



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA

Canada

CUBHIC

Metodologías de cuantificación de
beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas

Qochas

**Evaluación de los
beneficios potenciales
en la cantidad de agua**

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: QOCHAS

Las qochas son pequeños reservorios destinados a capturar, retener e infiltrar el agua de lluvia y la escorrentía. Estas han sido utilizadas, a lo largo de la historia, por poblaciones altoandinas y generalmente se implementan en el contexto de tierras agrícolas. El beneficio hídrico que las qochas puedan generar al caudal base en estación seca, dependerá en gran medida de cómo su diseño responda a los factores hidrológicos y físicos que influyen en la evapotranspiración, evaporación, captura de escorrentía, recarga del agua subterránea y extracciones localizadas de agua. Esta metodología no incorpora a las qochas impermeables, por ejemplo las que tienen geomembranas o suelos impermeables.





CALCULANDO LOS BENEFICIOS HIDROLÓGICOS

Se propone una aproximación conservadora¹ del balance hídrico para calcular los beneficios hídricos de las qochas en relación con la infiltración de las aguas subterráneas poco profundas que contribuyen a las condiciones localizadas del flujo base de la corriente. Las ecuaciones utilizadas en este documento están diseñadas para proporcionar resultados precisos y minimizar los requerimientos de datos de entrada. Existen métodos de cálculo más complejos que pueden simular procesos hidrológicos, pero generalmente requieren mediciones de campo, calibración extensiva del modelo y experiencia del usuario.

Con el fin de cuantificar los beneficios potenciales del flujo base de la qocha, los balances hídricos se ejecutan para dos escenarios separados. Un escenario representa la condición “antes” (o de línea base actual), mientras que el otro representa la condición “después” de la implementación de la qocha. La condición de línea base supondría que no hay almacenamiento de qocha (o almacenamiento mínimo actual). Los beneficios de la cantidad de agua se calculan para un escenario de condición “posterior” que incluye una qocha construida (o expandida). La diferencia en las salidas de los dos escenarios representa el beneficio potencial en el flujo base.

Se pueden calcular múltiples escenarios “posteriores” para comparar los beneficios de varias aplicaciones de intervención. Cada escenario

tiene un conjunto de entradas específicas para las condiciones que representa, lo que a su vez afecta las salidas de cálculo. Diferentes escenarios proporcionarán distintas combinaciones de beneficios y, en algunos casos, la producción puede mostrar una pérdida de beneficios. Dado que se están considerando múltiples medidas, las partes interesadas deben usar las capacidades comparativas de esta metodología para sopesar los beneficios y, en última instancia, el costo de cada escenario.

Los pasos generalizados utilizados para estimar los beneficios de la cantidad de agua de este enfoque incluyen:

1. Recopilación de datos de entrada

a. Entradas específicas de sitio

- Características del suelo que afectan los procesos del contenido de humedad
- Características de la vegetación que afectan la evapotranspiración y la escorrentía

b. Entradas específicas de paso de tiempo²

- Tasas de precipitación
- Datos de temperatura (máximos y mínimos o promedios)

2. Cálculos de cuantificación (las ecuaciones se repiten para el número de pasos de tiempo deseados)

a. Región de contribución de aguas arriba

- Escorrentía
- Percolación
- Evapotranspiración
- Contenido de humedad

b. Qocha

- Volumen de precipitación
- Volumen de escorrentía
- Volumen de evaporación
- Volumen de reservorio
- Volumen de filtración



¹ El término “conservador”, como es usado aquí, denota que los beneficios estimados son probables en el extremo inferior del rango de resultados predichos para no inflar el valor potencial de la intervención, reconociendo la incertidumbre asociada con varios supuestos metodológicos. Los estudios de campo locales ayudarán a minimizar esta incertidumbre para representar mejor los resultados esperados.

² Fuente: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=estaciones>

3. Cálculos de análisis de beneficios

a. Diferencia en la filtración entre escenarios

b. Volumen de agua derivada de la qocha con fines agrícolas

El resto del documento presenta los detalles de estos cálculos propuestos para las intervenciones de qocha. Estos pasos se centran en dos balances hídricos: 1) un balance hídrico en la región contribuyente para la escorrentía superficial y 2) un balance hídrico en la qocha. También se proporcionan detalles para los subcomponentes de estas ecuaciones para respaldar plenamente este enfoque. Por último, se alcanza una descripción simplificada del proceso combinado del cálculo.

Balance hidrológico

Desde una perspectiva de cuantificación, una qocha puede considerarse como dos sistemas adyacentes que interactúan entre sí: 1) un área contribuyente aguas arriba y 2) la qocha misma, que es un depósito para el almacenamiento de agua. Cada sistema puede ser representado y cálculo por un balance hídrico. Cada balance hídrico es completamente contabilizado en las entradas y salidas hacia y desde el sistema durante un período de tiempo. Estos se ilustran en la figura 1. Se proyecta que la filtración de la qocha aumentará los flujos base de la estación seca dependiendo de la salida de la qocha o los volúmenes de derivación.

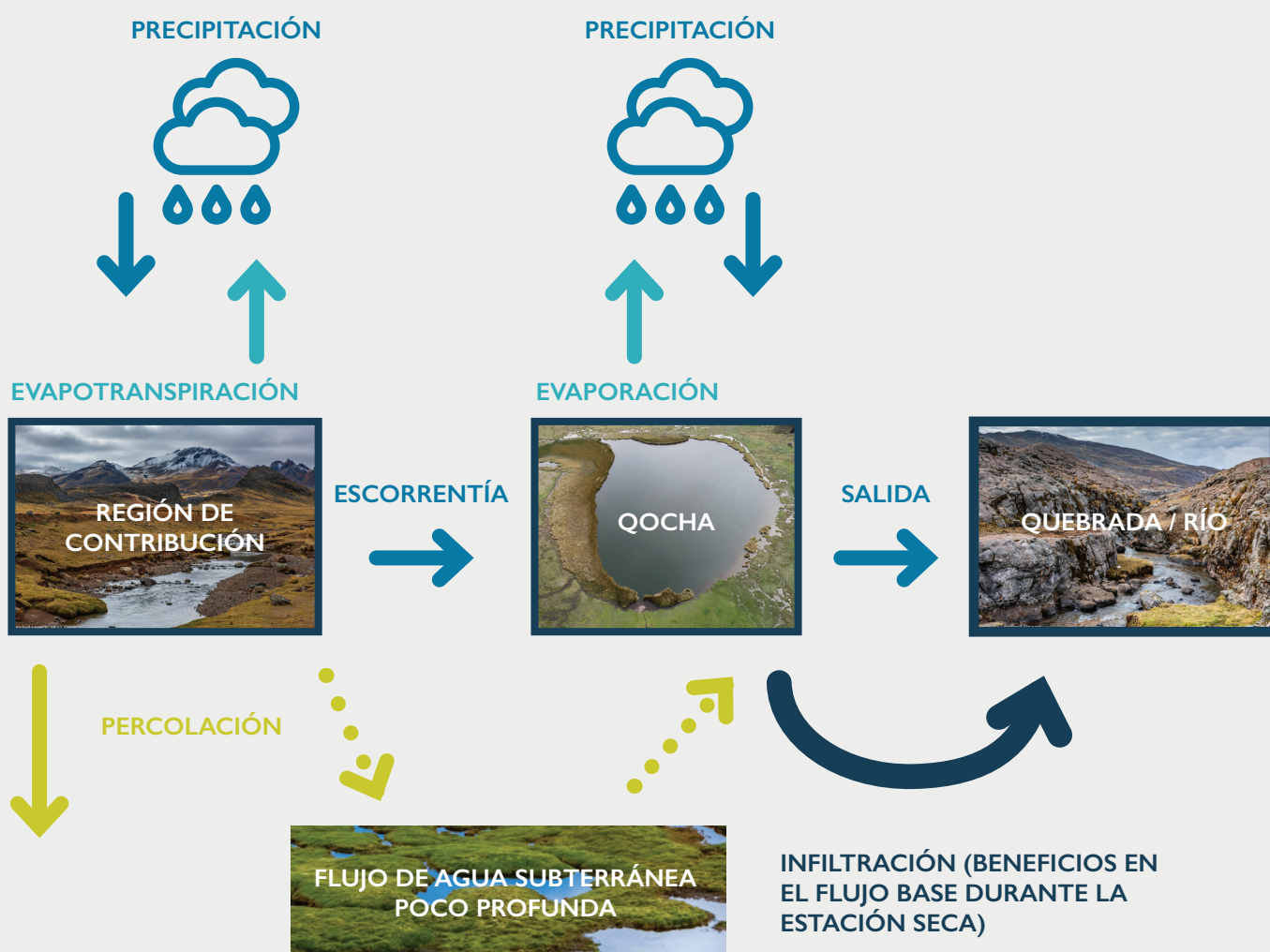


Figura 1. Ilustración de la región contribuyente y la interacción del balance hídrico en qocha, entradas y salidas.

La infiltración al agua subterránea en la región contribuyente se calcula en el marco propuesto, aunque su contribución a la qocha no se incluye dada la complejidad de los factores del sitio que a menudo son difíciles de medir o estimar. Sin embargo, se sugiere un enfoque para su inclusión en el apéndice de este manual técnico para opcionales consideraciones computacionales.

Ecuación del balance hídrico en el área de contribución

La precipitación que cae sobre el área contribuyente que rodea a una qocha puede: 1) convertirse en escorrentía de aguas pluviales; 2) perderse por evapotranspiración o 3) infiltrarse en los suelos para ser capturada como agua de poro del suelo o filtrarse a la capa freática. El agua que se filtra en la capa freática (como recarga de agua subterránea) puede fluir lateralmente como flujo base a la qocha u otra agua superficial, o convertirse en fuga a las aguas subterráneas profundas. El agua subterránea filtrada que viaja a través del acuífero poco profundo desde la región contribuyente a la qocha no se cuantifica directamente bajo este marco propuesto; sin embargo, en el apéndice se describe un método potencial para incluir este flujo adicional de agua subterránea en la qocha (que podría agregar beneficios al flujo base de la estación seca).

Para el cálculo del balance hídrico en la región contribuyente, la precipitación se puede representar mediante la siguiente ecuación:

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

donde:

P = precipitación (mm)

Q = escorrentía (mm)

ET = evapotranspiración (mm)

p = percolación (mm)

ΔR = cambio en el contenido de agua (mm)

La humedad del suelo actúa como una restricción para la evapotranspiración y la filtración. La evapotranspiración está limitada cuando la humedad del suelo está en o debajo del punto de marchitez del suelo, mientras que la percolación está limitada cuando la humedad del suelo está por debajo de la capacidad de campo del suelo. La humedad del suelo cambia constantemente a medida que la infiltración, la evapotranspiración y la percolación actúan sobre el almacenamiento de humedad del suelo. Por lo tanto, calcular la humedad del suelo en intervalos de tiempo más

frecuentes puede dar como resultado un resultado más preciso. Dado que la humedad del suelo limita la evapotranspiración y la percolación, una mayor precisión con el cálculo de la humedad del suelo se corresponderá con una mayor precisión con los cálculos de la evapotranspiración y la percolación. La propia evapotranspiración cambia debido a la radiación solar (una función de la época del año) y la temperatura. Como tal, la precisión del cálculo de evapotranspiración también se beneficia de cálculos de paso de tiempo más frecuentes. Este balance hídrico puede abordar fácilmente múltiples pasos de tiempo considerando que $\Delta R=R_t-R_{t-1}$, donde t representa el paso de tiempo. El balance hídrico se puede reconfigurar para calcular la humedad del suelo sobre una base de paso de tiempo de la siguiente manera:

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

Detalles adicionales sobre la escorrentía (Q), evapotranspiración (ET) y la percolación (p) se cubren en secciones posteriores. La secuencia de cálculo es importante ya que la ecuación de percolación requiere una escorrentía calculada y las ecuaciones de evapotranspiración requieren una percolación calculada. Por lo tanto, es importante configurar los cálculos del componente de balance hídrico de modo que se realicen en el siguiente orden:

1. Calcular escorrentía
2. Calcular percolación
3. Calcular evapotranspiración
4. Actualizar el balance de humedad del suelo

Escorrentía

La precipitación que no se infiltra en el suelo se convierte en escorrentía, y se calcula aquí usando el Método de Número de Curva³. Este método utiliza números de curva que son representativos de la permeabilidad del suelo y se asignan a áreas en función de su vegetación y tipo de suelo. Los números de curva más altos representan superficies más impermeables, mientras que los números de curva más bajos representan suelos con mayores capacidades de infiltración. Los números de curva sugeridos se proporcionan en la hoja de cálculo que acompaña a este documento. La ecuación del número de curva es la siguiente:

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

³ USDA-NRCS. 2004. National Engineering Handbook: Part 630—Hydrology. USDA Soil Conservation Service. Washington, DC, USA.

donde:

P = precipitación (mm)

Q = escorrentía (mm)

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

CN = número de curva

Percolación

En este marco, la humedad del suelo se modela como un reservorio que puede aumentar por precipitación e infiltración, y disminuir por evapotranspiración y filtración a las aguas subterráneas. La humedad del suelo está limitada por dos entradas: capacidad de campo y punto de marchitez. Estos valores generalmente 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 de suelo en este marco se establece en 150 mm para representar la zona de la raíz. Los valores sugeridos para la capacidad de campo y el punto de marchitez por tipo de suelo se pueden encontrar en la hoja de cálculo. Durante cada paso de tiempo para el balance hídrico, cualquier agua en el depósito de humedad del suelo que exceda la capacidad de 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)

Se supone que el agua que se filtra de la capa de suelo se convierte en agua subterránea en el acuífero poco profundo o en el acuífero profundo. Bajo ciertas condiciones, las contribuciones de acuíferos poco profundos a la qocha podrían representar una parte de la filtración que se considera que contribuye a los flujos base en la estación seca. Debido a los desafíos para monitorear o estimar estas contribuciones, se añaden sugerencias para ecuaciones opcionales de aguas subterráneas que potencialmente pueden usarse sin problemas con este cálculo.

Evaporación y evapotranspiración

La evaporación y la evapotranspiración están limitadas por la temperatura, la humedad y el punto de marchitez. En este marco, estas restricciones se simplifican para que la evapotranspiración: 1) no ocurra durante los días en que la temperatura media esté por debajo de 0° Celsius, y 2) no puede reducir el depósito de humedad del suelo 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 podría soportar: E_0 luego se multiplica por un coeficiente (r) que depende del índice de área foliar (Leaf Area Index - LAI) para calcular la cantidad de evapotranspiración que realmente ocurre. Si $LAI \geq 3$, $r = 1$. De otra manera: $r = 0,35 \times \exp(0,35 \times LAI)$. Esta ecuación fue desarrollada por los autores para simplificar una serie de ecuaciones de transpiración y evaporación del suelo descritas en la documentación del modelo SWAT⁴. El producto de E_0 y r luego se somete a una función que limita la evapotranspiración en función del agua disponible (humedad del suelo que excede el punto de marchitez) en el suelo:

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

E_0 se calcula aquí utilizando el método de Priestly-Taylor; una serie de cálculos que se describen en la documentación del modelo SWAT y en el documento original sobre la evaluación del flujo de calor superficial y la evaporación utilizando parámetros a gran escala.⁵ El método de Priestly-Taylor se puede escribir de la siguiente manera:

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

donde:

α_{pet} = coeficiente (1,26)

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

$$\Delta = \frac{4098e_0}{(T + 237.3)^2}$$

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

T = temperatura media diaria en °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)

$$\gamma = \frac{0.001013P_a}{0.622\lambda}$$

P_a = presión atmosférica (kPa)

$$P_a = 101.3 - 0.01152EL + 0.544 \times 10^{-6}EL^2$$

EL = elevación (m)

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

G = densidad de flujo de calor al suelo (MJ/m²d) Esto es mínimo y para los propósitos de este documento se puede suponer que es 0.

Las ecuaciones para la radiación pueden ser complejas y para los propósitos de este documento, la radiación estará representada por ecuaciones del modelo SWAT. Estos se explican en la documentación del modelo SWAT (capítulos 1.1 y 2.2) y pueden describirse generalmente de la siguiente manera:

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

donde:

α = albedo (fracción adimensional 0-1) (Para obtener una lista de valores de albedo para diferentes tipos de terreno/vegetación, consulte la hoja de cálculo que acompaña a este documento.⁶)

H_{sw} = radiación entrante de onda corta

H_{lw} = radiación de onda larga

La radiación de onda larga como se usa en las ecuaciones del modelo SWAT es una función de la temperatura y la cobertura de nubes. Las ecuaciones múltiples que SWAT describe pueden simplificarse en una sola ecuación (desarrollada por los autores) de modo que:

$$H_{lw} = \frac{c}{0.8} \times (0.00376T^2 - 0.0516T - 6.967)$$

donde:

c = fracción de cobertura de nubes adimensional (0,3–0,8), siendo menor para cubierta de nubes densa y valores más altos para cero cobertura de nubes. Si no hay datos de cobertura de nubes disponibles, se puede usar el valor medio de 0,5.

La radiación de onda corta como se usa en las ecuaciones SWAT es una función de la latitud, el día y la cobertura de nubes. Estas ecuaciones se pueden usar como se describe en la documentación del modelo SWAT, o las simplificaciones derivadas empíricamente (desarrolladas por los autores) descritas a continuación como se pueden usar en su lugar:

$$H_{sw} = \frac{c}{0.8} (a\delta^2 + b\delta + d)$$

donde las ecuaciones dependientes de la latitud para estos coeficientes son las siguientes:

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

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

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

ϕ = latitud en grados

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

Ecuaciones de balance hídrico en qocha

El volumen de agua en una qocha se puede calcular con un balance hídrico, muy similar a las ecuaciones para calcular la humedad del suelo descritas en este marco. La diferencia entre los dos enfoques de balance de masa es que para la qocha se utilizan medidas de volumen dada la naturaleza constructiva de la cuenca de retención de agua, mientras que el balance de masa de humedad del suelo usa alturas o láminas. El cambio en el volumen de agua en la qocha se puede calcular considerando sus entradas y salidas. El volumen de agua de la qocha aumenta a través de las contribuciones de la escorrentía y la precipitación, y disminuye a través de las pérdidas por evaporación, infiltración y salidas (incluidas las extracciones) de manera que:

⁶ Gao, F., Schaaf, C. B., Strahler, A. H., Roesch, A., Lucht, W., & Dickinson, R. 2005. MODIS bidirectional reflectance distribution function and albedo Climate Modeling Grid products and the variability of albedo for major global vegetation types. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D1).



$$\Delta V = V_{in} + V_p - V_e - V_s - V_{out}$$

donde:

ΔV = cambio en el volumen de agua en la qocha (m³)

V_{in} = ingresos (m³)

V_p = precipitación (m³)

V_e = evaporación (m³)

V_s = filtración (m³)

V_{out} = salidas (m³)

El volumen de entrada se calcula tomando la lámina de esorrentía (Q) calculada para la región contribuyente y multiplicándola por el área contribuyente (ha) y un factor de conversión (10) como:

$$V_{in} = 10QA_c$$

donde:

Q = área de contribución de esorrentía (mm)

Ac = área de contribución (ha)

El volumen de precipitación se calcula tomando la lámina de precipitación (P) y multiplicándola por el área de la qocha (m²) y un factor de conversión (0,001):

$$V_p = 0,001 PA_q$$

donde:

P = lámina de precipitación (mm)

A_q = área de la qocha (m²)

El volumen de evaporación se calcula tomando la evaporación potencial (E₀) calculada para la qocha y multiplicándola por el área de la qocha (m²), un factor de conversión (0,001) y un coeficiente de evaporación (0,5, para un coeficiente combinado de 0,0005). La ecuación también incluye un modificador de área de superficie tal que el área de superficie se reduce cuando el volumen de agua qocha es menor que su capacidad de retención máxima. Es importante que E₀ se calcule por separado tanto para la región contribuyente como para la qocha misma, ya que tendrán diferentes valores de albedo. La evaporación está limitada por una función mínima para que no pueda reducir el volumen de agua en la qocha por debajo de 0. La ecuación del volumen de evaporación es la siguiente:



$$V_E = \min \left[V_{t-1} + V_{in} + V_P - V_{out}, 0,0005 E_0 A_q \left(\frac{V_{t-1}}{V_{max}} \right)^{2/3} \right]$$

donde:

E_0 = evapotranspiración potencial, qocha (mm)

V_{max} = volumen máximo de retención de qocha (m^3):

$$V_{max} = \frac{A_q D}{3}$$

D = profundidad máxima de qocha (m)

A_q = área de la qocha (m^2)

La filtración representa el agua que penetra a través del fondo de la qocha. Es este volumen de filtración el que se considera que contribuye al aumento del flujo base durante la estación seca. El volumen de filtración se calcula tomando la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) en la parte inferior de la qocha, multiplicándola por la superficie del fondo de la qocha (m^2) y un factor de conversión (0,001). Al igual que con la ecuación de evaporación, la ecuación de filtración incluye un modificador de área de tal manera que el área se reduce cuando el volumen de agua de la qocha es menor que su capacidad de retención máxima. La filtración está limitada por una función mínima para que no pueda reducir el volumen de agua de la qocha por debajo de 0. La ecuación de filtración es la siguiente:

$$V_S = \min \left[V_{t-1} + V_{in} + V_P - V_E - V_{out}, 0,001 K_{sat,q} A_q \left(\frac{V_{t-1}}{V_{max}} \right)^{2/3} \right]$$

donde:

$K_{sat,q}$ = conductividad hidráulica saturada en la qocha (mm/día)

El flujo de salida puede basarse simplemente en el volumen (de modo que cualquier volumen de agua que exceda el volumen máximo de retención de la qocha se convierte en flujo de salida) o puede basarse en extracciones diarias (definidas manualmente en la hoja de cálculo). Como es variable dependiente de un conjunto específico de circunstancias para la qocha, aquí no se define ninguna ecuación.

Al igual que el balance de humedad del suelo, este balance hídrico de volumen puede abordar múltiples pasos de tiempo considerando que $\Delta V = V_t - V_{t-1}$, donde t representa el paso de tiempo. El balance se puede reconfigurar para calcular el volumen de agua en la qocha sobre una base de tiempo de la siguiente manera:

$$V_t = V_{t-1} + V_{in} + V_P - V_E - V_S - V_{out}$$

Dado que la infiltración requiere que se calcule la evaporación, y para calcular la evaporación a su vez se requiere la escorrentía y que la precipitación ya se haya calculado, los componentes del balance hídrico de la qocha deben calcularse en el siguiente orden:

1. Calcular escorrentía y precipitación
2. Calcular volumen de evaporación
3. Calcular volumen de infiltración
4. Actualizar el volumen en la qocha



RESUMEN DEL DOCUMENTO

El proceso para calcular el área tributaria y los balances hídricos en la qocha (y sus subcomponentes) se muestran y resumen en las figuras 2 y 3, respectivamente.

Escorrentía (Q_0)	Si $>0,05 S$, entonces $Q_0 = \frac{(P-0,05S)^2}{P+0,95S}$
Percolación (p)	$p = \max (0, R_{t-1} + P - Q - fc)$
Evapotranspiración (ET_0)	Si $T > 0$, entonces $ET_0 = r \left(\frac{\alpha_{pet} \Delta}{\lambda(\Delta + \gamma)} \right) [(1-\alpha)H_{sw} + H_{lw}]$ $ET = \min[ET_0 \times r, 0,8(R_{t-1} + P - Q - p - wp)]$
Balance hídrico	$R_t = R_{t-1} + P - Q - ET - p$
Área de entrada (V_Q, V_P)	$V_{in} = 10QA_c$ $V_P = 0,001PA_q$

Figura 2. Pasos de cálculo y ecuaciones para el balance hídrico del área tributaria

Evaporación (V_E)

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

$$V_E = \min \left[V_{t-1} + V_{in} + V_P - V_{out}, 0,0005 E_0 A_q \left(\frac{V_{t-1}}{V_{max}} \right)^{2/3} \right]$$

Infiltración (V_S)

$$V_S = \min \left[V_{t-1} + V_{in} + V_P - V_E - V_{out}; 0,001 K_{sat,q} A_q \left(\frac{V_{t-1}}{V_{max}} \right)^{2/3} \right]$$

Balance hídrico

$$V_t = V_{t-1} + V_{in} + V_P - V_E - V_S - V_{out}$$

Figura 3. Pasos de cálculo y ecuaciones para el balance hídrico de qocha

El beneficio en términos de contribuciones a la qocha al flujo base se puede calcular sumando la infiltración (V_S) en todos los pasos de tiempo para el escenario de intervención.



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 beneficiado de 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).



APÉNDICE: ECUACIONES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las ecuaciones descritas aquí se sugieren para considerar la cuantificación de las contribuciones del acuífero poco profundo que podría fluir hacia la qocha. El agua en el acuífero profundo puede fluir hacia las aguas superficiales fuera del área de intervención que se cuantifica. Este documento no intenta calcular cuándo y dónde el agua profunda del acuífero volverá a la superficie, pero es importante recordar que esta agua no debe considerarse una pérdida.

El flujo del agua subterránea es un proceso complejo y se representa aquí usando un par de ecuaciones: una que actualiza la altura del nivel freático durante cada paso de tiempo⁷, y otra que calcula el flujo de agua subterránea en función a la altura del nivel freático⁸. La altura del nivel freático aumenta a partir del agua infiltrada del área tributaria, y disminuye a partir de la salida del flujo del agua subterránea hacia el humedal/qocha. El flujo de agua subterránea es una función de la conductividad hidráulica del acuífero y la altura del nivel freático. Estas ecuaciones se describen aquí:

$$h_t = h_{t-1} + \frac{ap - Q_{gw}}{800\mu}$$

donde:

h = altura del nivel freático (m)

a = fracción del acuífero de la región contribuyente que contribuye a la qocha (sin unidades)

p = percolación (mm)

Q_{gw} = flujo de agua subterránea (mm)

μ = rendimiento específico del acuífero (m/m)

$$Q_{gw} = \frac{8000K_{sat,a} h_{t-1}}{L}$$

donde:

$K_{sat,a}$ = conductividad hidráulica saturada del acuífero (mm/día)

L = coeficiente de distancia de trayectoria del agua (m2):

$$L = \frac{10000aA_c}{\pi}$$

L debe ser mayor que

$$\frac{10K_{sat,a}}{\mu}$$

para que funcionen las ecuaciones del agua subterránea

A_c = área tributaria (ha)

La ecuación para h_t es calculada diariamente, al igual que los balances hídricos para R_t y V_t (ver la hoja de cálculo que acompaña al documento para valores recomendados de K_{sat} y μ). La fracción de un acuífero regional que contribuye a la qocha (a) es probable que sea muy variable. En ausencia de mediciones de campo que puedan usarse para calibrar a , se sugiere que el marco para qocha se aplique utilizando un rango de valores de a para calcular un rango de resultados potenciales.

El volumen diario de agua subterránea se puede insertar en una proporción de entrada a la qocha para su balance sumándolo con la esorrentía de la región de contribución, de la siguiente manera:

$$V_{in} = 10(Q + Q_{gw})A_c$$

⁷ Smedema, L.K. and D.W. Rycroft. 1983. Land drainage – planning and design of agricultural drainage systems. Cornell University Press, Ithica, N.Y.

⁸ Hooghoudt, S.B. 1940. Bijdrage tot de kennis van enige natuurkundige grootheden van de grond. Versl. Landbouwk. Onderz. 46: 515-707.



Qochas: Evaluación de los beneficios potenciales en la cantidad de agua

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.