



CUBHIC

Metodologías de cuantificación de
beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas

Restauración y Conservación de Pastizales Altoandinos

*Cuantificación de mejoras potenciales en
el caudal base*

Documento metodológico
Marzo 2020



AUTORES:

**Michael E. Foster, David Chen, Mark S. Kieser
Kieser & Associates, LLC**

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

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



INTERVENCIÓN PROPUESTA: RESTAURACIÓN DE PASTIZALES ALTOANDINOS

Los pastizales altoandinos son un tipo de ecosistema que ocurre en la Cordillera de los Andes a gran altitud, más allá del límite de la vegetación arbórea, pero por debajo de la línea de nieve permanente. En esta ecorregión, la vegetación predominante es el pasto y los arbustos. La precipitación anual en los pastizales altoandinos varía, depende de la elevación y la ubicación, algunos pastizales se caracterizan por condiciones húmedas, mientras que otros son relativamente secos¹.

La conservación y la restauración de los pastizales altoandinos involucra la disminución del pastoreo mediante la exclusión parcial o total del ganado. Se espera que al evitar el ingreso del ganado a los pastizales altoandinos mediante la colocación de cercas se facilite el resurgimiento de vegetación natural, lo cual dará lugar al mejoramiento en la condición del suelo y a una mayor infiltración de la precipitación. De manera alternativa, se especula que prácticas apropiadas de pastoreo de ganado brindan beneficios similares a los de evitar el ingreso del ganado. Por el otro lado, se puede evitar el daño a los pastizales altoandinos al implementar cercos o buenas prácticas de pastoreo antes de que llegue a desnudar la cobertura vegetal y compactar los suelos. Llamamos esta acción preventiva "protección."

Los beneficios hidrológicos de la restauración y protección de los pastizales altoandinos dependen mucho del diseño de esta intervención y de cómo los factores físicos e hidrológicos influyen la evapotranspiración, la percolación y al final el caudal base, que se deben tomar en cuenta en estas interacciones hidrometeorológicas. La restauración y protección de los pastizales altoandinos puede aumentar la percolación profunda de la precipitación que resultaría en un incremento del caudal base en época de estiaje. Sin embargo, los pastizales pueden también llegar a una mayor evapotranspiración en la zona restaurada. El manejo de la carga animal puede ser a través de la hoja de cálculo Excel que acompaña este documento metodológico.



CÁLCULO DE LOS BENEFICIOS HIDROLÓGICOS

Para calcular los beneficios hídricos de la cantidad de agua asociados con el manejo del ganado en la restauración de los pastizales altoandinos, se propone un enfoque de balance hídrico. Este enfoque está diseñado para obtener una estimación razonablemente precisa y mientras que minimice la cantidad de información necesaria.

El enfoque del balance hídrico implica la aplicación de la ecuación de balance dos veces: primero, para representar las condiciones sin la intervención y, segundo, para representar las condiciones con la intervención. La diferencia entre estas condiciones refleja el incremento de la infiltración de la precipitación en el suelo y, a su vez, el incremento del caudal base de los ríos locales y el beneficio en la cuenca de interés. El objetivo de la restauración o protección de los pastizales altoandinos es aumentar la cantidad de agua que llega a los acuíferos mediante la percolación. La reducción del pastoreo aumenta la cobertura vegetal que resulta en una menor proporción de agua de lluvia que sale de la cuenca por escorrentía superficial. Sin embargo, el aumento de la densidad de la cobertura vegetal puede aumentar la evapotranspiración. Esto significa que la restauración de los pastizales altoandinos puede reducir un componente de pérdida de agua de la cuenca al mismo tiempo que puede aumentar otro componente. El

balance hídrico dependerá de las condiciones locales del clima y del suelo.

Los siguientes pasos se emplearon para estimar los beneficios hidrológicos, usando el enfoque del balance hídrico:

1. Recopilación de datos de entrada

a. Información representativa del sitio

- i. Características hidrológicas del suelo
- ii. Características de la vegetación que afectan a la evapotranspiración y a la escorrentía

b. Información climática

- i. Tasas de precipitación
- ii. Temperaturas (mínima, máxima y promedio)

2. Cálculo de los beneficios de la intervención

a. Aplicar dos veces la ecuación del balance hídrico simplificado, que representa las condiciones sin y con la intervención y posteriores mediante lo siguiente:

- i. Escorrentía superficial
- ii. Percolación
- iii. Evapotranspiración
- iv. Contenido de humedad del suelo

b. Cálculo de la diferencia en el caudal base entre las condiciones previas y posteriores. Percolación

Este documento resume los detalles del cálculo propuesto para intervenciones en los pastizales altoandinos. Estos pasos se enfocan en el balance hídrico y sobre los subcomponentes de este balance. Finalmente, se propone un resumen simplificado de las etapas de cálculo.



Ecuación del balance hídrico

La precipitación que cae en el ámbito de intervención puede: 1) alimentar la escorrentía superficial; 2) perderse por evapotranspiración o 3) infiltrarse en el suelo y ser “succionada” por las partículas del suelo o percolar hacia los acuíferos. La percolación localizada en la napa freática puede alimentar el flujo lateral y resultar en flujo subsuperficial lento o alimentar la recarga de acuíferos y, finalmente, convertirse en caudal base. El cálculo de las posibles vías que alimentan los caudales “lentos” generalmente necesitan metodologías de cuantificación más sofisticadas, lo cual no está incluido en este documento técnico. Los flujos considerados en este documento son representados en la figura 1.

El balance hídrico a escala de cuenca está representado por la siguiente ecuación²:

$$P=Q+ET+p+\Delta R$$

donde:

P = precipitación (mm)

Q = escorrentía (mm)

ET = evapotranspiración (mm)

p = percolación (mm)

ΔR = cambio en el contenido de humedad (mm)

Figura 1. Entradas y salidas del balance hídrico considerado para la restauración de pastizales.



² Fleischbein, K., W. Wilcke, C. Valarezo, W. Zech, K. Knoblich (2006). Water budgets of three small catchments under montane forest in Ecuador: experimental and modelling approach. *Hydrol. Process.* 20:2491-2507.

El contenido de humedad del suelo actúa como una restricción para la evapotranspiración y la percolación. La evapotranspiración es limitada cuando el contenido de humedad está por debajo del punto de marchitez mientras que la percolación es limitada cuando el contenido de humedad está por debajo de la capacidad de campo del suelo. El contenido de humedad cambia constantemente a medida que la infiltración, la evapotranspiración y la percolación actúan en el almacenamiento del contenido de humedad del suelo. Por lo tanto, calcular el contenido de humedad en pasos de tiempo más frecuentes puede producir una estimación más exacta. Debido a que el contenido de humedad limita la evapotranspiración y la percolación, la mayor precisión en el cálculo del contenido de humedad corresponderá a una mayor precisión en los cálculos de la evapotranspiración y la percolación. La evapotranspiración propiamente dicha cambia debido a la radiación solar (una función de la época del año) y la temperatura. En tal sentido, la precisión en el cálculo de la evapotranspiración se beneficia también de cálculos en pasos de tiempo más frecuentes. Este balance hídrico puede abordar rápidamente múltiples pasos de tiempo considerando que $\Delta R = R_t - R_{t-1}$, donde t representa el paso de tiempo. El balance hídrico puede reconfigurarse entonces para calcular el contenido de humedad por paso de tiempo tal como se indica a continuación:

$$R_t = R_{t-1} + P - Q - ET - p$$

La escorrentía (Q), la evapotranspiración (ET) y la percolación (p) se abordan en profundidad en las secciones posteriores.

La secuencia de cálculos es importante porque la ecuación de la percolación requiere haber calculado la escorrentía superficial y la ecuación de la evapotranspiración requiere haber calculado la percolación. Por lo cual, es importante respetar los cálculos en el siguiente orden:

1. Calcular la escorrentía superficial
2. Calcular la percolación
3. Calcular la evapotranspiración
4. Actualizar el balance hídrico en el suelo



Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se calcula usando el método del Número de Curva del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Este usa los números de curva que son representativos de la permeabilidad del suelo y asignados a las áreas de acuerdo con su cobertura vegetal y el tipo de suelo. Un número de curva más alto representa superficies más impermeables mientras que números de curva bajos representan suelos con alta capacidad de infiltración. Una sugerencia de números de curva para el caso peruano es propuesta en una hoja de cálculo que acompaña este documento técnico. La ecuación del número de curva es tal como se indica:³

si $P > 0,05s$, entonces

$$Q = \frac{(P - 0,05s)^2}{P + 0,95s}$$

donde:

P = precipitación diaria (mm)

Q = escorrentía superficial diaria (mm)

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

CN = número de curva (una función del tipo de suelo y la cobertura vegetal que se selecciona a través de las tablas de búsqueda)

Percolación y recarga de acuíferos

La humedad del suelo se modela como un reservorio que puede incrementarse con la precipitación y la infiltración, y reducirse con la evapotranspiración y la percolación hacia las aguas subterráneas. La humedad del suelo está limitada por dos entradas: capacidad de campo y punto de marchitez. Estos valores normalmente se representan como un porcentaje, y se multiplican por la profundidad de la capa del suelo para obtener un valor en milímetros. La profundidad de la capa del suelo en este marco de trabajo se establece en 150 mm para representar la zona radicular (una sugerencia de valores de capacidad de campo y punto de marchitez están propuestas en la hoja de cálculo que acompaña este documento). Durante cada paso de tiempo del balance hídrico, toda agua del reservorio de contenido de humedad que exceda la capacidad del campo se convierte en percolación:

$$p = \max(0, R_{t-1} + P - Q - fc)$$

donde:

fc = capacidad de campo (mm)

R_{t-1} = contenido de humedad del paso de tiempo previo (mm)

P = precipitación (mm)

Q = escorrentía (mm)

En este documento, asumimos que el agua que percola puede recargar tanto los acuíferos superficiales como los acuíferos profundos. Es razonable considerar que los acuíferos superficiales pueden alimentar localmente a la escorrentía mientras que los acuíferos profundos pueden alimentar a las aguas superficiales fuera del ámbito considerado. Este análisis no busca calcular dónde y cuándo el agua de los acuíferos retorne a las aguas superficiales, sin embargo, es importante recordar que este flujo de agua no puede ser considerado como una pérdida de agua.

³ USDA-NRCS. 2004. National Engineering Handbook: Part 630—Hydrology. USDA Soil Conservation Service. Washington, D.C.4 Soil & Water Assessment Tool (SWAT). 2019. Texas A&M University. Disponible en: <https://swat.tamu.edu/software/>.



Evapotranspiración:

La evapotranspiración está limitada por la temperatura, la humedad y el punto de marchitez (w_p). Estas limitaciones se simplifican de manera que la evapotranspiración: 1) no ocurre durante días con precipitación o durante días en los que la temperatura media está por debajo de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, y 2) no puede reducir el reservorio-suelo de contenido de humedad por debajo del punto de marchitez. La evapotranspiración se estima calculando primero la evapotranspiración potencial (E_0) que representa la cantidad de evaporación que el aire puede admitir. E_0 se multiplica entonces por un coeficiente (r) que depende del índice de área foliar (LAI) para calcular la cantidad de evapotranspiración que realmente ocurre, tal que:

Si $LAI \geq 3$; $r = 1$.

De lo contrario: $r = Er \cdot Es + \frac{LAI}{3}$.

donde:

Er = coeficiente de evapotranspiración del suelo

$$Er = \exp \left[\frac{2,5(R_t - I - fc)}{fc - w_p} \right]$$

Es = coeficiente de evaporación del suelo

$$Es = 0,0998LAI^2 - 0,6055LAI + 0,933$$

Estas ecuaciones fueron desarrolladas por los autores para simplificar una serie de ecuaciones de transpiración y evaporación del suelo descritas en los documentos técnicos del modelo "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT)⁴. Después, el producto de E_0 y r alimenta una función que limita la evapotranspiración basada en el agua disponible en el suelo (agua del suelo en exceso del punto de marchitez):

$$ET = \min[E_0 \cdot r, 0,8(R_{t-1} + P - Q - p - w_p)]$$

E_0 se calcula aplicando el método de Priestly-Taylor, una serie de cálculos que se describen en la documentación del modelo SWAT, así como en el artículo original *On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters*⁵. Aunque este método implica el uso de numerosas ecuaciones, la mayoría de los componentes son constantes y los únicos componentes variables son la temperatura, la latitud y el día. Por lo tanto, el método de Priestly-Taylor puede simplificarse, lo que se demuestra en la siguiente sección:

⁴ Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and J. R. Williams. 2011. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute.

⁵ Priestley, C. H. B. y R. J. Taylor. 1972. *On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation using Large-scale Parameters*. *Monthly Weather Review* 100.2: 81-92.



$$E_0 = \frac{(\alpha_{pet} \Delta)}{\lambda(\Delta + \gamma)} (H_{net} - G)$$

donde:

α_{pet} = coeficiente (1,26)

Δ = pendiente de la curva temperatura-presión de saturación (kPa/°C)

$$\Delta = \frac{4098e_0}{(T+237,3)^2}$$

T = temperatura promedio diario (°C)

e_0 = presión de vapor de saturación (kPa)

$$e_0 = \exp\left(\frac{16,78T - 116,9}{T + 237,3}\right)$$

λ = calor latente de vaporización (MJ/kg)

$$\lambda = 2,501 - 0,002361T$$

γ = constante psicrométrica (kPa/°C)

$$\gamma = \frac{(0,001013Pa)}{0,622\lambda}$$

Pa = presión atmosférica (kPa)

$$Pa = 101,3 - 0,01152EL + 0,544 \times 10^{-6}EL^2$$

EL = elevación sobre el nivel del mar (m)

H_{net} = radiación neta diaria (MJ/m²d)

G = densidad del flujo calorífico hacia el terreno (MJ/m²d). Esta es mínima y, a los efectos de este documento, puede asumirse que es 0.

Las ecuaciones para la radiación pueden ser complejas y, a los efectos de este documento, la radiación se representará por medio de ecuaciones del modelo SWAT. Estas se explican en la documentación del modelo SWAT (capítulos 1.1 y 2.2) y pueden, en general, describirse así:

$$H_{net} = (1 - \alpha) H_{sw} + H_{lw}$$

donde:

α = albedo (fracción adimensional que varía de 0 a 1; para una lista de valores albedo para diferentes tipos de terreno/vegetación, consulte la tabla en la hoja de cálculo, como la que se describen en el informe «Vegetación, uso de la tierra y conjuntos de datos de albedo estacionales»⁶)

H_{sw} = radiación de onda corta entrante

H_{lw} = radiación de onda larga

⁶ Matthews, E. 1984. *Vegetation, Land-use and Seasonal Albedo Data Sets: Documentation of Archived Data Tape*. NASA Goddard Inst. for Space Studies. Nueva York, NY, Estados Unidos de América.



La radiación de onda larga tal como se utiliza en las ecuaciones SWAT es una función de la temperatura y de la cobertura de nubes. Las numerosas ecuaciones que SWAT describe pueden simplificarse en una sola ecuación (desarrollada por K&A) de manera que:

$$H_{lw} = \frac{c}{0,8} \cdot (0,00376T^2 - 0,0516T - 6,967)$$

donde:

c = fracción de la cobertura nubosa adimensional (0,5 - 0,8), que es más baja en caso de una cobertura nubosa más densa y es más alta en caso de que no haya una cobertura de nubes. Si no se cuenta con datos sobre la cobertura nubosa, puede utilizarse el valor medio de 0,65.

T = temperatura media diaria en grados °C

La radiación de onda corta tal como se utiliza en las ecuaciones SWAT es una función de la latitud, del día y la cobertura de nubes. Estas ecuaciones pueden utilizarse tal como se describe en la documentación de SWAT, en su lugar pueden utilizarse las simplificaciones obtenidas empíricamente (desarrolladas por K&A) que se describen a continuación:

$$H_{sw} = \frac{c}{0,8} (a\delta^2 + b\delta + d)$$

donde:

a , b , y d = coeficientes dependientes de la latitud, las ecuaciones que dependen de la latitud para estos coeficientes son las que se indican a continuación:

$$a = 7,6 \times 10^{-7} \phi^4 + 0,00607\phi^2 - 14,639$$

$$b = -3,83 \times 10^{-5} \phi^3 + 0,805\phi$$

$$d = -0,0042\phi^2 + 29,913$$

ϕ = latitud en grados

$$\delta = \text{declinación solar, donde } \delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi(\text{día}-82)}{365}\right)$$



RESUMEN DEL DOCUMENTO

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

Escorrentía superficial (Q)

$$\text{Si } P > 0,05s, \text{ entonces } Q = \frac{(P - 0,05s)}{2P + 0,95s}$$

Percolación (p)

$$p = \max(0, R_{t-1} + P - Q - fc)$$

Evapotranspiración (ET)

$$\text{Si } T > 0, \text{ entonces } ET_0 = \left(\frac{\alpha_{pet} \Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)} \right) [(1 - \alpha) H_{sw} + H_{lw}]$$

$$ET = \min[ET_0 \cdot xr, 0,8(R_{t-1} + P - Q - p - wp)]$$

Balance Hídrico

$$R_t = R_{t-1} + P - Q - ET - p$$

Figura 2. Etapas de cálculos y ecuaciones para el balance hídrico de la restauración de pastizales de Puna.



RECONOCIMIENTOS

La preparación de esta metodología y su documentación no habría sido posible sin los aportes importantes de un equipo amplio y diverso. La metodología ha incorporado los aportes técnicos y traducción de Bruno Locatelli (Centro de Investigación Forestal Internacional—CIFOR), Jan Markus Homberger (Centro de Investigación Forestal Internacional—CIFOR), Vivien Bonnesoeur (CONDESAN) y Edwing Arapa (CONDESAN). La edición de este documento fue realizada por Gena Gammie (Forest Trends) y Sydney Moss (Forest Trends).







Restauración y Conservación de Pastizales Altoandinos: Cuantificación de beneficios potenciales en el caudal base

infraestructuranatural.pe

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