei} - \left(\text{área}_{cobertura_j}\right)_{LB}\right) \cdot \text{costo}_{cobertura_j}\right)$$

### Donde:

- $D_{cobEi}$ : Costos de escenario i por cambio de cobertura (USD).
- $(\text{área}_{cobertura_j})_{Ei}$ : Área de la cobertura j en escenario i (ha).
- $(\text{área}_{cobertura_j})_{LB}$ : Área de la cobertura j en escenario línea base (ha).
- $\text{costo}_{cobertura_j}$ : Costo de la cobertura j, siendo j=1,2,3, (USD/ha).

- **Costos de escenario por intervención:**

Los escenarios también involucran intervenciones sobre la infraestructura natural particulares y sus costos asociados ( $D_{int}$ ), los cuales son abordadas a detalle en el siguiente capítulo para cada una de las intervenciones.

- **Otros costos adicionales:**

Se permite la opción de ingresar manualmente otros costos adicionales ( $D_{otr}$ ) con el fin de considerar valores extras que pueden ser incluidos en cada escenario.

- **Costo total de implementación:**

$$D_{totalEi} = D_{cobEi} + D_{intEi} + D_{otrEi}$$

### Donde:

- $D_{totalEi}$ : Costo total de implementación del escenario i (USD).
- $D_{intEi}$ : Costos de escenario i por intervención (USD).
- $D_{otrEi}$ : Otros costos adicionales de escenario i (USD).

## Costo-eficiencia de los escenarios

La costo-eficiencia económica se calcula dividiendo el costo de implementación de los escenarios para los cambios en las variables hidrológicas. Se debe aclarar que la metodología CUBHIC 2.0 considera cada beneficio individualmente, es decir, no divide los costos entre múltiples beneficios: valores positivos representan costos asociados al aumento en una variable hidrológica de salida, mientras que valores negativos representan costos asociados a la reducción en una variable hidrológica de salida (**Figura 11**). Para determinar si un aumento o una reducción de una variable hidrológica es un beneficio o una pérdida, se utiliza la **Tabla 3**. Mediante una comparación de la costo-eficiencia entre los escenarios, se determina la opción que produce los mayores beneficios hidrológicos al menor costo de implementación.

- **Costo-eficiencia en una variable:**

$$CE_{var\ E_i} = \frac{\Delta_{var\ E_i}}{D_{total\ E_i}}$$

### Donde:

$C_{Evar\ E_i}$ : Costo-eficiencia para una variable en el escenario  $i$  (USD por 1000 m<sup>3</sup>, o USD por ton, o USD por g/m<sup>3</sup>, o USD por día).

Los beneficios económicos (costo-eficiencia) están expresados en términos de dólar invertido por cada 1000 m<sup>3</sup> de agua (USD por 1000 m<sup>3</sup>), dólar invertido por tonelada de sedimentos (USD por ton) o dólar invertido por gramo de sedimentos por metro cúbico de agua (USD por g/m<sup>3</sup>). También existen otras variables como días, porcentajes o adimensionales.



# Capítulo 2. Calculadoras de beneficios por intervención



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

## 1. Protección de bosques y restauración forestal

### Uso de la interfaz

La **Figura 12** muestra la pestaña **Entradas** para la Calculadora de Beneficios de protección de bosques y restauración forestal. Aquí se ingresan los parámetros para las condiciones del sitio comunes en todos los escenarios.

**Figura 12.** Pestaña Entradas en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Bosques.

Entradas			
<b>Coberturas de suelo</b>			
	<b>Pastos</b>	<b>Bosq. nativo</b>	<b>Plant. forest.</b>
Número de curva $CN$ (sin unidades)	84	62	49
Índice de área foliar $LAI$ ( $m^2/m^2$ )	1	1.25	1.5
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.1	0.05	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.18	0.12	0.11
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.6	0.8	1.2
<b>Costos</b>			
	<b>Pastos</b>	<b>Bosq. nativo</b>	<b>Plant. forest.</b>
Costos de implementación (USD/ha)	0	125	100
<b>Características del sitio</b>			
Altitud (m snm)	3400	(+ ) Norte	(- ) Sur
Latitud (grados)	-13.5		
Pendiente $s$ (m/m)	0.05		
<b>Características del suelo</b>			
		<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>
Profundidad del suelo (mm)	150	75 – 1000	150
Capacidad de campo $f_c$ (mm/mm)	0.29	0 – 1	0.5
Punto de marchitez $w_p$ (mm/mm)	0.05	0 – 1	0.05
Factor $K$ de USLE (adimensional)	0.3	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	20	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	70	20 – 100	70
<b>Coefficientes del modelo</b>			
		<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>
Coefficiente de nubosidad $c$	0.5	0.1 – 0.8	0.5
Ajuste factor USLE $K$	3.39	1 – 10	3.39
<b>Umbral de análisis de eventos extremos</b>			
		<b>Valor ref.</b>	<b>Referencia</b>
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q,alto}$ (mm)	3.0000	2.9549	3 veces la media
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q,bajo}$ (mm)	0.2150	0.2158	Percentil 10% ( $Q_{90}$ )
Umbral alto de sedimentos a analizar $U_{A,alto}$ (ton/ha)	0.0125	0.0121	Percentil 95% ( $A_5$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $U_{A,bajo}$ (ton/ha)	0.0015	0.0015	50% de la media
<b>Calibración</b>			
<b>Indicadores de desempeño</b>			
	<b>Indicador</b>	<b>Umbral</b>	<b>Aceptabilidad</b>
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.83	0.5	SI
RMSE (mm)	0.36	0.4	SI
RSR	0.42	0.7	SI
PBIAS (%)	-1%	25%	SI
KGE	0.66	0.5	SI
OF	0.68	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.

Escenarios			
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Área de Pastos (ha)	90	5	10
Área de Bosq. nativo (ha)	10	10	90
Área de Plant. forest. (ha)	0	85	0
Total de área considerada (ha)	100.00	100.00	100.00
Validación		SI	SI

Parámetros combinados de los escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de curva CN (sin unidades)	81.80	52.05	64.20
Índice de área foliar LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1.03	1.45	1.23
Factor C de USLE (adimensional)	0.10	0.02	0.06
Albedo α (fracción)	0.17	0.11	0.13
Coefficiente de ET de vegetación K <sub>c</sub> (adimensional)	0.62	1.13	0.78

**Figura 13.** Pestaña Escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Bosques. Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Escenarios** (Figura 13) los escenarios son definidos como combinaciones de coberturas de vegetación, por ejemplo, pastizales sin árboles frente a escenarios con especies arbóreas distintas. De esta manera, se pueden representar distintos porcentajes de coberturas, tipos de bosques o plantaciones nativas o exóticas, etc.

La **Figura 14** muestra un ejemplo de la pestaña **Cálculos** con los resultados de balance hídrico para un escenario de forestación y protección de bosques.

**Figura 14.** Pestaña Cálculos de escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Bosques.

Escenario 1												
Día	Evapotranspiración potencial - ET <sub>p</sub> (mm/día)	Evapotranspiración real - ET (mm/día)	Escorrentía - q <sub>s</sub> (mm)	Percolación - p (mm)	Balance de agua - R <sub>z</sub> (mm)	Interflujo - q <sub>i</sub> (mm)	Reservorio subsuperficial - R <sub>s</sub> (mm)	Caudal base - q <sub>b</sub> (mm)	Caudal simulado - Q <sub>sim</sub> (mm)	Factor R de USLE - R <sub>UM</sub> (MJ-mm/ha-h)	Pérdida de suelo - A (t/ha)	Concentración de sólidos - c <sub>sim</sub> (g/m <sup>3</sup> )
0					43.5000	1.2263	43.5000	0.0000				
1	4.6066	2.6783	0.2911	19.8089	39.5954	1.0933	63.3089	0.1952	1.5796	0.5920	0.0006	38.4444
2	4.5924	2.6700	0.0000	0.0000	36.6321	0.9923	63.1137	0.1933	1.1856	0.0000	0.0000	0.0000
3	4.6682	2.7141	0.0607	8.5714	39.7936	1.1000	71.4918	0.2758	1.4366	0.0900	0.0001	6.4262
4	4.6351	2.6948	0.0000	0.0000	38.2987	1.0491	71.2160	0.2731	1.3222	0.0000	0.0000	0.0000
5	4.5924	2.6700	0.0000	4.3987	39.7809	1.0996	75.3417	0.3137	1.4133	0.0000	0.0000	0.0000
6	4.5640	2.6535	0.1218	13.2590	39.7469	1.0984	88.2869	0.4413	1.6616	0.2035	0.0002	12.5608
7	4.5971	2.6727	0.0000	0.0000	36.6757	0.9938	87.8456	0.4369	1.4308	0.0000	0.0000	0.0000
8	4.6349	2.6947	0.0000	0.0000	32.9872	0.8682	87.4087	0.4326	1.3008	0.0000	0.0000	0.0000
9	4.6253	2.6892	0.0000	0.0000	29.4298	0.7470	86.9761	0.4284	1.1754	0.0000	0.0000	0.0000
10	4.6299	2.6918	0.0000	0.0000	26.0910	0.6333	86.5477	0.4242	1.0574	0.0000	0.0000	0.0000
11	4.5445	2.6422	0.0000	0.0000	25.7155	0.6205	86.1235	0.4200	1.0405	0.0000	0.0000	0.0000
12	4.4589	2.5924	0.1500	0.0000	40.0526	1.1089	85.7035	0.4158	1.6747	0.2613	0.0003	16.0050
13	4.6009	2.6750	0.0000	0.0000	36.6688	0.9936	85.2877	0.4117	1.4053	0.0000	0.0000	0.0000
14	4.5912	2.6693	0.0000	0.0000	33.4059	0.8825	84.8759	0.4077	1.2901	0.0000	0.0000	0.0000
15	4.5861	2.6663	0.0000	0.0000	30.3572	0.7786	84.4683	0.4037	1.1823	0.0000	0.0000	0.0000

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Héctor Armando Arrunátegui Ochoa

## 2. Conservación y restauración de pastizales altoandinos

### Uso de la interfaz

La **Figura 15** muestra la pestaña **Entradas** para la calculadora beneficios de conservación y restauración de pastizales altoandinos. Aquí se ingresan los parámetros para las condiciones del sitio comunes en todos los escenarios.

**Figura 15.** Pestaña Entradas en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Pastizales.

Entradas			
<b>Coberturas de suelo</b>			
	<b>Pastizal 1</b>	<b>Pastizal 2</b>	<b>Pastizal 3</b>
Número de curva $CN$ (sin unidades)	80	75	67
Índice de área foliar $LAI$ ( $m^2/m^2$ )	1	1.5	2
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.1	0.05	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.13	0.18	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.8	0.7	0.6
<b>Costos</b>			
	<b>Pastizal 1</b>	<b>Pastizal 2</b>	<b>Pastizal 3</b>
Costos de implementación (USD/ha)	50	100	200
<b>Características del sitio</b>			
Altitud (m snm)	3400	(+ Norte	(-) Sur
Latitud (grados)	-13.5		
Pendiente $s$ (m/m)	0.05		
<b>Características del suelo</b>			
		<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>
Profundidad del suelo (mm)	150	75 – 1000	150
Capacidad de campo $f_c$ (mm/mm)	0.5	0 – 1	0.25
Punto de marchitez $w_p$ (mm/mm)	0.175	0 – 1	0.05
Factor $K$ de USLE (adimensional)	0.3	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	40	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	100	20 – 100	70
<b>Coefficientes del modelo</b>			
		<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>
Coefficiente de nubosidad $c$	0.3	0.1 – 0.8	0.3
Ajuste factor USLE $K$	3.39	1 – 10	3.39
<b>Umbral de análisis de eventos extremos</b>			
		<b>Valor ref.</b>	<b>Referencia</b>
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q,alto}$ (mm)	3.0000	2.9549	3 veces la media
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q,bajo}$ (mm)	0.4000	0.2158	Percentil 10% ( $Q_{90}$ )
Umbral alto de sedimentos a analizar $U_{A,alto}$ (ton/ha)	0.0110	0.0108	Percentil 95% ( $A_5$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $U_{A,bajo}$ (ton/ha)	0.0015	0.0014	50% de la media
<b>Calibración</b>			
<b>Indicadores de desempeño</b>			
	<b>Indicador</b>	<b>Umbral</b>	<b>Aceptabilidad</b>
Periodo de calentamiento (días)		60	
$NSE$	0.88	0.5	SI
$RMSE$ (mm)	0.30	0.4	SI
$RSR$	0.34	0.7	SI
$PBIAS$ (%)	-17%	25%	SI
$KGE$	0.77	0.5	SI
$OF$	0.55	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Escenarios** (Figura 16), los escenarios son definidos como combinaciones de coberturas de vegetación, por ejemplo, pastizales pastoreados frente a escenarios con pastizales degradados o restaurados. De esta manera, se pueden configurar escenarios que representen distintos porcentajes de coberturas, tipos de pastizales, estados de conservación o degradación, intensidad de uso de suelo, cultivos, etc.

**Figura 16.** Pestaña Escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Pastizales.

Escenarios			
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Área de Pastizal 1 (ha)	100	50	50
Área de Pastizal 2 (ha)	0	50	0
Área de Pastizal 3 (ha)	0	0	50
Total de área considerada (ha)	100.00	100.00	100.00
Validación		SI	SI

Parámetros combinados de los escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de curva CN (sin unidades)	80.00	77.50	73.50
Índice de área foliar LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1.00	1.25	1.50
Factor C de USLE (adimensional)	0.10	0.08	0.05
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.13	0.16	0.16
Coefficiente de ET de vegetación K <sub>c</sub> (adimensional)	0.80	0.75	0.70

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 muestra un ejemplo de la pestaña **Cálculos** con los resultados de balance hídrico para un escenario de conservación y restauración de pastizales altoadinos.

**Figura 17.** Pestaña Cálculos de escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Pastizales.

Escenario 1													
Día	Evapotranspiración potencial - ET <sub>p</sub> (mm/día)	Evapotranspiración real - ET (mm/día)	Coefficiente de cobertura - r	Escorrentía - q <sub>s</sub> (mm)	Percolación - p (mm)	Balace de agua - R <sub>s</sub> (mm)	Interflujo - q <sub>i</sub> (mm)	Reservorio subsuperficial - R <sub>s</sub> (mm)	Caudal base - q <sub>b</sub> (mm)	Caudal simulado - Q <sub>sim</sub> (mm)	Factor R de USLE - R <sub>UM</sub> (MJ-mm/ha-h)	Pérdida de suelo - A (t/ha)	Concentración de sólidos - c <sub>sim</sub> (g/m <sup>3</sup> )
0						75.0000	0.8375	75.0000	0.0000				
1	2.5952	1.9431	0.7487	2.9880	17.1120	72.2194	0.7897	92.1120	0.1182	3.8959	6.0766	0.0278	714.2035
2	2.5871	1.8229	0.7046	0.0000	0.0000	70.4068	0.7586	91.9938	0.1174	0.8760	0.0000	0.0000	0.0000
3	2.6302	1.7860	0.6790	1.6311	9.2758	72.4554	0.7938	101.1522	0.1806	2.6055	2.4170	0.0111	424.7797
4	2.6113	1.8491	0.7081	0.0000	0.0000	72.1125	0.7879	100.9715	0.1794	0.9673	0.0000	0.0000	0.0000
5	2.5871	1.8188	0.7030	0.4389	6.2736	72.3933	0.7927	107.0657	0.2215	1.4531	0.3629	0.0017	114.3536
6	2.5710	1.8181	0.7072	2.0642	12.4291	72.3892	0.7926	119.2733	0.3058	3.1627	3.4477	0.0158	499.1699
7	2.5898	1.8313	0.7071	0.0000	0.0000	70.4652	0.7596	118.9675	0.3037	1.0633	0.0000	0.0000	0.0000
8	2.6112	1.7752	0.6798	0.0000	0.0000	67.9304	0.7160	118.6638	0.3016	1.0177	0.0000	0.0000	0.0000
9	2.6058	1.6879	0.6478	0.0000	0.0000	65.5265	0.6747	118.3622	0.2995	0.9743	0.0000	0.0000	0.0000
10	2.6084	1.6197	0.6209	0.0000	0.0000	63.3320	0.6370	118.0627	0.2975	0.9345	0.0000	0.0000	0.0000
11	2.5599	1.5339	0.5992	0.0000	0.0000	64.0611	0.6496	117.7652	0.2954	0.9450	0.0000	0.0000	0.0000
12	2.5114	1.5223	0.6062	2.2376	4.5235	72.8281	0.8002	121.9933	0.3246	3.3624	3.8976	0.0178	530.7938
13	2.5919	1.8499	0.7137	0.0000	0.0000	70.5780	0.7615	121.6687	0.3224	1.0839	0.0000	0.0000	0.0000
14	2.5864	1.7622	0.6814	0.0000	0.0000	68.4542	0.7250	121.3463	0.3201	1.0452	0.0000	0.0000	0.0000
15	2.5835	1.6897	0.6540	0.0000	0.0000	66.5395	0.6921	121.0262	0.3179	1.0101	0.0000	0.0000	0.0000

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Hysha Yashira Palomino Tomaylla

### 3. Implementación de zanjias de infiltración

#### Uso de la interfaz

La **Figura 18** muestra la pestaña **Entradas** para la Calculadora de Beneficios de implementación de zanjias de infiltración. Aquí se ingresan los parámetros para las condiciones del sitio comunes en todos los escenarios. Aquí también se definen las características de dos tipos de intervenciones con zanjias de infiltración: longitud pendiente arriba (L), ancho superior de la zanja (T), ancho del fondo de la zanja (b), profundidad de la zanja (y). Además, se ingresan los costos de implementación por cambio de cobertura de suelo y por implementación de las zanjias de infiltración (USD).

**Figura 18.** Pestaña Entradas en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Zanjas.

Entradas			
Coberturas de suelo			
	Cobertura 1	Cobertura 2	Cobertura 3
Número de curva <i>CN</i> (sin unidades)	73	80	67
Índice de área foliar <i>LAI</i> ( $m^2/m^2$ )	2	1	1.5
Factor <i>C</i> de USLE (adimensional)	0.013	0.1	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.16	0.13	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.8	1.2	0.6
Costos de cambio de cobertura			
	Cobertura 1	Cobertura 2	Cobertura 3
Costos de vegetación (USD/ha)	50	100	200
Características de las zanjas			
	Zanjas 1	Zanjas 2	
Longitud pediente arriba <i>L</i> (m)	10	10	
Ancho superior de la zanja <i>T</i> (cm)	20	20	
Ancho del fondo de la zanja <i>b</i> (cm)	15	15	
Profundidad de la zanja <i>y</i> (cm)	15	15	
Costos de implementación de las zanjas			
	Zanjas 1	Zanjas 2	
Costos de remoción de vegetación (USD/m <sup>2</sup> )	1	1	
Costos de excavación (USD/m <sup>3</sup> )	3	3	
Características del sitio			
Altitud (m snm)	3400		
Latitud (grados)	-13.5	(+) Norte	(-) Sur
Pendiente <i>s</i> (m/m)	0.05		
Características del suelo			
		Rango	Referencia
Profundidad del suelo (mm)	150	75 – 1000	150
Capacidad de campo <i>f<sub>c</sub></i> (mm/mm)	0.5	0 – 1	0.25
Punto de marchitez <i>w<sub>p</sub></i> (mm/mm)	0.05	0 – 1	0.05
Factor <i>K</i> de USLE (adimensional)	0.3	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	50	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	100	20 – 100	70
Coeficientes del modelo			
		Rango	Referencia
Coefficiente de nubosidad <i>c</i>	0.3	0.1 – 0.8	0.3
Ajuste factor USLE <i>K</i>	3.39	1 – 10	3.39
Umbral de análisis de eventos extremos			
		Valor ref.	Referencia
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q,alto}$ (mm)	3.6000	3.6561	3 veces la media
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q,bajo}$ (mm)	0.5000	0.5128	Percentil 10% ( $Q_{90}$ )
Umbral alto de sedimentos a analizar $U_{A,alto}$ (ton/ha)	0.0015	0.0017	Percentil 95% ( $A_5$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $U_{A,bajo}$ (ton/ha)	0.0003	0.0003	50% de la media
Calibración			
Indicadores de desempeño			
	Indicador	Umbral	Aceptabilidad
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.90	0.5	SI
RMSE (mm)	0.31	0.4	SI
RSR	0.32	0.7	SI
PBIAS (%)	12%	25%	SI
KGE	0.77	0.5	SI
OF	0.53	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Ana Castañeda

En la pestaña **Escenarios** (**Figura 19**), los escenarios se configuran combinando las coberturas de vegetación ingresadas en la pestaña **Entradas**. Esto se puede interpretar como hectáreas de extensión de terreno o como porcentaje de cobertura. Adicionalmente, aquí se ingresa el área bruta total cubierta por las zanjas de infiltración ( $A_z$ ), la cual debe ser menor o igual al área total de la cuenca. Los escenarios que se comparan pueden ser casos de cuencas con y sin zanjas de infiltración frente a diferentes opciones de zanjas, con dimensiones diversas, o con o sin cambios de cobertura de suelo.

**Figura 19.** Pestaña Escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Zanjas.

Escenarios			
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Área de Cobertura 1 (ha)	30	30	20
Área de Cobertura 2 (ha)	10	10	0
Área de Cobertura 3 (ha)	10	10	30
Total de área considerada (ha)	50.00	50.00	50.00
Validación (áreas iguales)		SI	SI
Área bruta total cubierta por las zanjas de infiltración $A_z$ (ha)		20	5
Validación (área de zanjas menor)		SI	SI
Parámetros combinados de los escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de curva $CN$ (sin unidades)	73.20	73.20	69.40
Índice de área foliar $LAI$ ( $m^2/m^2$ )	1.70	1.70	1.70
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.03	0.03	0.01
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.16	0.16	0.17
Coficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.84	0.84	0.68

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 20** muestra un ejemplo de la pestaña **Cálculos** con los resultados de balance hídrico para un escenario de implementación de zanjas de infiltración.

**Figura 20.** Pestaña Cálculos de escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Zanjas.

Escenario I								
Día	Evapotranspiración potencial - $ET_p$ (mm/día)	Evapotranspiración real - $ET$ (mm/día)	Escurrentía pendiente arriba - $q_o$ (mm)	Ingreso de escurrentía hacia la zanja - $V_{qo}$ (m3)	Ingreso de lluvia hacia la zanja - $V_p$ (m3)	Pérdida por evaporación de la zanja - $V_{ET}$ (m3)	Volumen de agua en la zanja - $V_{z2}$ (m3)	Escurrentía después de la intercepción de la zanja - $q_i$ (mm)
0								
1	2.5827	1.6389	2.2012	1100.6103	80.4000	10.3307	1170.6796	1.3119
2	2.5746	1.6338	0.0000	0.0000	3.2000	10.2986	0.0000	0.0000
3	2.6175	1.6610	1.1337	566.8479	62.0000	10.4700	618.3779	0.2073
4	2.5988	1.6491	0.0000	0.0000	9.2000	10.3951	0.0000	0.0000
5	2.5747	1.6338	0.2502	125.0970	38.4000	10.2986	153.1984	0.0000
6	2.5586	1.6236	1.4701	735.0258	68.4000	10.2343	793.1915	0.5570
7	2.5773	1.6354	0.0000	0.0000	2.8000	10.3092	0.0000	0.0000
8	2.5987	1.6490	0.0000	0.0000	0.0000	10.3947	0.0000	0.0000
9	2.5933	1.6456	0.0000	0.0000	0.0000	10.3730	0.0000	0.0000
10	2.5959	1.6472	0.0000	0.0000	0.4000	10.3835	0.0000	0.0000
11	2.5476	1.6166	0.0000	0.0000	11.6000	10.1903	1.4097	0.0000
12	2.4992	1.5859	1.6060	803.0079	70.8000	9.9969	863.8110	0.6982
13	2.5794	1.6368	0.0000	0.0000	1.6000	10.3178	0.0000	0.0000
14	2.5739	1.6333	0.0000	0.0000	1.6000	10.2957	0.0000	0.0000
15	2.5710	1.6315	0.0000	0.0000	2.0000	10.2842	0.0000	0.0000

(a)

Escenario I									
Evapotranspiración después de las zanjas - $ET_z$ (mm/día)	Percolación - $p$ (mm)	Balance de agua - $R_s$ (mm)	Interflujo - $q_i$ (mm)	Reservorio subsuperficial - $R_b$ (mm)	Caudal base - $q_b$ (mm)	Caudal simulado - $Q_{sim}$ (mm)	Factor R de USLE - $R_{UM}$ (MJ-mm/ha-h)	Pérdida de suelo - $A$ (t/ha)	Concentración de sólidos - $c_{sim}$ (g/m3)
		75.0000	0.9293	75.0000	0.0000				
1.6595	18.7881	72.4318	0.8939	93.7881	0.1298	2.3357	2.6681	0.0048	205.0428
1.6544	0.0000	70.7041	0.8702	93.6583	0.1289	0.9990	0.0000	0.0000	0.0000
1.6819	10.9968	72.4689	0.8944	104.5262	0.2040	1.3057	0.3073	0.0006	42.2380
1.6699	0.0000	72.2254	0.8911	104.3222	0.2025	1.0936	0.0000	0.0000	0.0000
1.6544	6.8254	72.4751	0.8945	110.9451	0.2483	1.1428	0.0000	0.0000	0.0000
1.6440	14.0182	72.4819	0.8946	124.7149	0.3434	1.7950	0.9303	0.0017	93.0256
1.6561	0.0000	70.6518	0.8694	124.3715	0.3410	1.2105	0.0000	0.0000	0.0000
1.6698	0.0000	68.1334	0.8348	124.0305	0.3387	1.1734	0.0000	0.0000	0.0000
1.6663	0.0000	65.6530	0.8006	123.6918	0.3363	1.1369	0.0000	0.0000	0.0000
1.6680	0.0000	63.3052	0.7683	123.3555	0.3340	1.1023	0.0000	0.0000	0.0000
1.6370	0.0000	63.8203	0.7754	123.0214	0.3317	1.1071	0.0000	0.0000	0.0000
1.6059	5.8221	72.6387	0.8968	128.5119	0.3696	1.9646	1.2162	0.0022	111.1176
1.6575	0.0000	70.5051	0.8674	128.1422	0.3671	1.2345	0.0000	0.0000	0.0000
1.6539	0.0000	68.4044	0.8385	127.7751	0.3645	1.2030	0.0000	0.0000	0.0000
1.6521	0.0000	66.4344	0.8114	127.4106	0.3620	1.1734	0.0000	0.0000	0.0000

(b)

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

## 4. Construcción y recuperación de amunas

### Uso de la interfaz

La **Figura 21** muestra la pestaña **Entradas** para la Calculadora de Beneficios de construcción y recuperación de amunas. Aquí se ingresan los parámetros para las condiciones del sitio comunes en todos los escenarios. Aquí también se definen las características de dos tipos de amunas: ancho superior del canal ( $T$ ), ancho del fondo del canal ( $b$ ), altura máxima de agua en el canal ( $y$ ), rugosidad ( $n$ ) de Chézy, altitud de la bocatoma del canal de amuna ( $H_o$ ), altitud del final del canal de amuna ( $H_f$ ), longitud del canal ( $L_{am}$ ), caudal ecológico mínimo en el cauce ( $Q_{min}$ ) y porcentaje de agua que vuelve inmediatamente al cauce ( $F_{ret}$ ), según el material del canal de amuna. Además, se ingresan los costos de implementación por cambio de cobertura de suelo y por implementación de las amunas (USD). Adicionalmente, se ingresan las características del acuífero que es alimentado por las amunas, incluyendo: tiempo de residencia medio del agua infiltrada ( $T_{am}$ ), percolación profunda al acuífero ( $r_a$ ), área de pampa de infiltración ( $A_i$ ) y área de percolación profunda ( $A_p$ ).

**Figura 21.** Pestaña Entradas en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Amunas mostrando las opciones de ingreso de datos de entrada.

Entradas			
<b>Coberturas de suelo</b>			
	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>
Número de curva $CN$ (sin unidades)	80	75	67
Índice de área foliar $LAI$ ( $m^2/m^2$ )	1	1.5	2
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.1	0.05	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.17	0.18	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	1	0.8	0.6
<b>Costos de cambio de cobertura</b>			
	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>
Costos de vegetación (USD/ha)	50	100	200
<b>Características de las amunas</b>			
	<b>Amuna 1</b>	<b>Amuna 2</b>	
Ancho superior del canal de amuna $T$ (cm)	30	25	
Ancho del fondo del canal de amuna $b$ (cm)	20	25	
Altura del canal de amuna $y$ (cm)	30	25	
Rugosidad $n$ de Chézy del canal de amuna (adimensional)	0.025	0.013	
Altitud de la bocatoma del canal de amuna $H_o$ (m snm)	3300	3300	
Altitud del final del canal de amuna $H_f$ (m snm)	3250	3250	
Longitud del canal de amuna $L_{am}$ (m)	3000	3000	
Caudal ecológico mínimo en el cauce $Q_{min}$ (l/s)	20	20	
Porcentaje de agua que vuelve inmediatamente al cauce $F_{ret}$ (%)	25%	0%	
<b>Costos de implementación de las amunas</b>			
	<b>Amuna 1</b>	<b>Amuna 2</b>	
Costos de remoción de vegetación (USD/ $m^2$ )	1	1	
Costos de excavación (USD/ $m^3$ )	6	6	
Costos de impermeabilización (USD/ $m^2$ )	0	2	
<b>Características del sitio</b>			
Altitud (m snm)	3400		
Latitud (grados)	-13.5	(+) Norte	(-) Sur
Pendiente $s$ (m/m)	0.05		
<b>Características del suelo</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Profundidad del suelo (mm)	150	75 – 1000	150
Capacidad de campo $f_c$ (mm/mm)	0.325	0 – 1	0.3
Punto de marchitez $w_p$ (mm/mm)	0.075	0 – 1	0.05
Factor $K$ de USLE (adimensional)	0.3	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	20	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	70	20 – 100	70
<b>Características del acuífero</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Tiempo de residencia medio del agua infiltrada $\tau_{am}$ (día)	45	15 – 250	45
Percolación profunda al acuífero $r_o$ (mm/día)	1	0.305 – 305	1
Área de pampa de infiltración $A_i$ (ha)	12		
Área de percolación profunda $A_p$ (ha)	30		
<b>Coefficientes del modelo</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Coefficiente de nubosidad $c$	0.5	0.1 – 0.8	0.3
Ajuste factor USLE $K$	3.39	1 – 10	3.39
<b>Umbral de análisis de eventos extremos</b>			
	<b>Valor ref.</b>	<b>Referencia</b>	
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q,alto}$ (mm)	3.0000	2.9549	3 veces la media
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q,bajo}$ (mm)	0.2150	0.2158	Percentil 10% ( $Q_{90}$ )
Umbral alto de sedimentos a analizar $UA_{alto}$ (ton/ha)	0.0100	0.0108	Percentil 95% ( $A_5$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $UA_{bajo}$ (ton/ha)	0.0015	0.0014	50% de la media

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

En la pestaña **Entradas** también se puede calibrar el modelo hidrológico para el escenario de línea base (antes de la amuna) y para el escenario I (después de la amuna) (**Figura 22**) utilizando los datos de caudal ingresados en la pestaña **Observaciones**.

**Figura 22.** Pestaña Entradas en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Amunas mostrando las opciones de calibración.

Calibración antes de la amuna			
Indicadores de desempeño	Indicador	Umbral	Aceptabilidad
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.90	0.5	SI
RMSE (mm)	0.27	0.4	SI
RSR	0.31	0.7	SI
PBIAS (%)	-1%	25%	SI
KGE	0.74	0.5	SI
OF	0.49	1.10	SI

Calibración después de la amuna (opcional)			
Indicadores de desempeño	Indicador	Umbral	Aceptabilidad
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.97	0.5	SI
RMSE (mm)	0.13	0.4	SI
RSR	0.19	0.7	SI
PBIAS (%)	-4%	25%	SI
KGE	0.88	0.5	SI
OF	0.26	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Escenarios** (Figura 23), los escenarios se configuran combinando las coberturas de vegetación ingresadas en la pestaña **Entradas**. Esto se puede interpretar como hectáreas de extensión de terreno o como porcentaje de cobertura. Adicionalmente, aquí se pueden observar los cálculos de las características hidráulicas de los canales de amunas definidos en el ingreso de datos de entrada. Los escenarios que se comparan pueden ser casos de cuencas sin canales de amunas frente a diferentes opciones de canales, con materiales permeables o impermeables o con distintas características geométricas e hidráulicas.

**Figura 23.** Pestaña Escenarios en la CUBHIC 2.0 – Amunas.

<b>Escenarios</b>			
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Área de Cobertura 1 (ha)	250	200	225
Área de Cobertura 2 (ha)	0	50	0
Área de Cobertura 3 (ha)	0	0	25
Total de área considerada (ha)	250.00	250.00	250.00
Validación		SI	SI
Parámetros combinados de los escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de curva CN (sin unidades)	80.00	79.00	78.70
Índice de área foliar LAI (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1.00	1.10	1.10
Factor C de USLE (adimensional)	0.10	0.09	0.09
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.17	0.17	0.17
Coefficiente de ET de vegetación K <sub>c</sub> (adimensional)	1.00	0.96	0.96
Características de las amunas	Amuna 1	Amuna 2	
Inclinación de las paredes del canal de amuna z	0.167	0.000	
Área de sección transversal del canal de amuna A <sub>am</sub> (m <sup>2</sup> )	0.075	0.063	
Perímetro mojado P <sub>am</sub> (m)	0.808	0.750	
Radio hidráulico R <sub>h</sub> (m)	0.093	0.083	
Pendiente del fondo del canal S <sub>o</sub> (m/m)	0.02	0.02	
Coefficiente Chézy C (m <sup>1/2</sup> /s)	21.79	49.03	
Velocidad del agua máximo en el canal de amuna v <sub>max</sub> (m/s)	0.86	1.83	
Caudal máximo en el canal de amuna Q <sub>max</sub> (l/s)	64.27	114.20	
Volumen equivalente máximo en el canal de amuna q <sub>max</sub> (mm/día)	2.22	3.95	
Volumen equivalente mínimo ecológico en el canal de amuna q <sub>min</sub> (mm/día)	0.6912	0.6912	

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 24** muestra un ejemplo de la pestaña **Cálculos** con los resultados de balance hídrico para un escenario de construcción y recuperación de amunas.

**Figura 24.** Pestaña Cálculos de escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0

– Amunas.

Escenario I									
Día	Evapotranspiración potencial - $ET_p$ (mm/día)	Evapotranspiración real antes de la amuna - $ET$ (mm/día)	Escurrentía antes de la amuna - $q_a$ (mm)	Percolación antes de la amuna - $p$ (mm)	Balace de agua - $R_s$ (mm)	Interflujo antes de la amuna - $q_i$ (mm)	Reservorio subsuperficial - $R_b$ (mm)	Caudal base antes de la amuna - $q_b$ (mm)	Caudal simulado antes de la amuna - $Q_{sim}$ (mm)
0					48.7500	1.2774	48.7500	0.0000	
1	4.2072	2.1640	3.3201	16.7799	45.3086	1.1602	65.5299	0.1653	4.6456
2	4.1941	2.1573	0.0000	0.0000	42.7911	1.0744	65.3646	0.1637	1.2381
3	4.2641	2.1933	1.8456	7.6955	45.4823	1.1661	72.8963	0.2379	3.2496
4	4.2335	2.1776	0.0000	0.0000	44.4386	1.1305	72.6584	0.2356	1.3661
5	4.1941	2.1573	0.5253	4.7633	45.4622	1.1654	77.1862	0.2802	1.9709
6	4.1678	2.1438	2.3183	11.4938	45.4408	1.1647	88.3998	0.3907	3.8737
7	4.1984	2.1595	0.0000	0.0000	42.8166	1.0753	88.0091	0.3868	1.4621
8	4.2334	2.1775	0.0000	0.0000	39.5639	0.9645	87.6223	0.3830	1.3475
9	4.2245	2.1729	0.0000	0.0000	36.4265	0.8576	87.2393	0.3792	1.2368
10	4.2288	2.1751	0.0000	0.0000	33.4937	0.7577	86.8600	0.3755	1.1332
11	4.1498	2.1345	0.0000	0.0000	33.5015	0.7580	86.4845	0.3718	1.1298
12	4.0709	2.0939	2.5070	0.0000	45.8426	1.1784	86.1127	0.3681	4.0535
13	4.2019	2.1613	0.0000	0.0000	42.9029	1.0782	85.7446	0.3645	1.4427
14	4.1929	2.1567	0.0000	0.0000	40.0680	0.9816	85.3801	0.3609	1.3426
15	4.1882	2.1543	0.0000	0.0000	37.4321	0.8919	85.0191	0.3574	1.2492

(a)

Escenario I									
Caudal desviado hacia la amuna - $q_{am}$ (mm)	Retorno inmediato al cauce - $L_{ret}$ (mm)	Pérdidas por evaporación - $L_{ET}$ (mm)	Pérdidas por percolación profunda - $L_p$ (mm)	Evapotranspiración real después de la amuna - $ET_{am}$ (mm/día)	Escurrentía restante - $q_{o,r}$ (mm)	Caudal desviado restante - $q_{am2}$ (mm)	Interflujo restante - $q_{i,r}$ (mm)	Caudal desviado restante - $q_{am3}$ (mm)	Caudal base restante - $q_{b,r}$ (mm)
							1.2774		0.0000
2.2213	0.5553	0.2019	0.1200	2.3660	1.0988	0.0000	1.1602	0.0000	0.1653
0.5469	0.1367	0.2013	0.1200	2.3586	0.0000	0.5469	0.5275	0.0000	0.1637
2.2213	0.5553	0.2047	0.1200	2.3980	0.0000	0.3756	0.7904	0.0000	0.2379
0.6749	0.1687	0.2032	0.1200	2.3808	0.0000	0.6749	0.4556	0.0000	0.2356
1.2797	0.3199	0.2013	0.1200	2.3586	0.0000	0.7544	0.4110	0.0000	0.2802
2.2213	0.5553	0.2001	0.1200	2.3438	0.0971	0.0000	1.1647	0.0000	0.3907
0.7709	0.1927	0.2015	0.1200	2.3610	0.0000	0.7709	0.3044	0.0000	0.3868
0.6563	0.1641	0.2032	0.1200	2.3807	0.0000	0.6563	0.3082	0.0000	0.3830
0.5456	0.1364	0.2028	0.1200	2.3757	0.0000	0.5456	0.3120	0.0000	0.3792
0.4420	0.1105	0.2030	0.1200	2.3781	0.0000	0.4420	0.3157	0.0000	0.3755
0.4386	0.1096	0.1992	0.1200	2.3337	0.0000	0.4386	0.3194	0.0000	0.3718
2.2213	0.5553	0.1954	0.1200	2.2893	0.2857	0.0000	1.1784	0.0000	0.3681
0.7515	0.1879	0.2017	0.1200	2.3630	0.0000	0.7515	0.3267	0.0000	0.3645
0.6514	0.1628	0.2013	0.1200	2.3579	0.0000	0.6514	0.3303	0.0000	0.3609
0.5580	0.1395	0.2010	0.1200	2.3553	0.0000	0.5580	0.3338	0.0000	0.3574

(b)

Escenario I										
Caudal desviado restante - $q_{am4}$ (mm)	Caudal total restante - $Q_{sim,r}$ (mm)	Percolación adicional - $p_{am}$ (mm)	Percolación después de la amuna - $p_2$ (mm)	Reservorio subsuperficial - $R_{b2}$ (mm)	Caudal base adicional - $q_{b,am}$ (mm)	Caudal base después de la amuna - $q_{b2}$ (mm)	Caudal simulado después de la amuna - $Q_{sim2}$ (mm)	Factor R de USLE - $R_{UM}$ (MJ·mm/ha·h)	Pérdida de suelo A (t/ha)	Concentración de sólidos - $c_{sim}$ (g/m3)
				48.7500	0.0000	0.0000				
0.0000	2.9796	1.3440	18.1239	50.0940	0.0205	0.1859	3.0002	2.2346	0.0123	409.2686
0.0000	0.8279	0.0889	0.0889	50.1623	0.0216	0.1853	0.8495	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	1.5837	1.3413	9.0368	51.4820	0.0418	0.2797	1.6254	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.8599	0.1830	0.1830	51.6232	0.0439	0.2795	0.9038	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	1.0111	0.6385	5.4018	52.2178	0.0530	0.3332	1.0641	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	2.2077	1.3459	12.8397	53.5107	0.0728	0.4634	2.2805	0.1621	0.0009	39.0639
0.0000	0.8839	0.2567	0.2567	53.6946	0.0756	0.4624	0.9595	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.8553	0.1690	0.1690	53.7880	0.0770	0.4600	0.9323	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.8276	0.0865	0.0865	53.7975	0.0772	0.4564	0.9048	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.8017	0.0085	0.0085	53.7288	0.0761	0.4516	0.8778	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.8008	0.0097	0.0097	53.6625	0.0751	0.4469	0.8759	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	2.3875	1.3506	1.3506	54.9379	0.0946	0.4627	2.4821	0.4976	0.0027	110.1684
0.0000	0.8791	0.2420	0.2420	55.0853	0.0968	0.4614	0.9759	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.8540	0.1673	0.1673	55.1557	0.0979	0.4588	0.9520	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.8307	0.0975	0.0975	55.1553	0.0979	0.4553	0.9286	0.0000	0.0000	0.0000

(c)

Fuente: Elaboración propia.





Foto: Midagri

## 5. Construcción de qochas (microreservorios permeables)

### Uso de la interfaz

La **Figura 25** muestra la pestaña **Entradas** para la calculadora de construcción de qochas (microreservorios permeables). Aquí se ingresan los parámetros para las condiciones del sitio comunes en todos los escenarios. Aquí también se definen las características de dos tipos de qochas: altura máxima de agua en la qocha ( $y_{qc}$ ), conductividad hidráulica en la qocha ( $K_{sat,qc}$ ), altura inicial de agua en la qocha ( $y_0$ ), recarga ( $ra$ ) (aporte de agua subterránea) y uso de agua directo de la qocha ( $Q_{out}$ ). Además, se ingresan los costos de implementación por cambio de cobertura de suelo y por implementación de las qochas (USD). Adicionalmente, se ingresan las características del acuífero que es alimenta a la qocha, incluyendo: rendimiento del acuífero ( $Y_a$ ) y conductividad hidráulica ( $K_{sat,a}$ ).

**Figura 25.** Pestaña Entradas en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Qochas.

Entradas			
<b>Coberturas de suelo</b>			
	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>
Número de curva $CN$ (sin unidades)	81	73	67
Índice de área foliar $LAI$ ( $m^2/m^2$ )	1.5	2	1.5
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.042	0.013	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.18	0.16	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.8	0.7	0.6
<b>Costos de cambio de cobertura</b>			
	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>
Costos de vegetación (USD/ha)	50	100	200
<b>Características de las qochas</b>			
	<b>Qochas 1</b>	<b>Qochas 2</b>	
Altura máxima de agua en la qocha $y_{qc}$ (m)	4	1	
Conductividad hidráulica en la qocha $K_{sat,qc}$ (mm/día)	4	4	
Altura inicial de agua en la qocha $y_o$ (m)	0	0	
Recarga $r_o$ ( $m^3/m^3$ ) (aporte de agua subterránea)	0	0	
Uso de agua directo de la qocha $Q_{out}$ ( $m^3/día$ )	1	1	
<b>Costos de implementación de las qochas</b>			
	<b>Qochas 1</b>	<b>Qochas 2</b>	
Costos de remoción de vegetación (USD/ $m^2$ )	0	0	
Costos de excavación (USD/ $m^3$ )	1	1	
<b>Características del sitio</b>			
Altitud (m snm)	2700		
Latitud (grados)	-14	(+) Norte	(-) Sur
Pendiente $s$ (m/m)	0.05		
<b>Características del suelo</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Profundidad del suelo (mm)	150	75 – 1000	150
Capacidad de campo $f_c$ (mm/mm)	0.27	0 – 1	0.27
Punto de marchitez $w_p$ (mm/mm)	0.17	0 – 1	0.17
Factor $K$ de USLE (adimensional)	0.3	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	50	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	100	20 – 100	70
<b>Coefficientes del modelo</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Coefficiente de nubosidad $c$	0.3	0.1 – 0.8	0.5
Ajuste factor USLE $K$	3.39	1 – 10	4.37
<b>Características del acuífero</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Rendimiento del acuífero $Y_o$ (mm/mm)	0.15	0 – 1	0.15
Conductividad hidráulica $K_{sat,o}$ (mm/día)	35	0.305 – 305	35
<b>Umbral de análisis de eventos extremos</b>			
	<b>Valor ref.</b>	<b>Referencia</b>	
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q,alto}$ (mm)	2.4000	2.3920	3 veces la media
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q,bajo}$ (mm)	0.2500	0.2513	Percentil 10% ( $Q_{90}$ )
Umbral alto de sedimentos a analizar $UA_{alto}$ (ton/ha)	0.0010	0.0005	Percentil 95% ( $A_5$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $UA_{bajo}$ (ton/ha)	0.0001	0.0001	50% de la media
Calibración			
<b>Indicadores de desempeño</b>			
	<b>Indicador</b>	<b>Umbral</b>	<b>Aceptabilidad</b>
Periodo de calentamiento (días)		60	
$NSE$	0.96	0.5	SI
$RMSE$ (mm)	0.11	0.4	SI
$RSR$	0.19	0.7	SI
$PBIAS$ (%)	0%	25%	SI
$KGE$	0.86	0.5	SI
$OF$	0.26	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Escenarios** (Figura 26), los escenarios se configuran combinando las coberturas de vegetación ingresadas en la pestaña **Entradas**. Esto se puede interpretar como hectáreas de extensión de terreno o como porcentaje de cobertura. Adicionalmente, aquí se pueden ingresar las áreas de las qochas a evaluar. La extensión de la qocha se considera como parte del total del área analizada. Los valores totales de las áreas en los escenarios deben coincidir. Para la metodología de construcción de qochas, se pueden configurar escenarios que representen distintos porcentajes de coberturas, combinados con escenarios con qochas o sin qochas, de diferente área superficial, profundidad o características de permeabilidad, así como con aportes de agua subterránea o con salidas directas de uso o no.

**Figura 26.** Pestaña Escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Qochas.

Escenarios			
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Área de Cobertura 1 (ha)	20	20	20
Área de Cobertura 2 (ha)	10	10	8
Área de Cobertura 3 (ha)	5	4.5	5
Área de la qocha $A_{qc}$ (m <sup>2</sup> )		5000	20000
Área equivalente de la qocha (ha)		0.50	2.00
Área de contribución a la qocha $A_c$ (ha)		34.50	33.00
Total de área considerada (ha)	35.00	35.00	35.00
Validación		SI	SI
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de curva $CN$ (sin unidades)	76.71	76.86	76.94
Índice de área foliar $LAI$ (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1.64	1.64	1.62
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.03	0.03	0.03
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.17	0.17	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.74	0.74	0.75

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 27** muestra un ejemplo de la pestaña **Cálculos** con los resultados de balance hídrico para un escenario de construcción de gochas.

**Figura 27.** Pestaña Cálculos de escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Qochas.

Escenario I								
Día	Evapotranspiración potencial - $ET_p$ (mm/día)	Evapotranspiración antes de la gocha - $ET$ (mm/día)	Escurrentía pendiente arriba - $q_o$ (mm)	Percolación antes de la gocha - $p$ (mm)	Balace de agua - $R_s$ (mm)	Interflujo - $q_i$ (mm)	Altura del nivel freático - $h$ (m)	Flujo de agua subterránea - $q_{gw}$ (mm)
0					40.5000	0.2065	0.0000	0.0000
1	2.1591	1.3439	0.0000	0.2000	38.9496	0.1852	0.0000	0.0000
2	2.0032	1.2469	0.0000	0.0000	37.5175	0.1654	0.0000	0.0000
3	1.9816	1.2334	0.0000	0.0000	36.1186	0.1462	0.0000	0.0000
4	1.9546	1.2167	0.0000	0.0000	35.8558	0.1426	0.0000	0.0000
5	2.1051	1.3103	0.0000	0.0000	37.0029	0.1584	0.0000	0.0000
6	2.1051	1.3103	0.0000	0.0000	35.8342	0.1423	0.0000	0.0000
7	2.0996	1.3069	0.0839	1.6503	39.0508	0.1866	0.0000	0.0000
8	2.0457	1.2734	0.4054	7.7454	39.0401	0.1864	0.0000	0.0000
9	2.0133	1.2532	0.0000	2.1401	39.0604	0.1867	0.0000	0.0000
10	2.0777	1.2932	0.0403	4.1201	39.0201	0.1861	0.0000	0.0000
11	1.9646	1.2229	3.1161	16.3039	39.0910	0.1871	0.0000	0.0000
12	1.9483	1.2127	0.0000	0.0000	37.6912	0.1678	0.0000	0.0000
13	2.0234	1.2594	0.0000	0.0000	36.2639	0.1482	0.0000	0.0000
14	1.9425	1.2091	0.0000	0.0000	35.1066	0.1323	0.0000	0.0000
15	1.9691	1.2257	0.5358	4.5708	39.1421	0.1878	0.0000	0.0000

(a)

Escenario I								
Volumen de escurrentía - $V_{qo}$ (m³)	Volumen de agua subterránea - $V_{gw}$ (m³)	Volumen de precipitación - $V_p$ (m³)	Volumen de ingreso adicional - $V_{in}$ (m³)	Volumen de evaporación - $V_{ET}$ (m³)	Volumen de filtración - $V_s$ (m³)	Uso de agua directo - $V_{wd}$ (m³)	Volumen de salida - $V_{out}$ (m³)	Volumen total - $V_{tot}$ (m³)
								0.0000
0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	5.5000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	4.5000
0.0000	0.0000	13.0000	0.0000	0.0482	0.1539	1.0000	0.0000	16.2979
0.0000	0.0000	1.5000	0.0000	0.1137	0.3629	1.0000	0.0000	16.3212
28.9406	0.0000	32.0000	0.0552	0.1135	0.3633	1.0000	0.0000	75.8402
139.8792	0.0000	48.0000	28.7420	0.3081	1.0116	1.0000	0.0000	290.1417
0.0000	0.0000	18.0000	0.0000	0.7416	2.4746	1.0000	0.0000	303.9255
13.8939	0.0000	28.0000	0.0000	0.7894	2.5523	1.0000	0.0000	341.4777
1075.0659	0.0000	104.5000	506.4422	0.8066	2.7585	1.0000	0.0000	2022.9200
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.6187	9.0312	1.0000	0.0000	2010.2710
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.7087	8.9935	1.0000	0.0000	1997.5680
0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	2.5890	8.9555	1.0000	0.0000	1986.0240
184.8496	0.0000	52.5000	45.9684	2.6146	8.9210	1.0000	0.0000	2256.8060

(b)

Escenario I								
Evapotranspiración después de la gocha - $ET_{qc}$ (mm/día)	Escurrentía después de la gocha - $q_{o,qc}$ (mm)	Percolación después de la gocha - $p_{qc}$ (mm)	Reservorio subsuperficial - $R_b$ (mm)	Caudal base - $q_b$ (mm)	Caudal simulado - $Q_{sim}$ (mm)	Factor R de USLE - $R_{UM}$ (MJ-mm/ha-h)	Pérdida de suelo - $A$ (t/ha)	Concentración de sólidos - $c_{sim}$ (g/m3)
			40.5000	0.0000				
1.3247	0.0000	0.1971	40.6971	0.0014	0.1839	0.0000	0.0000	0.0000
1.2291	0.0000	0.0000	40.6958	0.0014	0.1644	0.0000	0.0000	0.0000
1.2158	0.0000	0.0000	40.6944	0.0013	0.1454	0.0000	0.0000	0.0000
1.1993	0.0000	0.0000	40.6931	0.0013	0.1419	0.0000	0.0000	0.0000
1.2918	0.0000	0.0004	40.6922	0.0013	0.1574	0.0000	0.0000	0.0000
1.2919	0.0000	0.0010	40.6919	0.0013	0.1416	0.0000	0.0000	0.0000
1.2885	0.0000	1.6278	42.3184	0.0126	0.1965	0.0000	0.0000	0.0000
1.2560	0.0000	7.6376	49.9435	0.0652	0.2490	0.0000	0.0000	0.0000
1.2374	0.0000	2.1166	51.9948	0.0794	0.2634	0.0000	0.0000	0.0000
1.2770	0.0000	4.0686	55.9840	0.1070	0.2904	0.0000	0.0000	0.0000
1.2077	0.0000	16.0789	71.9559	0.2173	0.4017	0.0000	0.0000	0.0000
1.2029	0.0000	0.0258	71.7644	0.2160	0.3814	0.0000	0.0000	0.0000
1.2492	0.0000	0.0257	71.5742	0.2146	0.3607	0.0000	0.0000	0.0000
1.1992	0.0000	0.0256	71.3851	0.2133	0.3437	0.0000	0.0000	0.0000
1.2156	0.0000	4.5310	75.7028	0.2432	0.4283	0.0000	0.0000	0.0000

(c)

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

## 6. Restauración y conservación de humedales altoandinos

### Uso de la interfaz

La **Figura 28** muestra la pestaña **Entradas** para la Calculadora de Beneficios de restauración y conservación de humedales altoandinos. Aquí se ingresan los parámetros para las condiciones del sitio comunes en todos los escenarios. Aquí también se definen las características de dos tipos de humedales: profundidad máxima del humedal ( $y_{wl}$ ), conductividad hidráulica en el humedal ( $K_{sat,el}$ ), profundidad inicial de agua en el humedal ( $y_o$ ), capacidad de campo del suelo del humedal ( $f_{cwl}$ ), punto de marchitez del suelo del humedal ( $w_{pwl}$ ), albedo del humedal ( $\alpha_{wl}$ ) y recarga ( $r_a$ ) (aporte de agua subterránea). Además, se ingresan los costos de implementación por recuperación del humedal (USD). Adicionalmente, se ingresan las características del acuífero que alimenta al humedal, incluyendo: rendimiento del acuífero ( $Y_a$ ) y conductividad hidráulica ( $K_{sat,a}$ ).

**Figura 28.** Pestaña Entradas en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Humedales.

Entradas			
<b>Coberturas de suelo</b>			
	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>
Número de curva $CN$ (sin unidades)	81	73	67
Índice de área foliar $LAI$ ( $m^2/m^2$ )	1.5	2	1.5
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.042	0.013	0.008
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.18	0.16	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.8	0.7	0.6
<b>Costos de cambio de cobertura</b>			
	<b>Cobertura 1</b>	<b>Cobertura 2</b>	<b>Cobertura 3</b>
Costos de vegetación (USD/ha)	50	100	200
<b>Características de los humedales</b>			
	<b>Humedal 1</b>	<b>Humedal 2</b>	
Profundidad máxima del humedal $y_w$ (m)	0.3	0.15	
Conductividad hidráulica en el humedal $K_{sat,w}$ (mm/día)	3	3	
Profundidad de agua inicial en el humedal $y_o$ (m)	0	0	
Capacidad de campo del suelo del humedal $fc_w$ (mm/mm)	0.39	0.39	
Punto de marchitez del suelo del humedal $wp_w$ (mm/mm)	0.275	0.275	
Albedo del humedal $\alpha_w$ (fracción)	0.2	0.2	
Coefficiente de ET del humedal $K_{c,w}$ (adimensional)	0.4	0.4	
Recarga $r_o$ ( $m^3/m^3$ ) (aporte de agua subterránea)	0	0	
<b>Costos de recuperación del humedal</b>			
	<b>Humedal 1</b>	<b>Humedal 2</b>	
Costos de recuperación del humedal (USD/ha)	600	300	
<b>Características del sitio</b>			
Altitud (m snm)	2700		
Latitud (grados)	-14	(+) Norte	(-) Sur
Pendiente $s$ (m/m)	0.1		
<b>Características del suelo</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Profundidad del suelo (mm)	150	75 – 1000	150
Capacidad de campo $fc$ (mm/mm)	0.325	0 – 1	0.27
Punto de marchitez $wp$ (mm/mm)	0.175	0 – 1	0.17
Factor $K$ de USLE (adimensional)	0.3	0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $\tau_i$ (día)	50	1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $\tau_b$ (día)	100	20 – 100	70
<b>Coefficientes del modelo</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Coefficiente de nubosidad $c$	0.3	0.1 – 0.8	0.5
Ajuste factor USLE $K$	3.39	1 – 10	4.37
<b>Características del acuífero*</b>			
	<b>Rango</b>	<b>Referencia</b>	
Rendimiento del acuífero $Y_o$ (mm/mm)	0.15	0 – 1	0.15
Conductividad hidráulica $K_{sat,o}$ (mm/día)	30	0.305 – 305	35
<b>Umbral de análisis de eventos extremos</b>			
	<b>Valor ref.</b>	<b>Referencia</b>	
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q,alto}$ (mm)	2.4000	2.3920	3 veces la media
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q,bajo}$ (mm)	0.2500	0.2513	Percentil 10% ( $Q_{90}$ )
Umbral alto de sedimentos a analizar $UA_{alto}$ (ton/ha)	0.0010	0.0013	Percentil 95% ( $A_5$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $UA_{bajo}$ (ton/ha)	0.0001	0.0003	50% de la media
<b>Calibración</b>			
<b>Indicadores de desempeño</b>			
	<b>Indicador</b>	<b>Umbral</b>	<b>Aceptabilidad</b>
Periodo de calentamiento (días)		60	
NSE	0.98	0.5	SI
RMSE (mm)	0.09	0.4	SI
RSR	0.15	0.7	SI
PBIAS (%)	2%	25%	SI
KGE	0.89	0.5	SI
OF	0.21	1.10	SI

Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Escenarios** (Figura 29), los escenarios se configuran combinando las coberturas de vegetación ingresadas en la pestaña **Entradas**. Esto se puede interpretar como hectáreas de extensión de terreno o como porcentaje de cobertura. Adicionalmente, aquí se pueden ingresar las áreas de humedales a evaluar. La extensión del humedal se considera como parte del total del área analizada. Los valores totales de las áreas en los escenarios deben coincidir.

Para la metodología de conservación de humedales, se pueden configurar escenarios que representen distintos porcentajes de coberturas, combinados con escenarios con humedales degradados, recuperados o sin humedales, de diferente área superficial, profundidad y propiedades de suelos, o características de permeabilidad, así como con aportes de agua subterránea o con irrigación o drenaje artificial.

**Figura 29.** Pestaña Escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Humedales.  
Fuente: *Elaboración propia.*

Escenarios			
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Área de Cobertura 1 (ha)	30	25	25
Área de Cobertura 2 (ha)	15	15	10
Área de Cobertura 3 (ha)	5	5	5
Área del humedal $A_w$ (ha)		5	10
Área de contribución al humedal $A_c$ (ha)		45.00	40.00
Total de área considerada (ha)	50.00	50.00	50.00
Validación		SI	SI
Escenarios	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de curva CN (sin unidades)	77.20	76.78	77.25
Índice de área foliar LAI ( $m^2/m^2$ )	1.65	1.67	1.63
Factor C de USLE (adimensional)	0.03	0.03	0.03
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.17	0.17	0.18
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.75	0.74	0.75

Fuente: *Elaboración propia.*

La **Figura 30** muestra un ejemplo de la pestaña **Cálculos** con los resultados de balance hídrico para un escenario de construcción de qochas.

**Figura 30.** Pestaña Cálculos de escenarios en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Humedales.

Escenario I								
Día	Evapotranspiración potencial - $ET_p$ (mm/día)	Evapotranspiración antes del humedal - $ET$ (mm/día)	Escurrentía pendiente arriba - $q_o$ (mm)	Percolación antes del humedal - $p$ (mm)	Balace de agua - $R_s$ (mm)	Interflujo - $q_i$ (mm)	Altura del nivel freático - $h$ (m)	Flujo de agua subterránea - $q_{gw}$ (mm)
0					48.7500	0.3098	0.0000	0.0000
1	2.1820	1.3686	0.0000	0.2000	47.0717	0.2867	0.0000	0.0000
2	2.0264	1.2710	0.0000	0.0000	45.5140	0.2652	0.0000	0.0000
3	2.0049	1.2575	0.0000	0.0000	43.9914	0.2443	0.0000	0.0000
4	1.9779	1.2406	0.0000	0.0000	43.6066	0.2390	0.0000	0.0000
5	2.1282	1.3348	0.0000	0.0000	44.6328	0.2531	0.0000	0.0000
6	2.1281	1.3347	0.0000	0.0000	43.3450	0.2354	0.0000	0.0000
7	2.1226	1.3313	0.0825	0.9125	47.1833	0.2882	0.0000	0.0000
8	2.0689	1.2976	0.4016	7.6318	47.1642	0.2879	0.0000	0.0000
9	2.0365	1.2773	0.0000	2.0142	47.1847	0.2882	0.0000	0.0000
10	2.1008	1.3176	0.0394	3.9954	47.1442	0.2877	0.0000	0.0000
11	1.9879	1.2468	3.0996	16.1946	47.2155	0.2886	0.0000	0.0000
12	1.9716	1.2366	0.0000	0.0000	45.6903	0.2676	0.0000	0.0000
13	2.0465	1.2836	0.0000	0.0000	44.1391	0.2463	0.0000	0.0000
14	1.9657	1.2329	0.0000	0.0000	42.8599	0.2287	0.0000	0.0000
15	1.9923	1.2496	0.5311	4.0788	47.2717	0.2894	0.0000	0.0000

(a)

Escenario I								
Ingreso de escurrentía - $W_{qo}$ (mm)	Ingreso de agua subterránea - $W_{gw}$ (mm)	Ingreso de irrigación - $W_{in}$ (mm)	Salida por filtración - $W_s$ (mm)	Evapotranspiración potencial del humedal - $ET_{p,wf}$ (mm)	Salida por evapotranspiración - $W_{ET}$ (mm)	Salida por drenaje del humedal - $V_{wd}$ (mm)	Salida por saturación del humedal - $V_{out}$ (mm)	Almacenamiento total en el humedal - $W_{wf}$ (mm)
0.0000	0.0000	0.0000	0.0204	2.0849	2.0849	0.0000	0.0000	58.5000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.9363	1.9363	0.0000	0.0000	56.5947
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.9157	1.9157	0.0000	0.0000	54.6584
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.8900	1.8900	0.0000	0.0000	52.7426
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0335	2.0335	0.0000	0.0000	51.9526
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0334	2.0334	0.0000	0.0000	52.5191
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0334	2.0334	0.0000	0.0000	50.7858
0.7423	0.0000	0.0000	0.0000	2.0282	2.0282	0.0000	0.0000	50.7858
3.6141	0.0000	0.0000	0.8507	1.9768	1.9768	0.0000	0.0000	55.8999
0.0000	0.0000	0.0000	0.8979	1.9459	1.9459	0.0000	0.0000	66.2865
0.3543	0.0000	0.0000	1.0733	2.0073	2.0073	0.0000	0.0000	67.0426
27.8963	0.0000	0.0000	2.2715	1.8995	1.8995	0.0000	0.0000	69.9163
0.0000	0.0000	0.0000	2.2175	1.8839	1.8839	0.0000	0.0000	114.5417
0.0000	0.0000	0.0000	2.1583	1.9555	1.9555	0.0000	0.0000	110.4403
0.0000	0.0000	0.0000	2.0953	1.8784	1.8784	0.0000	0.0000	106.3266
4.7800	0.0000	0.0000	2.2606	1.9037	1.9037	0.0000	0.0000	102.5529
								113.6686

(b)

Escenario I								
Evapotranspiración después del humedal - $ET_{wf}$ (mm/día)	Escurrentía después del humedal - $q_{o,wf}$ (mm)	Percolación después del humedal - $p_{wf}$ (mm)	Reservorio subsuperficial - $R_b$ (mm)	Caudal base - $q_b$ (mm)	Caudal simulado - $Q_{sim}$ (mm)	Factor R de USLE - $R_{UM}$ (MJ-mm/ha-h)	Pérdida de suelo - $A$ (t/ha)	Concentración de sólidos - $c_{sim}$ (g/m <sup>3</sup> )
			48.7500	0.0000				
1.4402	0.0000	0.1820	48.9320	0.0013	0.2592	0.0000	0.0000	0.0000
1.3375	0.0000	0.0000	48.9308	0.0012	0.2399	0.0000	0.0000	0.0000
1.3233	0.0000	0.0000	48.9295	0.0012	0.2211	0.0000	0.0000	0.0000
1.3055	0.0000	0.0000	48.9283	0.0012	0.2163	0.0000	0.0000	0.0000
1.4047	0.0000	0.0000	48.9271	0.0012	0.2290	0.0000	0.0000	0.0000
1.4046	0.0000	0.0000	48.9258	0.0012	0.2130	0.0000	0.0000	0.0000
1.4010	0.0000	0.8212	49.7459	0.0069	0.2663	0.0000	0.0000	0.0000
1.3655	0.0000	6.9536	56.6926	0.0549	0.3140	0.0000	0.0000	0.0000
1.3442	0.0000	1.9026	58.5403	0.0676	0.3270	0.0000	0.0000	0.0000
1.3866	0.0000	3.7032	62.1759	0.0927	0.3516	0.0000	0.0000	0.0000
1.3121	0.0000	14.8023	76.8854	0.1943	0.4541	0.0000	0.0000	0.0000
1.3013	0.0000	0.2217	76.9128	0.1945	0.4354	0.0000	0.0000	0.0000
1.3508	0.0000	0.2158	76.9341	0.1947	0.4163	0.0000	0.0000	0.0000
1.2975	0.0000	0.2095	76.9490	0.1948	0.4006	0.0000	0.0000	0.0000
1.3150	0.0000	3.8970	80.6511	0.2204	0.4808	0.0000	0.0000	0.0000

(c)

Fuente: Elaboración propia.



Foto: Ana Castañeda Cano

## 7. Combinación de diferentes intervenciones

### Uso de la interfaz

La **Figura 31** muestra la pestaña **Entradas** para la calculadora de beneficios de la combinación de diferentes intervenciones sobre la infraestructura natural. Aquí se ingresan los parámetros para las condiciones del sitio comunes en todos los escenarios, incluyendo características del sitio, características del suelo, características del acuífero, coeficientes del modelo y umbrales de análisis de eventos extremos. Aquí también se definen las características de las intervenciones sobre la infraestructura natural que se desean modelar, incluyendo cambios de cobertura del suelo (hasta cinco tipos de coberturas), zanjas de infiltración, humedales altoandinos, amunas y qochas.

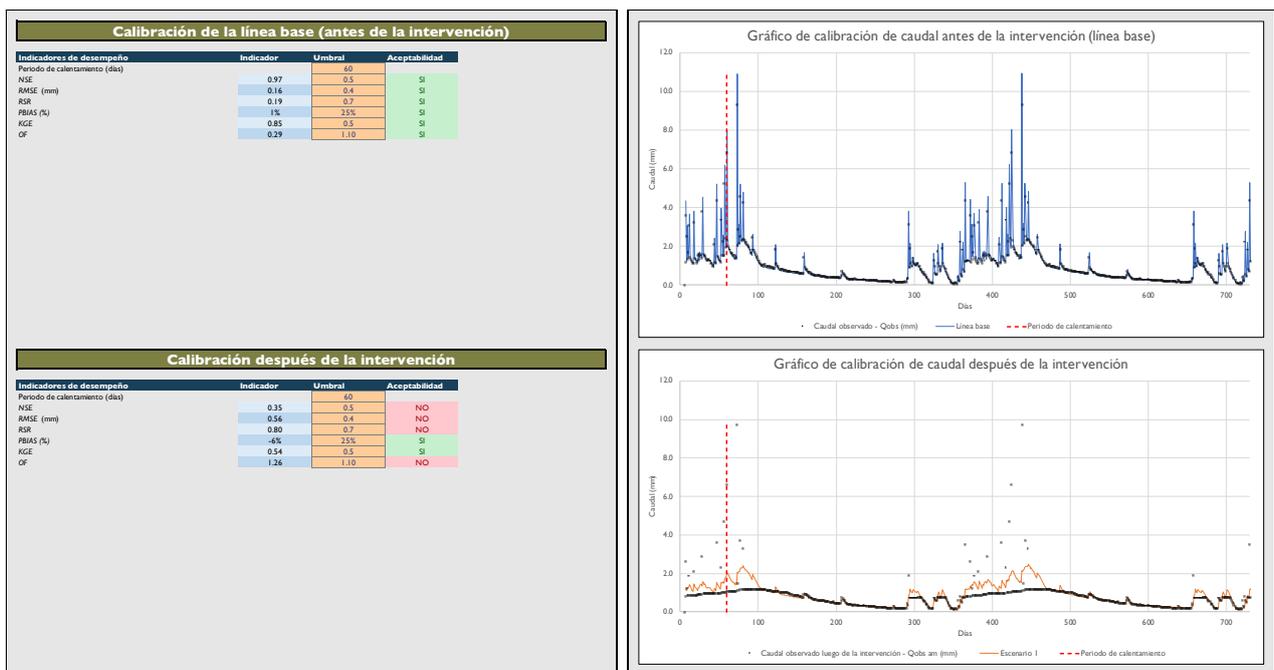
**Figura 31.** Pestaña Entradas en la calculadora de beneficios SUPERCUBHIC 2.0 – Integral mostrando las opciones de ingreso de datos de entrada.

Entradas				
Parámetros del sitio de proyecto				
<b>Características del sitio</b>				
Altitud (m snm)	3400			
Latitud (grados)	-13.5	(+) Norte	(-) Sur	
Pendiente s (n/m)	0.1			
<b>Características del suelo</b>				
Profundidad del suelo (mm)	150	Rango	75 – 1000	Referencia
Capacidad de campo $f_c$ (mm/mm)	0.325		0 – 1	150
Punto de marchitez $w_p$ (mm/mm)	0.075		0 – 1	0.3
Factor K de USLE (adimensional)	0.3		0.1 – 0.5	0.3
Tiempo de residencia del interflujo $t_i$ (día)	20		1 – 50	20
Tiempo de residencia del caudal base $t_{ib}$ (día)	70		20 – 100	70
<b>Características del acuífero</b>				
Tiempo de residencia medio del agua infiltrada $\tau_{am}$ (día)	45	Rango	15 – 250	Referencia
Percolación profunda al acuífero $r_a$ (mm/día)	1		0.305 – 305	45
Área de pampa de infiltración $A_i$ (ha)	12			1
Área de percolación profunda $A_p$ (ha)	30			
Rendimiento del acuífero $Y_a$ (mm/mm)	0.15		0 – 1	0.15
Conductividad hidráulica $K_{ac}$ (mm/día)	35		0.305 – 305	35
*El tiempo de residencia medio (días) del agua infiltrada por la amuna puede considerarse similar al del caudal base o al del interflujo.				
**Estos valores afectan las entradas de agua subterránea al humedal y a la qocha. Esto es opcional. Si desea incluir el agua subterránea, cambie el input de recarga a un valor entre 0 y 1. La recarga describe la fracción del acuífero poco profundo del área de aporte que contribuye al humedal o a la qocha.				
<b>Coefficientes del modelo</b>				
Coefficiente de nubosidad c	0.5	Rango	0.1 – 0.8	Referencia
Ajuste factor USLE K	3.39		1 – 10	0.3
<b>Umbral de análisis de eventos extremos</b>				
Umbral alto de caudal a analizar $U_{Q_{100}}$ (mm)	3.0000	Valor ref.	2.9549	Referencia
Umbral bajo de caudal a analizar $U_{Q_{10}}$ (mm)	0.2150		0.2158	3 veces la media
Umbral alto de sedimentos a analizar $UA_{100}$ (ton/ha)	0.0100		0.0202	Percentil 10% ( $Q_{10}$ )
Umbral bajo de sedimentos a analizar $UA_{10}$ (ton/ha)	0.0015		0.0028	Percentil 95% ( $A_5$ )
50% de la media				
Cambios de cobertura del suelo				
<b>Coberturas del suelo</b>				
Número de curva CN (sin unidades)	Pastos degr.	Bosque Tipo 1	Bosque Tipo 2	Pastos recup.
Índice de área foliar LAI ( $m^2/m^2$ )	80	62	49	75
Factor C de USLE (adimensional)	1	1.25	1.5	1.5
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.1	0.05	0.008	0.05
Coefficiente de ET de vegetación $K_v$ (adimensional)	0.17	0.12	0.11	0.18
	1	0.8	1.2	0.7
				0.6
<b>Costos de cambio de cobertura</b>				
Costos de vegetación (USD/ha)	Pastos degr.	Bosque Tipo 1	Bosque Tipo 2	Pastos recup.
	50	150	200	100
				125
Zanjas de infiltración				
<b>Características de las zanjas</b>				
Longitud pendiente arriba L (m)	Zanjas 1	Zanjas 2		
Ancho superior de la zanja T (cm)	10	10		
Ancho del fondo de la zanja b (cm)	20	20		
Profundidad de la zanja y (cm)	15	15		
	15	15		
*Reemplace por cero si no hay zanjas.				
<b>Costos de implementación de las zanjas</b>				
Costos de remoción de vegetación (USD/m <sup>2</sup> )	Zanjas 1	Zanjas 2		
Costos de excavación (USD/m <sup>2</sup> )	1	1		
	3	3		
Humedales altoandinos				
<b>Características de los humedales</b>				
Profundidad máxima del humedal $y_m$ (m)	Humedal 1	Humedal 2		
Conductividad hidráulica en el humedal $K_{ac}$ (mm/día)	0.15	0.3		
Profundidad de agua inicial en el humedal $y_a$ (m)	3	3		
Capacidad de campo del suelo del humedal $f_{c_w}$ (mm/mm)	0	0		
Punto de marchitez del suelo del humedal $w_{p_w}$ (mm/mm)	0.39	0.39		
Albedo del humedal $\alpha_w$ (fracción)	0.275	0.275		
Coefficiente de ET del humedal $K_{ev}$ (adimensional)	0.2	0.2		
Recarga $r_a$ ( $m^3/m^3$ ) (aporte de agua subterránea)	0.4	0.4		
	0	0		
*En la Hoja Escenarios, reemplace el área de humedal por cero si no existe.				
<b>Costos de recuperación del humedal</b>				
Costos de recuperación del humedal (USD/ha)	Humedal 1	Humedal 2		
	600	300		
Amunas				
<b>Características de las amunas</b>				
Ancho superior del canal de amuna T (cm)	Amuna 1	Amuna 2		
Ancho del fondo del canal de amuna b (cm)	0	25		
Altura del canal de amuna y (cm)	20	25		
Rugosidad n de Chézy del canal de amuna (adimensional)	30	25		
Altitud de la bocanota del canal de amuna $H_b$ (m snm)	0.025	0.013		
Altitud del final del canal de amuna $H_f$ (m snm)	3300	3300		
Longitud del canal de amuna $L_m$ (m)	3250	3250		
Caudal ecológico mínimo en el cauce $Q_{ec}$ (l/s)	3000	3000		
Porcentaje de agua que vuelve inmediatamente al cauce $F_{re}$ (%)	30	30		
	25%	0%		
*Reemplace por cero si no hay amunas.				
<b>Costos de implementación de las amunas</b>				
Costos de remoción de vegetación (USD/m <sup>2</sup> )	Amuna 1	Amuna 2		
Costos de excavación (USD/m <sup>2</sup> )	1	1		
Costos de impermeabilización (USD/m <sup>2</sup> )	6	6		
	0	2		
Qochas				
<b>Características de las qochas</b>				
Altura máxima de agua en la qocha $y_m$ (m)	Qochas 1	Qochas 2		
Conductividad hidráulica en la qocha $K_{ac}$ (mm/día)	1	4		
Altura inicial de agua en la qocha $y_a$ (m)	4	4		
Recarga $r_a$ ( $m^3/m^3$ ) (aporte de agua subterránea)	0	0		
Uso de agua directo de la qocha $Q_{dir}$ ( $m^3/día$ )	0	0		
	1	1		
*En la Hoja Escenarios, reemplace el área de la qocha por cero si no existe.				
<b>Costos de implementación de las qochas</b>				
Costos de remoción de vegetación (USD/m <sup>2</sup> )	Qochas 1	Qochas 2		
Costos de excavación (USD/m <sup>2</sup> )	0.25	0.25		
	1	1		

Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Entradas** también se puede calibrar el modelo hidrológico para el escenario de línea base (antes de las intervenciones) y para el escenario I (después de las intervenciones) (**Figura 32**) utilizando los datos de caudal ingresados en la pestaña **Observaciones**.

**Figura 32.** Pestaña Entradas en la calculadora de beneficios SUPERCUBHIC 2.0 – Integral mostrando las opciones de calibración.



Fuente: Elaboración propia.

En la pestaña **Escenarios** (**Figura 33**), los escenarios se configuran combinando las coberturas de vegetación ingresadas en la pestaña **Entradas** (hasta cinco tipos diferentes). Esto se puede interpretar como ha de extensión de terreno o como % de cobertura. Adicionalmente, aquí se pueden ingresar y observar datos del área bruta cubierta por zanjas de infiltración, área de humedales, área de qochas, y las áreas de contribución y totales en cada intervención. También se pueden observar los cálculos de las características hidráulicas de los canales de amunas definidos en el ingreso de datos de entrada. Los escenarios que se comparan pueden ser casos de proyectos con diversas combinaciones de intervenciones diferentes, con distintas características cada una.

**Figura 33.** Pestaña Escenarios en la calculadora de beneficios SUPERCUBHIC 2.0 – Integral.

<b>Escenarios</b>			
<b>Escenarios</b>	<b>Línea base</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Área de Pastos degr. (ha)	200	170	35
Área de Bosque Tipo 1 (ha)	25	25	5
Área de Bosque Tipo 2 (ha)	0	0	100
Área de Pastos recup. (ha)	25	25	5
Área de Patos conserv. (ha)	0	0	75
Área bruta total cubierta por las zanjas de infiltración $A_z$ (ha)		50	0
Validación (área de zanjas menor que área total)		SI	SI
Área de contribución al humedal $A_c$ (ha)		220.00	220.00
Área de humedal $A_w$ (ha)		30	30
Validación (áreas iguales)		SI	SI
Área de contribución a la qocha $A_c$ (ha)	250.00	250.00	250.00
Área de la qocha $A_{qc}$ (m <sup>2</sup> )		20000	0
Área equivalente de la qocha (ha)		2.0000	0.0000
Total de área considerada (ha)		252.00	250.00
<b>Parámetros combinados de los escenarios</b>	<b>Línea base</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Número de curva $CN$ (sin unidades)	77.70	68.10	53.64
Índice de área foliar $LAI$ (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	1.08	0.96	1.40
Factor $C$ de USLE (adimensional)	0.09	0.08	0.02
Albedo $\alpha$ (fracción)	0.17	0.15	0.13
Coefficiente de ET de vegetación $K_c$ (adimensional)	0.95	0.83	0.83
<b>Características de las amunas</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>	
Inclinación de las paredes del canal de amuna $z$	-0.333	0.000	
Área de sección transversal del canal de amuna $A_{am}$ (m <sup>2</sup> )	0.030	0.063	
Perímetro mojado $P_{am}$ (m)	0.832	0.750	
Radio hidráulico $R_h$ (m)	0.036	0.083	
Pendiente del fondo del canal $S_o$ (m/m)	0.02	0.02	
Coefficiente Chézy $C$ (m <sup>1/2</sup> /s)	15.61	49.03	
Velocidad del agua máximo en el canal de amuna $v_{max}$ (m/s)	0.38	1.83	
Caudal máximo en el canal de amuna $Q_{max}$ (l/s)	11.48	114.20	
Volumen equivalente máximo en el canal de amuna $q_{max}$ (mm/día)	0.40	3.95	
Volumen equivalente mínimo ecológico en el canal de amuna $q_{min}$ (mm/día)	1.0368	1.0368	

Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 34** muestra un ejemplo de la pestaña **Escenario I** con los resultados de balance hídrico para un escenario de combinación de diferentes intervenciones.

**Figura 34.** Pestaña Escenario I de cálculos de escenarios en la calculadora de beneficios SUPERCUBHIC 2.0 – Integral.

Escenario I												
Día	Evapotran spiración potencial - ET <sub>p</sub> (mm/día)	Evapotran spiración real pendiente arriba - q <sub>o</sub> ET (mm/día)	Escorrentí a pendiente arriba - q <sub>o</sub> (mm)	Ingreso de escorrentí a hacia la zanja - V <sub>qo</sub> (m <sup>3</sup> )	Ingreso de lluvia hacia la zanja - V <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> )	Pérdida por evaporació n de la zanja - V <sub>ET</sub> (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua en la zanja - V <sub>z2</sub> (m <sup>3</sup> )	Escorrentí a después de la intercepci ón de la zanja - q <sub>oz</sub> (mm)	Evapotran spiración después de las zanjas - ET <sub>z</sub> (mm/día)	Percolació n antes del humedal - p (mm)	Balance de agua - R <sub>z</sub> (mm)	Interflujo antes de la amuna - q <sub>i</sub> (mm)
0											48.7500	1.2774
1	4.3906	2.1466	1.5041	3760.3603	201.0000	43.9059	3917.4544	1.0523	2.1642	19.0477	45.3084	1.1602
2	4.3770	2.1400	0.0000	0.0000	8.0000	43.7698	0.0000	0.0000	2.1575	0.0000	42.7908	1.0744
3	4.4497	2.1755	0.7097	1774.2824	155.0000	44.4965	1884.7859	0.2392	2.1933	9.3016	45.4823	1.1661
4	4.4179	2.1600	0.0000	0.0000	23.0000	44.1787	0.0000	0.0000	2.1776	0.0000	44.4386	1.1305
5	4.3770	2.1400	0.1087	271.7375	96.0000	43.7699	323.9676	0.0000	2.1575	5.2886	45.4620	1.1654
6	4.3497	2.1266	0.9555	2388.8036	171.0000	43.4971	2516.3065	0.4918	2.1440	13.3202	45.4406	1.1647
7	4.3815	2.1421	0.0000	0.0000	7.0000	43.8146	0.0000	0.0000	2.1597	0.0000	42.8163	1.0753
8	4.4177	2.1599	0.0000	0.0000	0.0000	44.1772	0.0000	0.0000	2.1775	0.0000	39.5634	0.9645
9	4.4085	2.1554	0.0000	0.0000	0.0000	44.0854	0.0000	0.0000	2.1730	0.0000	36.4260	0.8576
10	4.4130	2.1575	0.0000	0.0000	1.0000	44.1296	0.0000	0.0000	2.1752	0.0000	33.4932	0.7577
11	4.3311	2.1175	0.0000	0.0000	29.0000	43.3105	0.0000	0.0000	2.1348	0.0000	33.5007	0.7579
12	4.2490	2.0774	1.0562	2640.6135	177.0000	42.4905	2775.1230	0.5953	2.0944	1.8553	45.8977	1.1802
13	4.3851	2.1439	0.0000	0.0000	4.0000	43.8512	0.0000	0.0000	2.1615	0.0000	42.9559	1.0800
14	4.3758	2.1394	0.0000	0.0000	4.0000	43.7575	0.0000	0.0000	2.1569	0.0000	40.1191	0.9834
15	4.3709	2.1370	0.0000	0.0000	5.0000	43.7088	0.0000	0.0000	2.1545	0.0000	37.4812	0.8935

(a)

Altura del nivel freático - h (m)	Flujo de agua subterrá nea - q <sub>ov</sub> (mm)	Ingreso de escorrentí a - W <sub>qo</sub> (mm)	Ingreso de agua subterrá nea - W <sub>gv</sub> (mm)	Ingreso de irrigación - W <sub>in</sub> (mm)	Salida por filtración - W <sub>f</sub> (mm)	Evapotran spiración potencial del humedal - ET <sub>p,hd</sub> (mm)	Salida por evapotran spiración - W <sub>ET</sub> (mm)	Salida por drenaje del humedal - V <sub>nd</sub> (mm)	Salida por saturación del humedal - V <sub>sat</sub> (mm)	Almacena miento total en el humedal - W <sub>hd</sub> (mm)	Evapotran spiración después del humedal - ET <sub>hd</sub> (mm/día)	Escorrentí a después del humedal - q <sub>hd</sub> (mm)	Percolació n después del humedal - p <sub>hd</sub> (mm)
0.0000	0.0000									58.5000			
0.0000	0.0000	7.7167	0.0000	0.0000	1.6220	4.0127	4.0127	0.0000	0.0000	80.6820	2.3860	0.0000	16.9566
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.4536	4.0001	4.0001	0.0000	0.0000	76.0282	2.3786	0.0000	0.1744
0.0000	0.0000	1.7542	0.0000	0.0000	1.8201	4.0674	4.0674	0.0000	0.0000	87.3949	2.4182	0.0000	8.4038
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.7239	4.0380	4.0380	0.0000	0.0000	83.9331	2.4009	0.0000	0.2069
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.8264	4.0001	4.0001	0.0000	0.0000	87.7065	2.3786	0.0000	4.8732
0.0000	0.0000	3.6067	0.0000	0.0000	2.1265	3.9749	3.9749	0.0000	0.0000	102.3117	2.3637	0.0000	11.9769
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0325	4.0043	4.0043	0.0000	0.0000	96.9750	2.3810	0.0000	0.2439
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.9083	4.0378	4.0378	0.0000	0.0000	91.0289	2.4008	0.0000	0.2290
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.7610	4.0293	4.0293	0.0000	0.0000	85.2386	2.3958	0.0000	0.2113
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.5903	4.0334	4.0334	0.0000	0.0000	79.7149	2.3982	0.0000	0.1908
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.4958	3.9577	3.9577	0.0000	0.0000	77.1615	2.3536	0.0000	0.1795
0.0000	0.0000	4.3659	0.0000	0.0000	1.9573	3.8820	3.8820	0.0000	0.0000	93.3881	2.3089	0.0000	1.8676
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.8328	4.0076	4.0076	0.0000	0.0000	87.9476	2.3830	0.0000	0.2199
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.6846	3.9990	3.9990	0.0000	0.0000	82.6640	2.3779	0.0000	0.2022
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.5156	3.9945	3.9945	0.0000	0.0000	77.6540	2.3753	0.0000	0.1819

(b)

Reservorio subsperfí cial - R <sub>b</sub> (mm)	Caudal base antes de la amuna - q <sub>b</sub> (mm)	Caudal simulado antes de la amuna - Q <sub>sim</sub> (mm)	Caudal desviado hacia la amuna - q <sub>am</sub> (mm)	Retorno inmediato al cauce - L <sub>ret</sub> (mm)	Pérdidas por evaporació n - L <sub>ET</sub> (mm)	Pérdidas por percolació n profunda - L <sub>p</sub> (mm)	Evapotran spiración real después de la amuna - ET <sub>am</sub> (mm/día)	Escorrentí a restante - q <sub>or</sub> (mm)	Caudal desviado restante - q <sub>am2</sub> (mm)	Interflujo restante - q <sub>i,r</sub> (mm)	Caudal desviado restante - q <sub>am3</sub> (mm)	Caudal base restante - q <sub>b,r</sub> (mm)	Caudal desviado restante - q <sub>am4</sub> (mm)	Caudal total restante - Q <sub>sim,r</sub> (mm)
48.7500	0.0000									1.1241	0.0000			
65.7066	0.1671	1.1880	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3860	0.0000	0.0000	1.0209	0.0000	0.1671	0.0000	1.1880
65.7140	0.1672	1.1126	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3786	0.0000	0.0000	0.9455	0.0000	0.1672	0.0000	1.1126
73.9507	0.2483	1.2745	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4182	0.0000	0.0000	1.0261	0.0000	0.2483	0.0000	1.2745
73.9092	0.2479	1.2428	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4009	0.0000	0.0000	0.9949	0.0000	0.2479	0.0000	1.2428
78.5345	0.2935	1.3190	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3786	0.0000	0.0000	1.0255	0.0000	0.2935	0.0000	1.3190
90.2180	0.4086	1.4335	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3637	0.0000	0.0000	1.0249	0.0000	0.4086	0.0000	1.4335
90.0533	0.4070	1.3532	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3810	0.0000	0.0000	0.9462	0.0000	0.4070	0.0000	1.3532
89.8753	0.4052	1.2539	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.4008	0.0000	0.0000	0.8487	0.0000	0.4052	0.0000	1.2539
89.6814	0.4033	1.1580	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3958	0.0000	0.0000	0.7547	0.0000	0.4033	0.0000	1.1580
89.4689	0.4012	1.0680	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3982	0.0000	0.0000	0.6668	0.0000	0.4012	0.0000	1.0680
89.2472	0.3990	1.0660	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3536	0.0000	0.0000	0.6670	0.0000	0.3990	0.0000	1.0660
90.7157	0.4135	1.4521	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3089	0.0000	0.0000	1.0386	0.0000	0.4135	0.0000	1.4521
90.5221	0.4116	1.3620	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3830	0.0000	0.0000	0.9504	0.0000	0.4116	0.0000	1.3620
90.3127	0.4095	1.2749	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3779	0.0000	0.0000	0.8654	0.0000	0.4095	0.0000	1.2749
90.0851	0.4073	1.1936	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.3753	0.0000	0.0000	0.7863	0.0000	0.4073	0.0000	1.1936

(c)

Percolación adicional - $p_{am}$ (mm)	Percolación después de la amuna - $p_2$ (mm)	Reservorio subsuperficial de la amuna - $R_{s2}$ (mm)	Caudal base adicional de la amuna - $q_{bam}$ (mm)	Altura del nivel freático - $h$ (m)	Flujo de agua subterráneo - $q_{sw}$ (mm)	Volumen de escorrentía - $a - V_{qo}$ (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua subterráneo - $ea - V_{gw}$ (m <sup>3</sup> )	Volumen de precipitación - $\phi_n - V_p$ (m <sup>3</sup> )	Volumen de ingreso adicional - $V_{in}$ (m <sup>3</sup> )	Volumen de evaporación - $n - V_{ET}$ (m <sup>3</sup> )	Volumen de filtración - $V_s$ (m <sup>3</sup> )	Uso de agua directo - $V_{wd}$ (m <sup>3</sup> )	Volumen de salida - $V_{out}$ (m <sup>3</sup> )	Volumen total - $V_{tot}$ (m <sup>3</sup> )
0.0000	16.9566	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	402.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.1744	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	16.0000	0.0000	7.6298	12.2814	1.0000	0.0000	396.0888
0.0000	8.4038	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	310.0000	0.0000	7.6910	12.1809	1.0000	0.0000	685.2170
0.0000	0.2069	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	46.0000	0.0000	11.0055	17.5537	1.0000	0.0000	701.6578
0.0000	4.8732	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	192.0000	0.0000	11.0790	17.8334	1.0000	0.0000	863.7454
0.0000	11.9769	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	342.0000	0.0000	12.6473	20.4837	1.0000	0.0000	1171.614
0.0000	0.2439	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	14.0000	0.0552	15.6090	25.1000	1.0000	0.0000	1143.9600
0.0000	0.2290	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	28.7420	15.4876	24.7035	24.7035	1.0000	0.0000	1131.511
0.0000	0.2113	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	15.3436	24.5239	1.0000	0.0000	1090.6440
0.0000	0.1908	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	2.0000	0.0000	14.9866	23.9298	1.0000	0.0000	1052.7270
0.0000	0.1795	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	58.0000	506.4422	14.3696	23.3719	1.0000	0.0000	1578.428
0.0000	1.8676	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	354.0000	0.0000	18.4724	30.6173	1.0000	0.0000	1882.338
0.0000	0.2199	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.0000	0.0000	21.4294	34.4310	1.0000	0.0000	1833.478
0.0000	0.2022	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	8.0000	0.0000	21.0127	33.8325	1.0000	0.0000	1785.632
0.0000	0.1819	48.7500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	10.0000	45.9684	20.6229	33.2414	1.0000	0.0000	1786.737

(d)

Evapotranspiración después de la gocha - $ET_{qc}$ (mm/día)	Escorrentía después de la gocha - $q_{o,qc}$ (mm)	Percolación después de la gocha - $p_{qc}$ (mm)	Reservorio subsuperficial de la gocha - $R_{s2}$ (mm)	Caudal base adicional de la gocha - $q_{bam}$ (mm)	Caudal base después de la intervención - $q_{b2}$ (mm)	Caudal simulado después de la intervención - $Q_{sim2}$ (mm)	Factor R de USLE - $R_{UM}$ (MJ·mm/h a·h)	Pérdida de suelo - $A$ (t/ha)	Concentración de sólidos - $c_{sim}$ (g/m <sup>3</sup> )
			48.7500	0.0000	0.0000				
2.3671	0.0000	16.8221	48.7500	0.0000	0.1671	1.1880	0.0000	0.0000	0.0000
2.3627	0.0000	0.1779	48.7549	0.0000	0.1672	1.1127	0.0000	0.0000	0.0000
2.4020	0.0000	8.3420	48.7597	0.0001	0.2484	1.2746	0.0000	0.0000	0.0000
2.3862	0.0000	0.2122	48.7665	0.0002	0.2481	1.2429	0.0000	0.0000	0.0000
2.3641	0.0000	4.8416	48.7734	0.0002	0.2937	1.3192	0.0000	0.0000	0.0000
2.3500	0.0000	11.8900	48.7813	0.0003	0.4089	1.4338	0.0000	0.0000	0.0000
2.3683	0.0000	0.2519	48.7910	0.0004	0.4074	1.3536	0.0000	0.0000	0.0000
2.3879	0.0000	0.2370	48.8004	0.0005	0.4057	1.2544	0.0000	0.0000	0.0000
2.3829	0.0000	0.2194	48.8096	0.0006	0.4039	1.1586	0.0000	0.0000	0.0000
2.3851	0.0000	0.1988	48.8185	0.0007	0.4019	1.0687	0.0000	0.0000	0.0000
2.3406	0.0000	0.1873	48.8271	0.0008	0.3998	1.0668	0.0000	0.0000	0.0000
2.2979	0.0000	1.8649	48.8385	0.0009	0.4144	1.4530	0.0000	0.0000	0.0000
2.3726	0.0000	0.2319	48.8513	0.0010	0.4126	1.3630	0.0000	0.0000	0.0000
2.3674	0.0000	0.2140	48.8637	0.0011	0.4106	1.2760	0.0000	0.0000	0.0000
2.3646	0.0000	0.1936	48.8758	0.0012	0.4085	1.1948	0.0000	0.0000	0.0000

(e)





## Capítulo 3. Ejemplos de aplicación

---

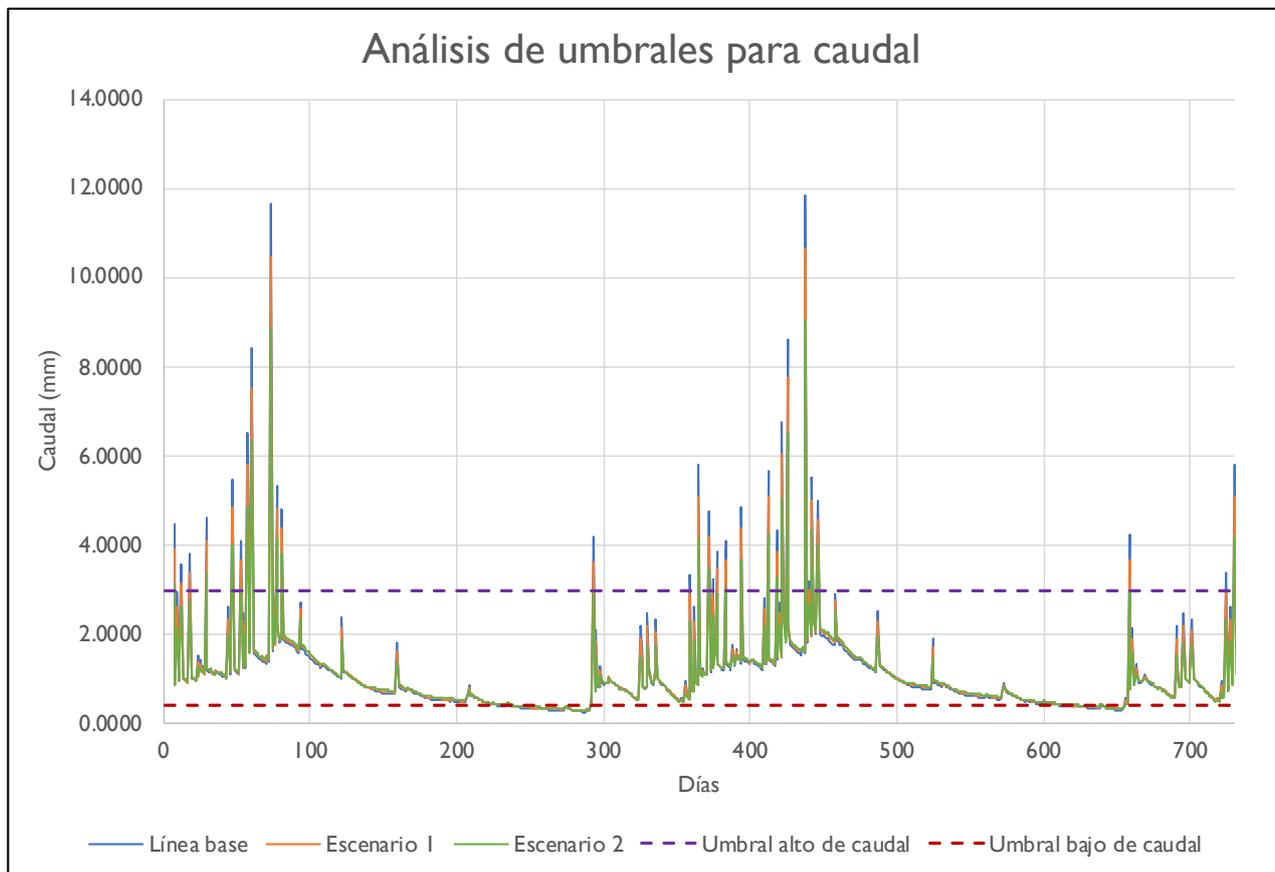
### Ejemplo 1. Conservación y restauración de pastos

Este ejemplo muestra la comparación de un escenario de línea base compuesto por una cobertura de 100 hectáreas de pastos degradados (**Figura 15** y **Figura 16**), frente a dos escenarios de restauración y recuperación. El primer escenario propone la restauración de 50 hectáreas de pastos (**Figura 16**), los cuales tienen un CN más bajo, mayor LAI y menor factor C, para controlar la generación de escorrentía y pérdida de suelos (**Figura 15**). El segundo escenario propone la recuperación y conservación de 50 hectáreas de pastos a un nivel mucho más cercano a su estado natural original (**Figura 16**), es decir, con valores de CN y factor C más favorables y una cobertura más densa, reflejada en un mayor LAI (**Figura 15**).

Los resultados de las simulaciones de caudal (**Figura 31**) muestran que ambos escenarios de restauración de pastos logran controlar las crecidas de caudal producidas por la generación de escorrentía, pero no cambian significativamente el caudal en temporadas de estiaje con respecto a la línea base. El escenario 2 (recuperación y conservación) muestra un control de las crecidas y de la escorrentía mucho más severo que el escenario 2 (restauración). Esto

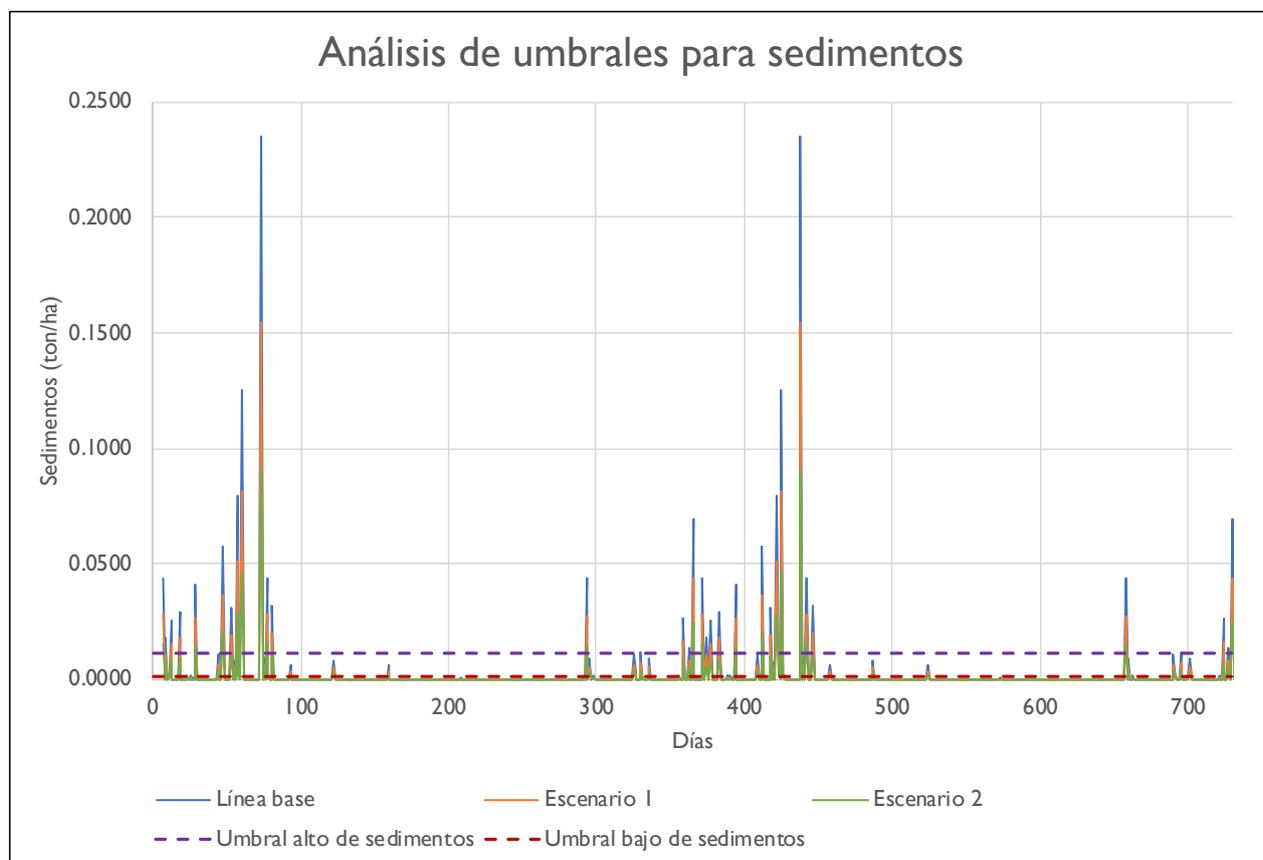
también se ve reflejado en los resultados de las simulaciones de carga de sedimentos (**Figura 32**). Bajo la cobertura de pastos degradados como línea base, la pérdida de suelo que aporta sedimentos al agua es considerable debido a la gran generación de escorrentía superficial. Los escenarios de restauración y recuperación de pastos reducen la generación de escorrentía y, por tanto, de pérdida de suelo y carga de sedimentos.

**Figura 31.** Ejemplo de resultados de caudal simulado utilizando la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Pastizales.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 32.** Ejemplo de resultados de carga de sedimentos utilizando la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Pastizales.



Fuente: Elaboración propia.

Los datos numéricos de salidas y beneficios hidrológicos (**Figura 33**) muestran que, en ambos escenarios de restauración y recuperación de pastos, la evapotranspiración aumenta ligeramente con respecto a los pastos degradados, debido al aumento de la cobertura vegetal y al LAI. El aumento en evapotranspiración en el escenario de restauración es de  $+3.3 \times 1000 \text{ m}^3$ , mientras que en el de recuperación y conservación de pastos es de  $+18.9 \times 1000 \text{ m}^3$ , lo cual se traduce en una reducción de caudal de  $-3.5 \times 1000 \text{ m}^3$  y  $-19.0 \times 1000 \text{ m}^3$ , respectivamente. Sin embargo, la percolación aumenta en  $+12.6 \times 1000 \text{ m}^3$  bajo

restauración de pastos y hasta  $+18.8 \times 1000 \text{ m}^3$  bajo recuperación y conservación. Como resultado, el caudal base aumenta también en  $+12.4 \times 1000 \text{ m}^3$  (bajo restauración) y en  $+18.7 \times 1000 \text{ m}^3$  (bajo recuperación y conservación). En el escenario de restauración de pastos, la escorrentía se reduce en  $-14.3 \times 1000 \text{ m}^3$ , y la carga y concentración de sedimentos en  $-38.1 \text{ ton/año}$  y  $-17.5 \text{ g/m}^3$ , en comparación con el escenario de recuperación y conservación de pastos donde la escorrentía se reduce en  $-32.1 \times 1000 \text{ m}^3$ , y la carga y concentración de sedimentos en  $-67.8 \text{ ton/año}$  y  $-31.9 \text{ g/m}^3$ .

**Figura 33.** Resultados hidrológicos en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Pastizales.

<b>Resultados hidrológicos</b>			
<b>Salidas de variables hidrológicas</b>			
	<b>Línea base</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Precipitación observada (mm)	786.0	786.0	786.0
Evapotranspiración real simulada (mm)	354.1	357.3	373.0
Escorrentía simulada (mm)	81.4	67.1	49.3
Percolación simulada (mm)	223.0	235.5	241.8
Caudal total simulado (mm)	428.6	425.1	409.6
Caudal base simulado (mm)	219.6	232.0	238.3
Generación de sedimentos simulada (ton)	103.6	65.4	35.8
Concentración de sedimentos simulada (g/m <sup>3</sup> )	55.9	38.4	24.0
<b>Análisis de umbrales para eventos extremos</b>			
	<b>Línea base</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Número de días por encima del umbral alto de caudal (día)	16.0	13.0	11.0
Volumen de caudal por encima del umbral alto (mm)	37.2	28.5	17.8
Caudal máximo (mm)	11.8	10.7	9.0
Número de días por debajo del umbral bajo de caudal (día)	39.0	30.0	26.0
Volumen de caudal por debajo del umbral bajo (mm)	144.2	144.9	145.1
Caudal mínimo (mm)	0.3	0.3	0.3
Número de días por encima del umbral alto de sedimentos (día)	19.0	15.0	9.0
Carga de sedimentos por encima del umbral alto (ton)	94.7	57.5	26.7
Carga de sedimentos máxima (ton)	23.5	15.5	9.0
Número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos (día)	332.0	336.0	338.0
Carga de sedimentos por debajo del umbral bajo (ton)	5.8	5.2	4.5
Carga de sedimentos mínima (ton)	0.0	0.0	0.0
<b>Beneficios calculados con respecto a línea base</b>			
	<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Cambio en la evapotranspiración	(x1000 m <sup>3</sup> )	+3.3	+18.9
Cambio en la escorrentía	(x1000 m <sup>3</sup> )	-14.3	-32.1
Cambio en la percolación	(x1000 m <sup>3</sup> )	+12.6	+18.8
Cambio en el caudal total	(x1000 m <sup>3</sup> )	-3.5	-19.0
Cambio en el caudal base	(x1000 m <sup>3</sup> )	+12.4	+18.7
Cambio en la carga de sedimentos	(ton)	-38.1	-67.8
Cambio en la concentración de sedimentos	(g/m <sup>3</sup> )	-17.5	-31.9
<b>Beneficios en eventos extremos con la línea base</b>			
	<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de caudal	(día)	-3.0	-5.0
Cambio en el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	-8.7	-19.4
Cambio en el caudal máximo	(x1000 m <sup>3</sup> )	-1.2	-2.8
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(día)	-9.0	-13.0
Cambio en el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	+0.6	+0.9
Cambio en el caudal mínimo	(x1000 m <sup>3</sup> )	+0.0	+0.0
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(día)	-4.0	-10.0
Cambio en la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(ton)	-37.2	-68.0
Cambio en la carga de sedimentos máxima	(ton)	-8.1	-14.5
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(día)	+4.0	+6.0
Cambio en la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(ton)	-0.6	-1.3
Cambio en la carga de sedimentos mínima	(ton)	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 34.** Resultados económicos en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Pastizales.

<b>Resultados económicos</b>			
<b>Costos de implementación de los escenarios</b>		<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Costos de escenario por cambio de cobertura (USD)		\$5,000.00	\$10,000.00
Otros costos adicionales (USD)		\$0.00	\$0.00
Costo total de implementación (USD)		\$5,000.00	\$10,000.00
<b>Costo-eficiencia de los escenarios</b>		<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1 Escenario 2</b>
Costo-eficiencia para la escorrentía	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$350.63	-\$311.73
Costo-eficiencia para la percolación	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$397.76	+\$531.72
Costo-eficiencia para el caudal total	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$1,447.51	-\$526.69
Costo-eficiencia para el caudal base	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$403.17	+\$534.09
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos	(USD por ton)	-\$131.10	-\$147.51
Costo-eficiencia para la concentración de sedimentos	(USD por g/m <sup>3</sup> )	-\$285.92	-\$313.89
<b>Costo-eficiencia para eventos extremos</b>		<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1 Escenario 2</b>
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de caudal	(USD por día)	-\$1,666.67	-\$2,000.00
Costo-eficiencia para el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$571.89	-\$515.83
Costo-eficiencia para el caudal máximo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$4,256.48	-\$3,557.72
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por día)	-\$555.56	-\$769.23
Costo-eficiencia para el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$7,884.09	+\$10,897.00
Costo-eficiencia para el caudal mínimo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$284,511.45	+\$355,002.67
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(USD por día)	-\$1,250.00	-\$1,000.00
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(USD por ton)	-\$134.29	-\$147.09
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos máxima	(USD por ton)	-\$620.58	-\$689.62
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(USD por día)	+\$1,250.00	+\$1,666.67
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(USD por ton)	-\$7,966.46	-\$7,531.02
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos mínima	(USD por ton)	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Considerando costos de implementación (**Figura 34**) de 100 USD/ha para la restauración de pastos y de 200 USD/ha para la recuperación y conservación de pastos, se determina su costo-eficiencia. A pesar de que los costos de la recuperación integral y posterior conservación de pastos son el doble que aquellos de la restauración, su costo-eficiencia es mejor para la reducción de escorrentía (350.63 frente a 311.73 USD por 1000 m<sup>3</sup>) y comparable para la reducción de carga (131.10 frente a 147.51 USD por ton) y concentración (285.92 frente a 313.89 USD por g/m<sup>3</sup>) de sedimentos. Si bien el aumento en la percolación y en el caudal base son ligeramente menores bajo la restauración de pastos que bajo la recuperación, la restauración es más costo-efectiva (397.76 frente a 531.72 USD por 1000 m<sup>3</sup> para percolación, y 403.17 frente a 534.09 USD por 1000 m<sup>3</sup> para caudal base). Finalmente, es necesario recordar que uno de los efectos negativos producidos por un aumento en la densidad de la

cobertura vegetal es la reducción del caudal total. En ambos casos existe una pérdida de caudal total, la cual llega a ser mucho más costosa (-1 447.51 USD por 1000 m<sup>3</sup>) en el escenario de restauración que en el escenario de recuperación y conservación (-526.69 USD por 1000 m<sup>3</sup>).

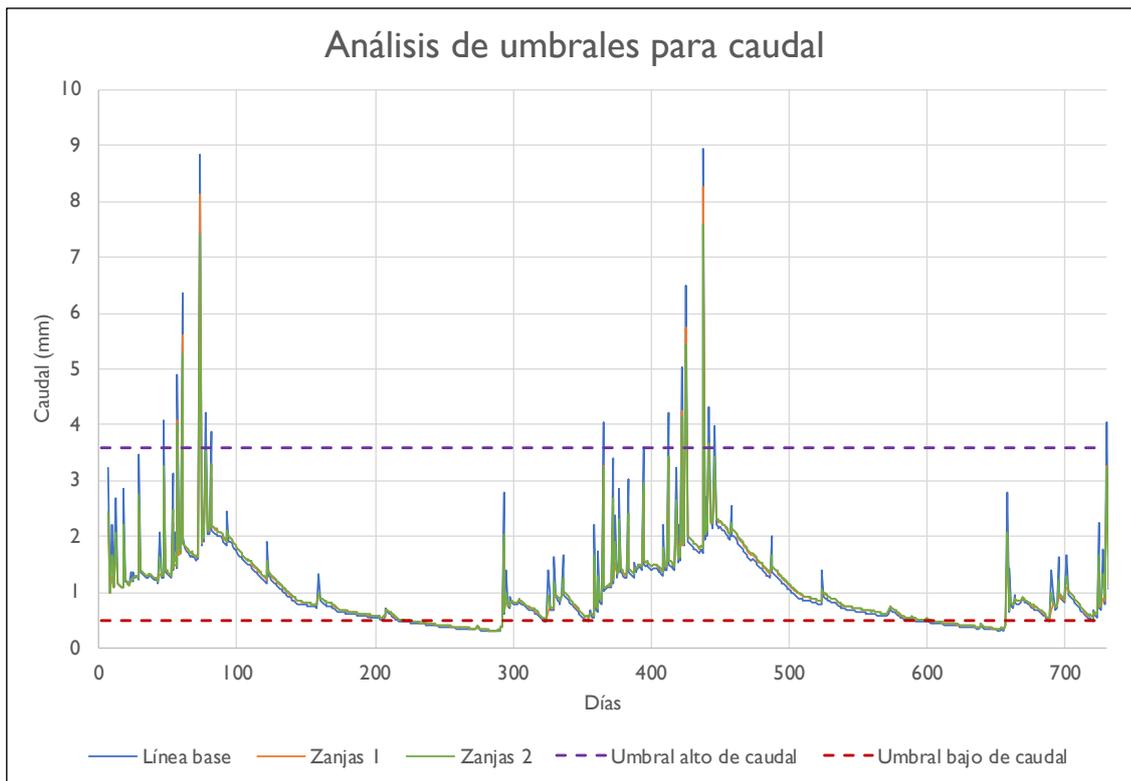
El análisis de umbrales para eventos extremos muestra que el escenario 1 es más efectivo para aumentar los caudales bajos y reducir los eventos extremos de sedimentos, pero es menos efectivo en reducir el caudal máximo y el volumen de agua por encima del umbral de caudal alto que el escenario 2. Esto se traduce de la misma manera en la costo-eficiencia, donde se observa que el escenario 1 es más costo-eficiente en el control de los eventos extremos de sedimentos sobre el umbral alto establecido, mientras que el escenario 2 es más costo-eficiente en el control de los eventos extremos de caudal.

## Ejemplo 2. Implementación de Zanjas de infiltración

Este ejemplo muestra la comparación de un escenario de línea base compuesto por una cobertura de 30 ha de pastizal pastoreado, 10 ha de pastizal degradado y 10 ha de pastizal conservado (**Figura 18** y **Figura 19**), frente a dos escenarios con zanjas de infiltración para reducir la generación de escorrentía y pérdida de suelos. En ambos escenarios, las zanjas de infiltración tienen una longitud pendiente arriba de 10 m, 20 cm de ancho superior, 15 cm de ancho del fondo y 15 cm de profundidad (**Figura 18**). El primer escenario propone mantener las coberturas de suelo actuales e implementar 20 ha de zanjas de infiltración (**Figura 19**), casi la mitad del área de la cuenca. El segundo escenario propone más bien una combinación de recuperación y conservación de 20 ha de pastos, adicionales a las 10 ha de pastos conservados originales e implementar solamente 5 ha de zanjas de infiltración (**Figura 19**). El objetivo de esta evaluación es comparar dos escenarios que tienen costos de implementación similares, pero configuraciones diferentes.

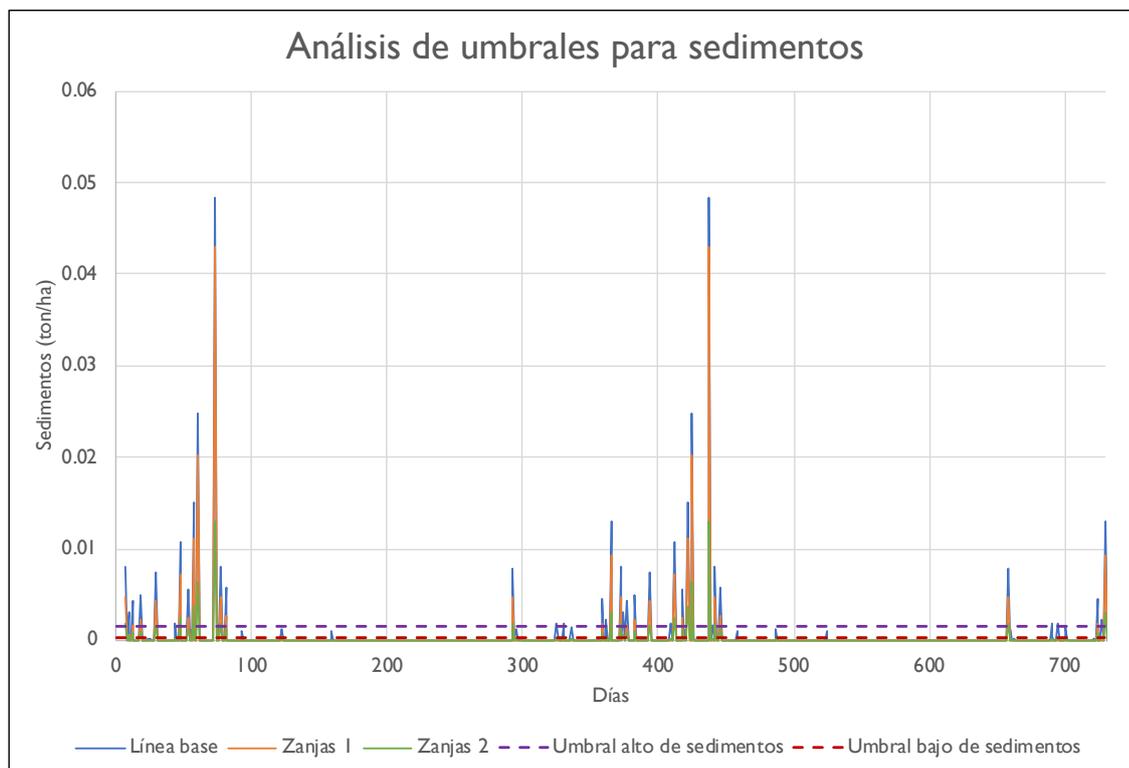
Los resultados de las simulaciones de caudal (**Figura 35**) muestran que ambos escenarios de intervención reducen la escorrentía superficial e incrementan ligeramente la disponibilidad de agua en las temporadas de estiaje. El primer escenario, que considera una intervención más dramática con zanjas de infiltración, reduce los caudales de crecida más que el escenario combinado. En ambos casos, la escorrentía atrapada por las zanjas incrementa el caudal durante los primeros días secos ante la ausencia de lluvias y mantiene caudales ligeramente más altos durante la estación seca. La reducción de escorrentía en ambos escenarios se ve también reflejada en las simulaciones de carga de sedimentos (**Figura 36**). Tanto las zanjas de infiltración cuanto la combinación de zanjas y recuperación y conservación de pastos reducen la pérdida de suelo por erosión, pero el segundo escenario lo hace de una manera más fuerte.

**Figura 35.** Ejemplo de resultados de caudal simulado utilizando la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Zanjas.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 36.** Ejemplo de resultados de carga de sedimentos utilizando la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Zanjas.



Fuente: Elaboración propia.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

Los datos numéricos de salidas y beneficios hidrológicos muestran resultados interesantes (**Figura 37**). En el primer escenario (20 ha de zanjas de infiltración), la evapotranspiración aumenta en  $+3.7 \times 1000 \text{ m}^3$  y el rendimiento hídrico disminuye en  $-0.8 \times 1000 \text{ m}^3$  de caudal total. En contraste, en el escenario combinado (20 ha de recuperación y conservación de pastos + 5 ha zanjas de infiltración), la evapotranspiración disminuye en  $-2.0 \times 1000 \text{ m}^3$  y el rendimiento hídrico aumenta en  $+2.5 \times 1000 \text{ m}^3$  de caudal total. En ambos escenarios, la percolación aumenta ( $+9.5 \times 1000 \text{ m}^3$  en el escenario de solamente zanjas, en comparación a  $+10.4 \times 1000 \text{ m}^3$  en el escenario combinado). De manera similar,

el caudal base aumenta en  $+9.3 \times 1000 \text{ m}^3$  en el escenario de solamente zanjas y en  $+10.1 \times 1000 \text{ m}^3$  en el escenario combinado. La escorrentía se reduce más en el escenario de solamente zanjas ( $11.5 \times 1000 \text{ m}^3$ ) que en el escenario combinado ( $-9.7 \times 1000 \text{ m}^3$ ). Sin embargo, el análisis de pérdida de suelos muestra una tendencia inversa. En el escenario combinado, la carga de sedimentos se reduce en  $-7.4 \text{ ton/año}$  y la concentración en  $-9.9 \text{ g/m}^3$ , en comparación con la línea base. En el escenario de implementación de solamente zanjas de infiltración, si bien la carga y concentración de sedimentos también se reducen con respecto a la línea base, esta reducción es más modesta ( $-3.5 \text{ ton/año}$  y en  $-5.2 \text{ g/m}^3$ ).

**Figura 37.** Resultados hidrológicos en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Zanjas.

<b>Resultados hidrológicos</b>			
<b>Salidas de variables hidrológicas</b>			
	<b>Línea base</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Precipitación observada (mm)	786.0	786.0	786.0
Evapotranspiración real simulada (mm)	379.7	387.2	375.7
Escorrentía simulada (mm)	48.2	25.2	28.7
Percolación simulada (mm)	224.4	243.4	245.2
Caudal total simulado (mm)	404.2	402.5	409.2
Caudal base simulado (mm)	222.3	240.8	242.6
Generación de sedimentos simulada (ton)	9.5	6.0	2.1
Concentración de sedimentos simulada (g/m <sup>3</sup> )	13.1	7.9	3.2
<b>Análisis de umbrales para eventos extremos</b>			
	<b>Línea base</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Número de días por encima del umbral alto de caudal (día)	8.0	3.0	4.0
Volumen de caudal por encima del umbral alto (mm)	11.9	7.5	6.5
Caudal máximo (mm)	9.0	8.3	7.6
Número de días por debajo del umbral bajo de caudal (día)	69.0	56.0	56.0
Volumen de caudal por debajo del umbral bajo (mm)	176.0	177.8	178.0
Caudal mínimo (mm)	0.3	0.3	0.3
Número de días por encima del umbral alto de sedimentos (día)	20.0	14.0	9.0
Carga de sedimentos por encima del umbral alto (ton)	9.0	6.0	1.8
Carga de sedimentos máxima (ton)	2.4	2.1	0.6
Número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos (día)	336.0	350.0	349.0
Carga de sedimentos por debajo del umbral bajo (ton)	0.5	0.2	0.3
Carga de sedimentos mínima (ton)	0.0	0.0	0.0
<b>Beneficios calculados con respecto a línea base</b>			
	<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Cambio en la evapotranspiración	(x1000 m <sup>3</sup> )	+3.7	-2.0
Cambio en la escorrentía	(x1000 m <sup>3</sup> )	-11.5	-9.7
Cambio en la percolación	(x1000 m <sup>3</sup> )	+9.5	+10.4
Cambio en el caudal total	(x1000 m <sup>3</sup> )	-0.8	+2.5
Cambio en el caudal base	(x1000 m <sup>3</sup> )	+9.3	+10.1
Cambio en la carga de sedimentos	(ton)	-3.5	-7.4
Cambio en la concentración de sedimentos	(g/m <sup>3</sup> )	-5.2	-9.9
<b>Beneficios en eventos extremos con la línea base</b>			
	<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de caudal	(día)	-5.0	-4.0
Cambio en el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	-2.2	-2.7
Cambio en el caudal máximo	(x1000 m <sup>3</sup> )	-0.3	-0.7
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(día)	-13.0	-13.0
Cambio en el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	+0.9	+1.0
Cambio en el caudal mínimo	(x1000 m <sup>3</sup> )	+0.0	+0.0
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(día)	-3.0	-5.5
Cambio en la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(ton)	-3.0	-7.2
Cambio en la carga de sedimentos máxima	(ton)	-0.3	-1.8
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(día)	+14.0	+13.0
Cambio en la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(ton)	-0.3	-0.2
Cambio en la carga de sedimentos mínima	(ton)	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 38.** Resultados económicos en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Zanjas.

<b>Resultados económicos</b>			
<b>Costos de implementación de los escenarios</b>		<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Volumen de excavación total de las zanjas (m <sup>3</sup> )		514.71	128.68
Costos de remoción de vegetación en las zanjas (USD)		\$4,000.00	\$1,000.00
Costos de excavación de las zanjas (USD)		\$1,544.12	\$386.03
Costos de escenario por cambio de cobertura (USD)		\$0.00	\$4,000.00
Otros costos adicionales (USD)		\$0.00	\$0.00
Costo total de implementación (USD)		\$5,544.12	\$5,386.03
<b>Costo-eficiencia de los escenarios</b>		<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1 Escenario 2</b>
Costo-eficiencia para la escorrentía	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$482.56	-\$554.16
Costo-eficiencia para la percolación	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$582.99	+\$517.04
Costo-eficiencia para el caudal total	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$6,828.36	+\$2,151.79
Costo-eficiencia para el caudal base	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$598.47	+\$531.34
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos	(USD por ton)	-\$1,587.29	-\$728.71
Costo-eficiencia para la concentración de sedimentos	(USD por g/m <sup>3</sup> )	-\$1,067.65	-\$544.03
<b>Costo-eficiencia para eventos extremos</b>		<b>Unidades</b>	<b>Escenario 1 Escenario 2</b>
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de caudal	(USD por día)	-\$1,108.82	-\$1,346.51
Costo-eficiencia para el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$2,522.99	-\$1,988.38
Costo-eficiencia para el caudal máximo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$16,118.22	-\$7,804.67
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por día)	-\$426.47	-\$414.31
Costo-eficiencia para el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$6,135.12	+\$5,418.37
Costo-eficiencia para el caudal mínimo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$453,967.07	+\$397,606.32
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(USD por día)	-\$1,848.04	-\$979.28
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(USD por ton)	-\$1,851.41	-\$745.06
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos máxima	(USD por ton)	-\$20,656.17	-\$3,047.36
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(USD por día)	+\$396.01	+\$414.31
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(USD por ton)	-\$19,433.61	-\$27,605.55
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos mínima	(USD por ton)	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Los costos de implementación (**Figura 38**) de ambos escenarios son muy similares: USD 5 544 para el escenario de solamente zanjas, frente a USD 5 386 para el escenario combinado. El costo en el segundo es directamente la excavación y construcción de las zanjas de infiltración, mientras que el principal costo en el primer escenario se da por el cambio de cobertura vegetal para la recuperación y conservación de pastos. Sin embargo, la costo-eficiencia de los dos escenarios muestra algunas diferencias importantes. La costo-eficiencia para el aumento de percolación y de caudal base es similar en ambos escenarios (+582.99 USD por 1000 m<sup>3</sup> de percolación y 598.47 USD por 1000 m<sup>3</sup> de caudal base en el escenario de solamente zanjas; frente a +517.04 USD por 1000 m<sup>3</sup> de percolación y 531.34 USD por 1000 m<sup>3</sup> de caudal base en el escenario combinado). Un resultado interesante se da debido a los efectos contrarios de los escenarios sobre el rendimiento hídrico. Al escenario de solamente zanjas se le atribuye una pérdida de -6 828.36 USD por 1000 m<sup>3</sup> de caudal total que se reduce en la cuenca, mientras que el escenario combinado muestra un aumento de caudal total que costaría +2 151.79 USD por 1000 m<sup>3</sup>. Si bien la costo-eficiencia del escenario de solamente zanjas es mejor para la reducción de escorrentía (-482.56 USD por 1000 m<sup>3</sup>) en comparación con el escenario combinado (-554.16 USD por 1000 m<sup>3</sup>), lo inverso sucede para el control de la erosión. La inversión en el escenario combinado se justifica con una costo-eficiencia que es el doble (es decir, cuesta

la mitad: -728.71 USD por ton y -544.03 USD por g/m<sup>3</sup>) que la del escenario de solamente zanjas (-1 067.65 USD por ton y -728.71 USD por g/m<sup>3</sup>).

Estas diferencias en efectividad indican que es posible que la implementación de zanjas de infiltración funcione bien para la reducción de escorrentía y control de la erosión, pero que no necesariamente sea más efectiva que la recuperación y conservación de la vegetación natural. Lo ideal sería configurar experimentos y mediciones en campo de lugares en donde se hayan implementado zanjas de infiltración para cuantificar de manera más precisa su impacto sobre la infiltración, humedad del suelo, percolación y los efectos que pueden tener, tanto positivos como negativos, a escalas de cuenca y de paisaje. Con esta información se pueden también mejorar las conceptualizaciones y ecuaciones de la metodología.

El análisis de umbrales para eventos extremos muestra que ambos escenarios son bastante similares en la regulación de eventos extremos, pero el escenario 2 es ligeramente más efectivo en reducir los caudales y las cargas de sedimentos por encima de los umbrales de control que el escenario 1. Esto se traduce de la misma manera en la costo-eficiencia, donde se observa que el escenario 2 es más costo-eficiente en el control de los eventos extremos que el escenario 1. Es decir, una combinación de cambios de cobertura y zanjas puede ser más costo-eficiente que solamente la implementación de zanjas de infiltración.

### Ejemplo 3. Construcción de qochas

Este ejemplo muestra la comparación de un escenario de línea base compuesto por una cobertura de 20 ha de pastizal degradado, 10 ha de pastizal pastoreado y 5 ha de pastizal conservado (**Figura 25** y **Figura 26**), frente a dos escenarios de construcción y recuperación de qochas. El primer escenario propone la construcción de una qocha

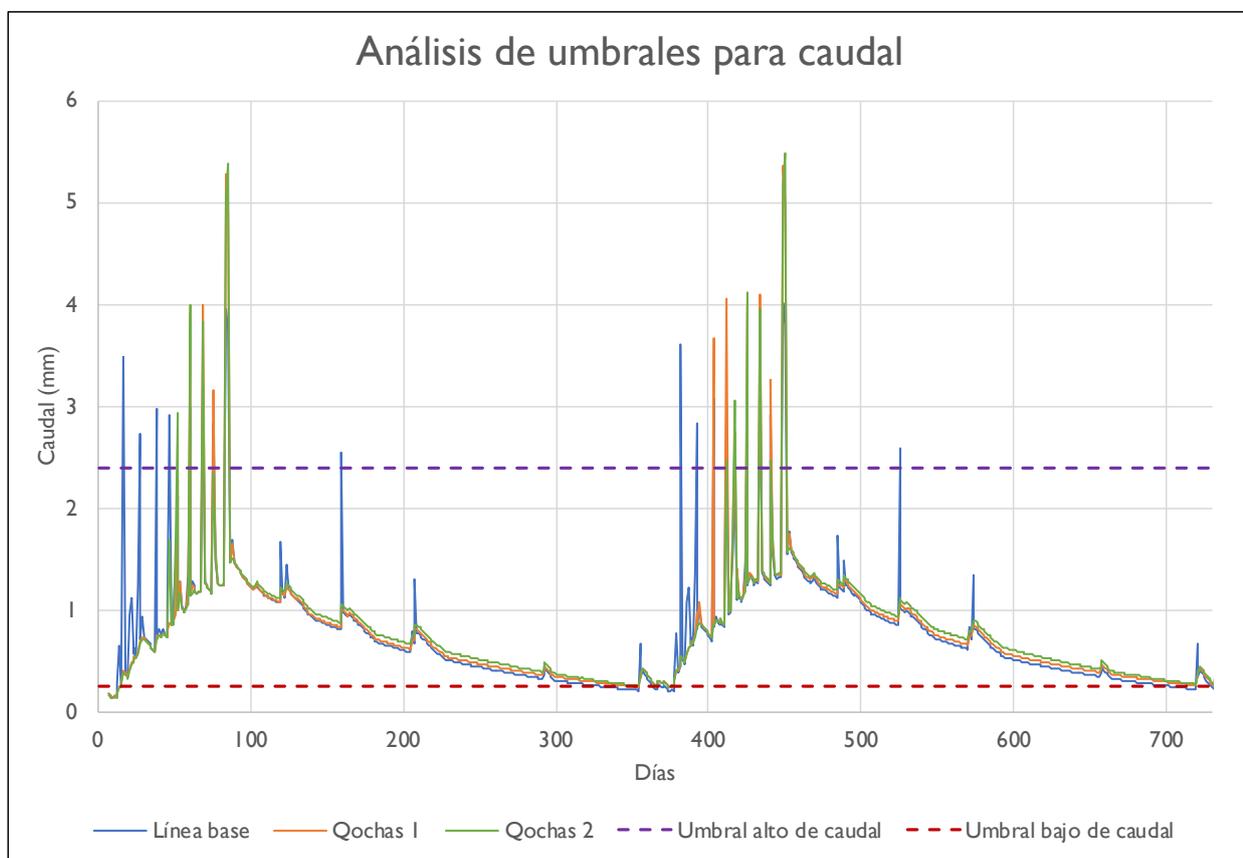
de 5000 m<sup>2</sup> (**Figura 26**), con una profundidad de 4 m (**Figura 25**) para almacenar hasta 6666.67 m<sup>3</sup> de agua y controlar la generación de escorrentía y pérdida de suelos. El segundo escenario propone construir una qocha que tenga el mismo volumen, pero con un área mayor, de 20 000 ha (**Figura 26**), y una profundidad menor, de 1 m (**Figura 25**).

Los resultados de las simulaciones de caudal (**Figura 39**) muestran que ambos escenarios de qochas cambian significativamente el caudal generado por la cobertura de pastos, controlando las crecidas de caudal producidas por la generación de escorrentía. Este efecto sucede principalmente al inicio de las temporadas o episodios de lluvia, cuando las qochas están vacías y tienen la capacidad de almacenar más agua. cuando las qochas se llenan, la salida de agua de la qocha iguala a la generación de escorrentía. Sin embargo, debido a que existen otras salidas de agua, por ejemplo, la filtración hacia el acuífero, la qocha con mayor área de filtración (escenario 2) es capaz de controlar las crecidas por más tiempo que la qocha con menor área (escenario 1). Se evidencia que el caudal generado durante la temporada de estiaje por la qocha de mayor área superficial es mayor al de la

qocha de menor área superficial y que, ambos casos, ofrecen mayor disponibilidad de agua en periodos secos que el escenario base sin qochas.

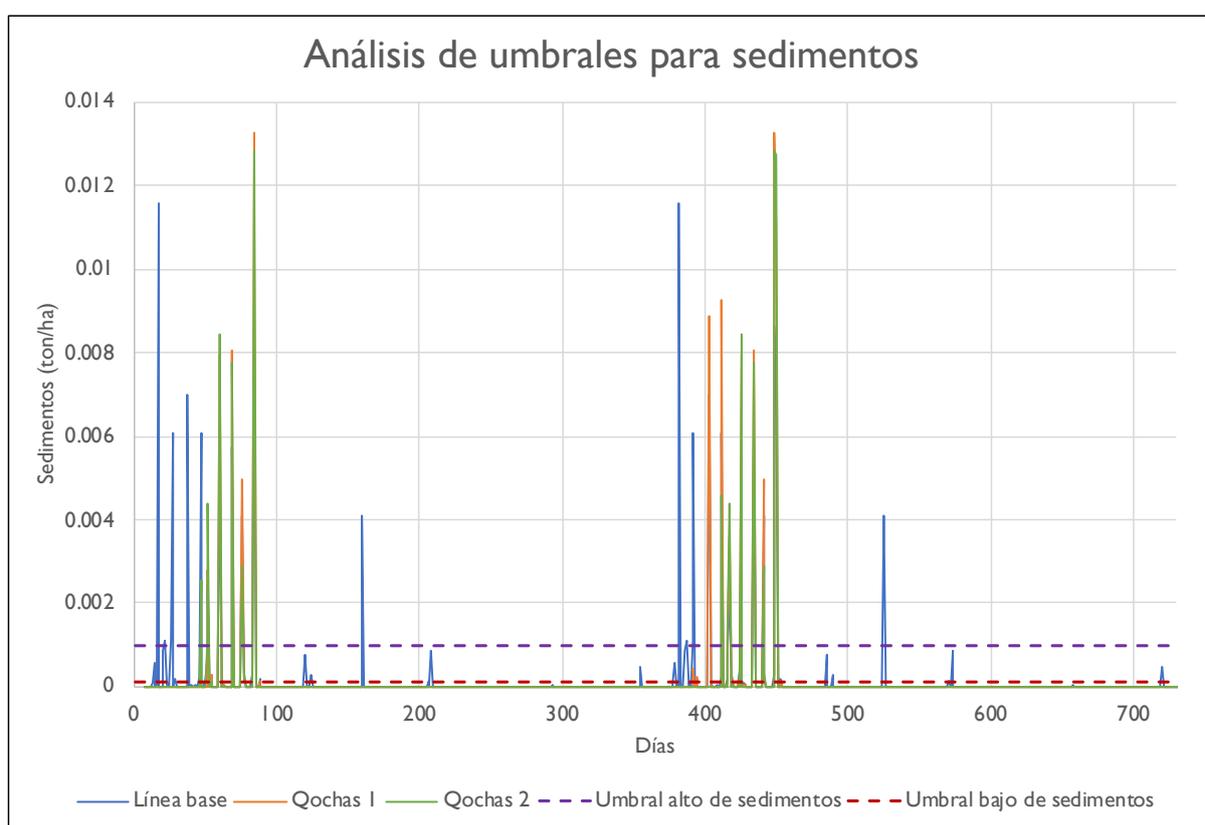
La reducción de escorrentía en los escenarios con qochas se ve también reflejada en las simulaciones de carga de sedimentos (**Figura 40**). Bajo la cobertura de pastos como línea base, la pérdida de suelo que aporta sedimentos al agua es mayor debido a la generación de escorrentía superficial. La construcción de qochas y su amortiguamiento de caudales reduce la generación de escorrentía y, por tanto, la pérdida de suelo y la carga de sedimentos. El segundo escenario (qocha de mayor área), asimismo, hace un mejor trabajo en reducir la escorrentía y la pérdida de suelo que el primer escenario (qocha de menor área).

**Figura 39.** Ejemplo de resultados de caudal simulado utilizando la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Qochas.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 40.** Ejemplo de resultados de carga de sedimentos utilizando la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Qochas.



Fuente: Elaboración propia.

Los datos numéricos de salidas y beneficios hidrológicos (**Figura 41**) muestran tendencias similares en ambos escenarios de construcción de qochas. Solamente el cambio en evapotranspiración es diferente, aumentando en el primer escenario con respecto a la línea base ( $+0.4 \times 1000 \text{ m}^3$ ), y reduciéndose en el segundo escenario ( $-1.3 \times 1000 \text{ m}^3$ ). Sin embargo, en ambos casos se genera un incremento en el rendimiento hídrico (caudal total) de  $+2.9 \times 1000 \text{ m}^3$  y de  $+4.9 \times 1000 \text{ m}^3$ , en los escenarios 1 y 2, respectivamente. La percolación y el caudal base aumentan en ambos escenarios debido al efecto del agua filtrada por las qochas, en  $+4.7 \times 1000 \text{ m}^3$  de percolación y  $+4.5 \times 1000 \text{ m}^3$  de

caudal base en el primer escenario, frente a  $+8.6 \times 1000 \text{ m}^3$  de percolación y  $+8.4 \times 1000 \text{ m}^3$  de caudal base, en el segundo escenario. En ambos casos, la escorrentía superficial se reduce ( $-1.6 \times 1000 \text{ m}^3$  en el escenario 1, y  $-3.5 \times 1000 \text{ m}^3$  en el escenario 2), lo cual a su vez reduce la carga y concentración de sedimentos ( $-0.3 \text{ ton/año}$  y  $-3.0 \text{ g/m}^3$  en el escenario 1, y  $-0.9 \text{ ton/año}$  y  $-4.1 \text{ g/m}^3$  en el escenario 2), en comparación con la línea base. Como se observa, los cambios obtenidos en términos absolutos son marginales, lo cual puede ser principalmente al tamaño modesto del área de estudio (35 ha) y los volúmenes de las qochas ( $6666.67 \text{ m}^3$ ).

**Figura 41.** Resultados hidrológicos en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Qochas.

<b>Resultados hidrológicos</b>			
<b>Salidas de variables hidrológicas</b>			
	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Precipitación observada (mm)	496.4	496.4	496.4
Evapotranspiración real simulada (mm)	203.0	204.3	199.3
Escorrentía simulada (mm)	28.7	24.0	18.6
Percolación simulada (mm)	241.9	255.3	266.6
Caudal total simulado (mm)	291.9	299.8	304.7
Caudal base simulado (mm)	240.4	253.4	264.5
Generación de sedimentos simulada (ton)	2.7	2.4	1.8
Concentración de sedimentos simulada (g/m <sup>3</sup> )	8.0	5.0	3.9
<b>Análisis de umbrales para eventos extremos</b>			
	Línea base	Escenario 1	Escenario 2
Número de días por encima del umbral alto de caudal (día)	10.0	8.0	7.0
Volumen de caudal por encima del umbral alto (mm)	8.3	13.0	9.9
Caudal máximo (mm)	4.0	5.4	5.5
Número de días por debajo del umbral bajo de caudal (día)	22.0	3.0	0.0
Volumen de caudal por debajo del umbral bajo (mm)	90.9	91.2	91.3
Caudal mínimo (mm)	0.2	0.2	0.3
Número de días por encima del umbral alto de sedimentos (día)	13.0	9.0	8.0
Carga de sedimentos por encima del umbral alto (ton)	0.0	339.7	1096.5
Carga de sedimentos máxima (ton)	0.0	66.3	256.4
Número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos (día)	336.0	350.0	355.0
Carga de sedimentos por debajo del umbral bajo (ton)	0.0	8.5	20.2
Carga de sedimentos mínima (ton)	0.0	0.0	0.0
<b>Beneficios calculados con respecto a línea base</b>			
	Unidades	Escenario 1	Escenario 2
Cambio en la evapotranspiración	(x1000 m <sup>3</sup> )	+0.4	-1.3
Cambio en la escorrentía	(x1000 m <sup>3</sup> )	-1.6	-3.5
Cambio en la percolación	(x1000 m <sup>3</sup> )	+4.7	+8.6
Cambio en el caudal total	(x1000 m <sup>3</sup> )	+2.8	+4.5
Cambio en el caudal base	(x1000 m <sup>3</sup> )	+4.5	+8.4
Cambio en la carga de sedimentos	(ton)	-0.3	-0.9
Cambio en la concentración de sedimentos	(g/m <sup>3</sup> )	-3.0	-4.1
<b>Beneficios en eventos extremos con la línea base</b>			
	Unidades	Escenario 1	Escenario 2
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de caudal	(día)	-2.0	-3.0
Cambio en el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	+236.8	+326.1
Cambio en el caudal máximo	(x1000 m <sup>3</sup> )	+67.4	+291.0
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(día)	-19.0	-22.0
Cambio en el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(x1000 m <sup>3</sup> )	+17.3	+72.9
Cambio en el caudal mínimo	(x1000 m <sup>3</sup> )	+1.7	+9.0
Cambio en el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(día)	-200.0	-1000.0
Cambio en la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(ton)	+339.8	+1096.5
Cambio en la carga de sedimentos máxima	(ton)	+66.3	+256.4
Cambio en el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(día)	+14.0	+19.0
Cambio en la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(ton)	+8.5	+20.2
Cambio en la carga de sedimentos mínima	(ton)	0.0	0.0

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 42.** Resultados económicos en la Calculadora de Beneficios CUBHIC 2.0 – Qochas.

<b>Resultados económicos</b>			
<b>Costos de implementación de los escenarios</b>		<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
Volumen de excavación total de las qochas (m <sup>3</sup> )		6666.7	6666.7
Costos de remoción de vegetación en las qochas (USD)		\$0.00	\$0.00
Costos de excavación de las qochas (USD)		\$6,666.67	\$6,666.67
Costos de escenario por cambio de cobertura (USD)		\$0.00	\$0.00
Otros costos adicionales (USD)		\$0.00	\$0.00
Costo total de implementación (USD)		\$6,666.67	\$6,666.67
<b>Costo-eficiencia de los escenarios</b>		<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
	<b>Unidades</b>		
Costo-eficiencia para la escorrentía	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	-\$4,050.87	-\$1,884.80
Costo-eficiencia para la percolación	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$1,420.19	+\$772.70
Costo-eficiencia para el caudal total	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$2,419.45	+\$1,491.49
Costo-eficiencia para el caudal base	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$1,473.78	+\$791.90
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos	(USD por ton)	-\$21,956.63	-\$7,563.82
Costo-eficiencia para la concentración de sedimentos	(USD por g/m <sup>3</sup> )	-\$2,216.97	-\$1,639.55
<b>Costo-eficiencia para eventos extremos</b>		<b>Escenario 1</b>	<b>Escenario 2</b>
	<b>Unidades</b>		
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de caudal	(USD por día)	-\$3,333.33	-\$2,222.22
Costo-eficiencia para el volumen de agua por encima del umbral alto de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$28.15	+\$20.44
Costo-eficiencia para el caudal máximo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$98.93	+\$22.91
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por día)	-\$350.88	-\$303.03
Costo-eficiencia para el volumen de agua por debajo del umbral bajo de caudal	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$385.98	+\$91.43
Costo-eficiencia para el caudal mínimo	(USD por 1000 m <sup>3</sup> )	+\$3,810.74	+\$741.87
Costo-eficiencia para el número de días por encima del umbral alto de sedimentos	(USD por día)	-\$33.33	-\$6.67
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por encima del umbral alto	(USD por ton)	+\$19.62	+\$6.08
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos máxima	(USD por ton)	+\$100.53	+\$26.00
Costo-eficiencia para el número de días por debajo del umbral bajo de sedimentos	(USD por día)	+\$476.19	+\$350.88
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos por debajo del umbral bajo	(USD por ton)	+\$788.95	+\$329.95
Costo-eficiencia para la carga de sedimentos mínima	(USD por ton)	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Considerando los costos de implementación (**Figura 42**), ambos escenarios requerirían el mismo volumen de excavación y, por tanto, de inversión (USD 6 667). Aun así, los beneficios obtenidos muestran una mejor costo-eficiencia para el escenario 2 con la qocha de mayor área superficial y menor profundidad (20 000 m<sup>2</sup> y 1 m, respectivamente), que para el escenario 1 con la qocha de menor área superficial y mayor profundidad (5 000 m<sup>2</sup> y 4 m, respectivamente). La costo-eficiencia en aumento de percolación es de +1 420.19 USD por 1000 m<sup>3</sup> en el escenario 1 frente a +772.70 USD por 1000 m<sup>3</sup> en el escenario 2, mientras que para el aumento de caudal base es de +1 473.78 USD por 1000 m<sup>3</sup>, en el escenario 1, frente a +791.90 USD por 1000 m<sup>3</sup>, en el escenario 2. La costo-eficiencia en la reducción de escorrentía de los escenarios 1 y 2 es, respectivamente, -4 050.87 USD por 1000 m<sup>3</sup> y -1 884.80 USD por 1000 m<sup>3</sup>, mientras que para la carga y concentración de sedimentos es de -21 956.63 USD por ton y -2 216.97 USD por g/m<sup>3</sup>, para el escenario 1, frente a -7 563.82 USD por ton y -1 639.55 USD por g/m<sup>3</sup>, para el escenario 2.

El análisis de umbrales para eventos extremos muestra que el escenario 1 es más eficiente en la

regulación de eventos extremos de sedimentos que el escenario 2, pero menos eficiente en la regulación de eventos de caudal. Esto se traduce de la misma manera en la costo-eficiencia.

En general, el escenario 2 (qocha de mayor área superficial) es considerablemente más costo-efectivo que el escenario 1 (qocha de menor área superficial). Lo ideal sería configurar un experimento en campo con estas características para evidenciar si, efectivamente, dado un mismo volumen de qocha, los beneficios serían mayores si su área superficial es mayor y su profundidad es menor. Con esta información se pueden mejorar las conceptualizaciones y ecuaciones de la metodología.

Para el caso de CUBHIC 2.0 – Qochas, también se gráfica el volumen de agua disponible en las qochas evaluadas (**Figura 43**), como un indicador de disponibilidad hídrica. Esta información puede ser útil para las y los usuarios que requieren utilizar el agua directamente de la qocha como un micro-reservorio, como para guiar el monitoreo hidrológico de los niveles y volúmenes de agua en la qocha con fines de evaluación y comparación en campo.

**Figura 43.** Volumen de agua disponible en las qochas.



Fuente: Elaboración propia.









Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

[www.infraestructuranatural.pe](http://www.infraestructuranatural.pe)

El proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica promueve la conservación, restauración y recuperación de los ecosistemas a nivel nacional, formando alianzas con organizaciones públicas y privadas para reducir los riesgos hídricos como sequías, inundaciones y contaminación del agua.

El proyecto es promovido y financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y el Gobierno de Canadá y ejecutado por Forest Trends, CONDESAN, la Sociedad Peruana de Derecho Ambiental (SPDA), EcoDecisión e investigadores del Imperial College London.

#### ¿Cómo citar este documento?

Ochoa-Tocachi, B. F., Cuadros-Adriazola, J., & Bonnesoeur, V. (2022). CUBHIC 2.0: Manual de Uso. Forest Trends, Lima, Perú.



Canada



Imperial College  
London