

Servicios ecosistémicos hídricos de los pajonales altoandinos: ¿Qué sabemos?



Giovanny M. Mosquera, Franklin Marín, Margaret Stern,
Vivien Bonnesoeur, Boris F. Ochoa-Tocachi,
Francisco Román-Dañobeytia.

AUTORES:

Giovanny M. Mosquera (1), Franklin Marín (2), Margaret Stern (3,4), Vivien Bonnesoeur (4,5), Boris F. Ochoa-Tocachi (4,6,7), Francisco Román-Dañobeytia (4,5).

- 1 Universidad San Francisco de Quito USFQ, Ecuador.
- 2 Universidad de Cuenca. Cuenca, Ecuador.
- 3 EcoDecisión, Quito, Ecuador.
- 4 Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA). Lima, Perú.
- 5 Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). Lima, Perú.
- 6 ATUK Consultoría Estratégica. Cuenca, Ecuador.
- 7 Forest Trends, Lima Perú.

Foto carátula: Héctor Armando Arrunátegui Ochoa. Concurso "Naturaleza que Cuida".

MENSAJES CLAVE

-  1 Los páramos, las punas y las jalcas son los ecosistemas dominados por pajonales en la región andina. Estos son los principales proveedores de servicios ecosistémicos hídricos que requieren conservación y restauración para garantizar la seguridad hídrica de los países andinos.
-  2 La literatura científica destaca la importancia de los pajonales para facilitar la infiltración de agua al suelo, reducir los procesos erosivos y favorecer el rendimiento y la regulación hídrica mediante la recarga de reservorios de agua subsuperficial y subterránea.
-  3 La forestación, el pastoreo, la quema y la agricultura son las principales prácticas que afectan su funcionamiento hidrológico.
 - a. La forestación con pinos en páramos reduce (-35%) el almacenamiento de agua en los suelos e impacta negativamente el rendimiento y la regulación de caudales en páramos, jalcas y punas.
 - b. Los efectos del pastoreo y la agricultura en la función hidrológica de los pajonales altoandinos no son concluyentes ya que dependen de las condiciones históricas de manejo de la vegetación y el suelo, como el tipo de ganado y la carga animal o el cultivo y las prácticas implementadas.
-  4 En pajonales altoandinos, los estudios sobre la restauración han sido de corto plazo y no se ha identificado el tiempo requerido para observar cambios hidrológicos favorables. Datos provenientes de pajonales en la meseta tibetana, considerados como un símil de los altoandinos, sugieren que se requiere más de cinco años para observar dichos impactos.
-  5 Las punas húmedas y secas cubren la mayor extensión geográfica en la región, constituyendo el 85% del área de todos los pajonales altoandinos. Sin embargo, fueron el objetivo de solamente el 6% de los estudios revisados sobre hidrología de pajonales altoandinos. Las mayores brechas de conocimiento recaen en los procesos hidrológicos de las punas, las jalcas y los páramos secos, y en los impactos que producen los cambios de uso del suelo en estos ecosistemas. Esta situación limita la capacidad de extrapolar los resultados de los pajonales más estudiados, los páramos ecuatorianos, a otros ecosistemas de pajonales altoandinos.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica.



I. Introducción

En los Andes tropicales, los pajonales —generalmente dominados por los géneros *Calamagrostis*, *Festuca* y *Stipa*— se presentan ampliamente a altitudes entre los 3000 y los 5000 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.), en los ecosistemas denominados *páramos*, *jalcas*, *punas húmedas* y *punas secas* (Figura 1)¹. Ecológicamente, la flora de los páramos es la más diversa de todos los ecosistemas de montaña del mundo y forma parte del reconocido *hotspot* de biodiversidad de los Andes tropicales^{2,3}. Hidrológicamente, estos ecosistemas dominados por pajonales recolectan, almacenan y suministran el agua que suple las necesidades domésticas, agrícolas, de riego, hidroeléctricas y recreativas en la región⁴⁻⁷. En las cuencas de la vertiente del Pacífico del Perú, donde vive el 65 % de la población nacional, los ecosistemas dominados por pajonales altoandinos ocupan solo una quinta parte de la superficie de ellas, pero reciben más de la tercera parte del total de la lluvia¹. Por lo tanto, el agua producida por estos ecosistemas es de suma importancia para el desarrollo socioeconómico de los países ubicados en el norte y centro de la cordillera de los Andes⁹.

El cambio de uso del suelo ha ocurrido a lo largo de miles de años en la región altoandina de los Andes tropicales¹⁰. Los pajonales naturales han servido principalmente para el pastoreo de ganado y el cultivo de alimentos, mientras que los incendios asociados a dichas actividades representan el impacto humano más significativo en estos ecosistemas¹¹. Durante las últimas décadas, fuertes cambios en la actividad ganadera se han generado localmente, ya sea en el tipo de ganado o debido al incremento del sobrepastoreo, como en los pajonales de punas secas en Bolivia, donde la carga de llamas y alpacas se ha triplicado¹². La forestación en pajonales andinos, particularmente con especies exóticas de pino y eucalipto, también ha contribuido a cambios en la cobertura del suelo de las zonas altas¹³. Tanto las agencias gubernamentales como las empresas privadas han promovido la forestación con pino en los ecosistemas de pajonales altoandinos,

con argumentos cuestionables y una aceptación social significativa a causa de su potencial provisión de numerosos servicios ambientales: producción de madera, captura y almacenamiento de carbono, regulación de crecidas, y control de la erosión¹⁴. Programas públicos han promovido, también, las zanjas de infiltración, realizadas en su mayoría en ámbitos de pajonales altoandinos, con la expectativa de aumentar la infiltración de agua en el suelo, reducir la erosión y mejorar la regulación hídrica¹⁵.

Las actividades humanas han producido cambios en el uso y cobertura del suelo de los pajonales naturales que impactan la provisión de servicios ecosistémicos hídricos, pero no se sabe mucho acerca del tipo o grado de los impactos, ni acerca del impacto hidrológico de prácticas de restauración de los pajonales. El limitado conocimiento de la ecohidrología (relaciones e interacciones entre procesos hidrológicos y ecológicos) de los pajonales andinos, especialmente en condiciones de degradación, fragmentación y conversión, obstaculiza los esfuerzos de varias instituciones interesadas en la gestión sostenible de estos ecosistemas, como las empresas de agua que requieren proporcionar un suministro de agua confiable a los usuarios aguas abajo.

Para mejorar la situación descrita, este documento presenta los principales resultados de una revisión sistemática de literatura relativa al funcionamiento hidrológico de los pajonales altoandinos en los Andes tropicales, así como de los impactos del cambio de uso del suelo y los efectos de las prácticas de restauración en dicho funcionamiento¹⁶. La síntesis y evaluación de información existente son indispensables para guiar la toma de decisiones con base en la información científica disponible y, además, identificar temas y regiones donde el conocimiento insuficiente limita una apropiada gestión de los recursos hídricos.

¹ Estimación propia a partir de la serie de tiempo de precipitación PISCO del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú⁸ y del mapa de ecosistemas del Perú (MINAM, 2018).

Figura 1: Distribución espacial de los ecosistemas de pajonales altoandinos (páramos, punas húmedas, jalcas y punas secas) y las características climáticas de algunos sitios en los países andinos tropicales. Las cruces muestran los sitios donde se han llevado a cabo estudios sobre la hidrología de los pajonales altoandinos en la región estudiada.

Precipitación anual (mm) ■ Evapotranspiración de referencia anual (mm) ■

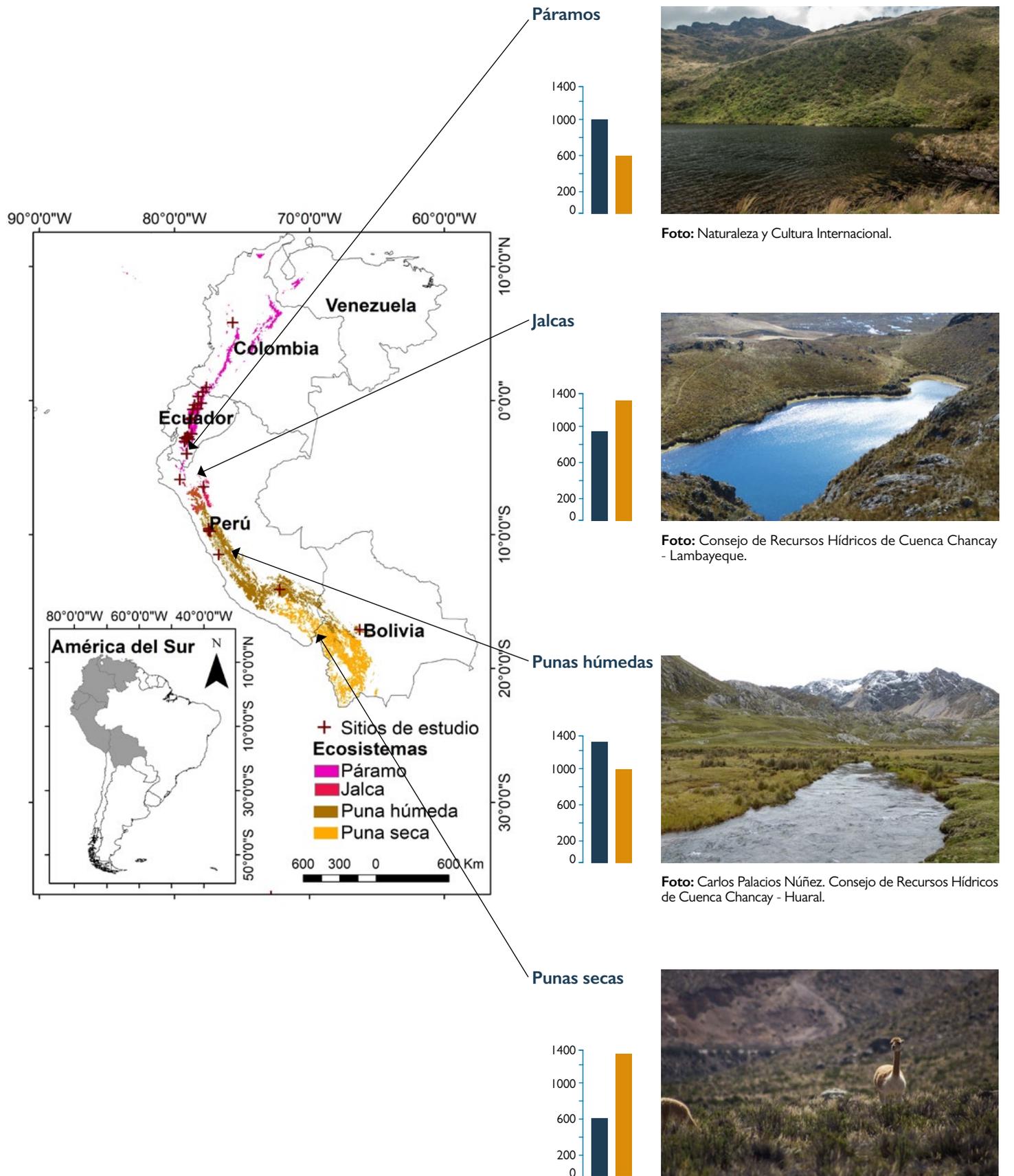


Foto: Naturaleza y Cultura Internacional.

Foto: Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Chancay - Lambayeque.

Foto: Carlos Palacios Núñez. Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca Chancay - Huaral.

Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica.

Fuente: Adaptado de Mosquera, et al. (2022).

Figura 2: Resumen de los 38 estudios revisados sobre hidrología de pajonales altoandinos en los Andes tropicales. La cantidad de estudios para cada parámetro esta indicada en los círculos.

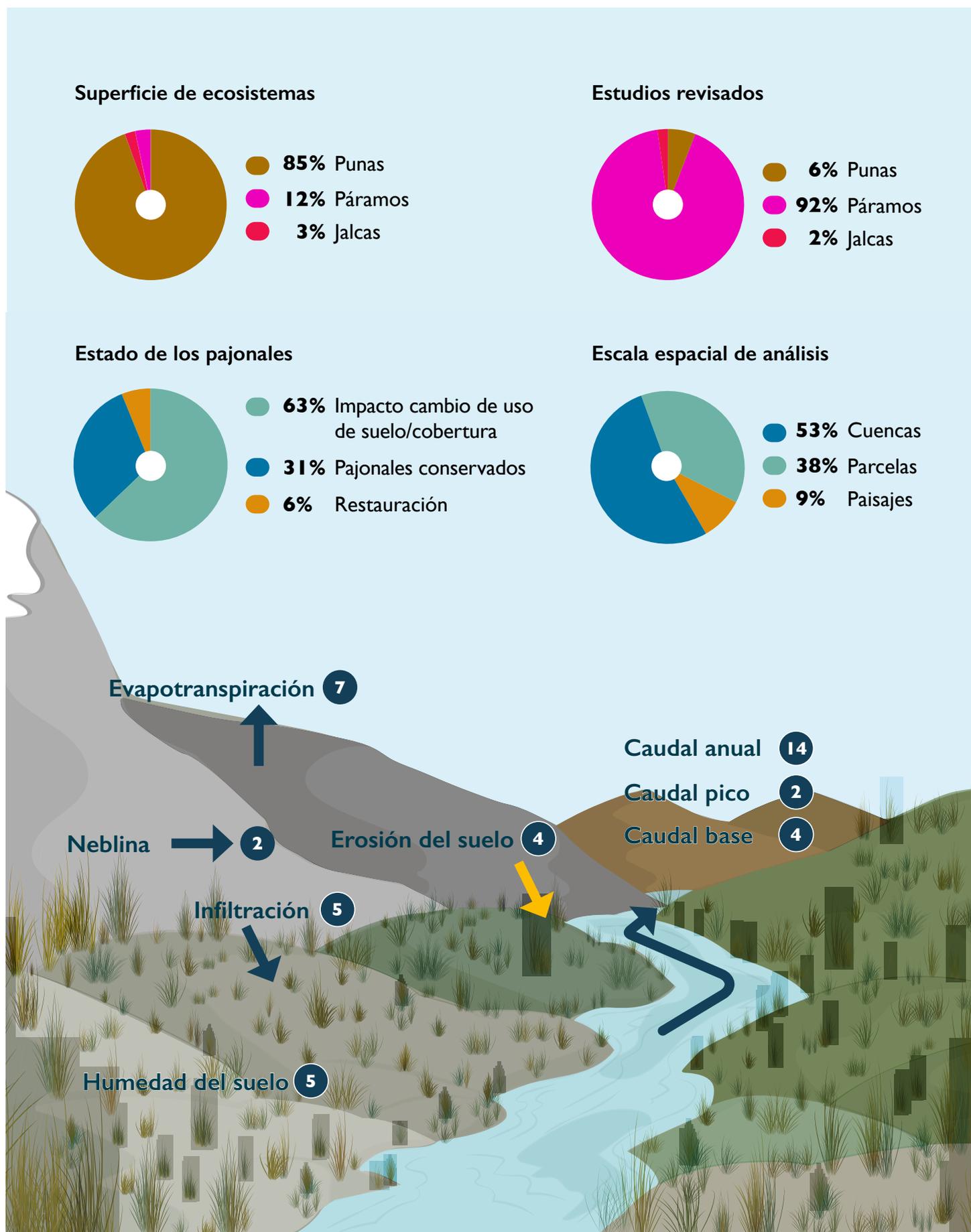
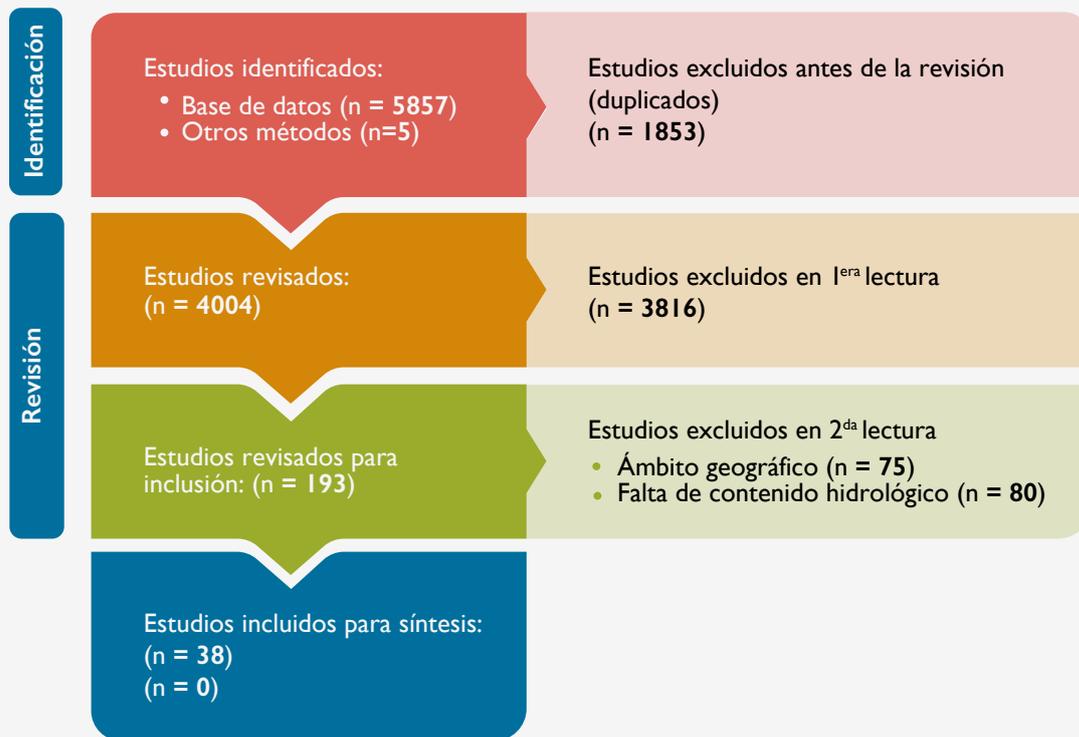




Figura 3: Flujo de revisión y selección de los estudios durante la revisión sistemática



Fuente: Adaptado de Mosquera, et al. (2022).



Foto: Ana Castañeda



2. Métodos

Se presenta a continuación un breve resumen de la metodología de revisión sistemática de literatura empleada, que se describe en detalle en el artículo de Mosquera et al., 2022¹⁶. Se definió una lista de términos de búsqueda en inglés y español relacionados con la prestación de los servicios ecosistémicos hídricos de interés de los pajonales altoandinos en los Andes tropicales. Dichos términos se agruparon en cuatro categorías: 1) cobertura del suelo (p. ej., pajonal, pastizal²); 2) entorno geográfico; 3) procesos hidrológicos;

y 4) servicios ecosistémicos hídricos y actividades humanas (p. ej., producción de agua, regulación del caudal, control de la erosión, pastoreo, cultivo, quema, forestación). De los más de 4000 estudios encontrados inicialmente, se filtraron los más relevantes para desarrollar una evaluación cualitativa del conocimiento (Figura 2). En el caso de la humedad del suelo, se hallaron suficientes datos para analizar cuantitativamente tanto los impactos de la forestación con pino como los del pastoreo de ganado.

Tabla 1: Cambio porcentual relativo en el contenido de humedad del suelo debido a la restauración de pajonales altoandinos degradados en la Cordillera Blanca, Perú, y la meseta tibetana.

Región	Experiencia de restauración	Duración de la restauración (años)	Incremento del contenido de humedad de suelo (%)
Cordillera Blanca, Perú	Exclusión de ganado; revegetación con <i>Festuca sp.</i> y <i>Calamagrostis sp.</i> ; adición de materia orgánica	1 año	+8.9%
Cordillera Blanca, Perú	Exclusión de ganado; Surcos y hoyos	2 años	+4%
Meseta Tibetana	15 sitios principalmente con exclusión de ganado	Entre 1 y 5 años	+2% (± 28%) ³
Meseta Tibetana	10 sitios principalmente con exclusión de ganado	Entre 5 y 39 años (promedio = 11 años)	+36% (± 33%) ³

² Si bien los humedales altoandinos pertenecen a los ecosistemas de punas, jalcas y páramos e interactúan con los pajonales, no son dominados por gramíneas. Esta palabra, entonces, no fue seleccionada como término de búsqueda.

³ Desviación estándar, muestra la incertidumbre alrededor del valor promedio.



3. Resultados

Se identificaron 38 estudios relacionados con la hidrología de pajonales altoandinos tropicales. En este resumen se presenta el análisis de los resultados.

3.1 Distribución geográfica y temática de la información disponible

La distribución espacial de los ecosistemas de pajonales altoandinos y los sitios de estudio donde se han desarrollado las investigaciones existentes se presentan en la Figura 1, mientras que en la Figura 2 se muestra un resumen del enfoque y las variables hidrológicas investigadas en dichos estudios.

Principales hallazgos

- La mayor parte de las investigaciones (92 %) se han llevado a cabo en los ecosistemas de páramos y, en particular, en los páramos del sur del Ecuador (79 % de los sitios investigados).
- Los parámetros hidrológicos más estudiados en los ecosistemas de pajonales altoandinos son el rendimiento hídrico anual (29 %), la humedad del suelo (21 %) y la evapotranspiración (15 %).
- Los temas más investigados en los ecosistemas de pajonales altoandinos son los impactos hidrológicos del cambio de uso o cobertura del suelo (63 %) y sus funciones hidrológicas en condiciones naturales (31 %). Mucha menos atención se ha brindado a la restauración de dichas funciones (6 %).
- La mayor parte de las investigaciones se han efectuado a escala de cuenca (53 %) y de parcela (38 %). Otras escalas (puntual y de paisaje) representan apenas el 9 % de los estudios.

Vacíos de conocimiento

- Un resultado crítico de este análisis regional de la literatura es el conocimiento hidrológico limitado sobre las punas peruanas y bolivianas (solo el 6 % de los estudios), a pesar de que representan los pajonales altoandinos más extensos en los Andes tropicales: si se toma en cuenta solo el Perú, cubren el 13 % del territorio nacional y el 51 % de los ecosistemas andinos³.
- En general, la escasa cantidad de información limita la capacidad de extrapolar resultados desde los páramos del sur del Ecuador o norte del Perú a los ecosistemas de jalcas o punas.
- Existen pocos estudios sobre la captura de neblina, la regulación de caudales (incluidos caudales extremos), la infiltración de agua y la erosión del suelo (Tabla 1).

³ Mapa Nacional de Ecosistemas del MINAM (2018).



Foto: Flor Ortiz Contreras.

3.2 Función hidrológica de los pajonales altoandinos conservados

La comprensión de la función hidrológica en condiciones de conservación ha aumentado en las últimas décadas, en particular para los páramos andinos. Se describen a continuación los principales hallazgos y vacíos de conocimiento identificados.

3.2.1 Flujos de agua entre la vegetación y la atmósfera

La evapotranspiración y la captura de precipitación horizontal (o neblina) están entre los principales procesos que influyen en el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas montaños tropicales a través de los flujos de agua y energía en las relaciones vegetación-atmósfera. Este componente del balance hídrico ha sido uno de los principales focos de investigación en los Andes tropicales, principalmente en los páramos del Ecuador. ^{17,18}

Principales hallazgos

- Las pérdidas de agua mediante la evapotranspiración representan el 51 % de la precipitación anual en los pajonales de páramos ¹⁷, un valor por lo general más bajo que los reportados para pajonales en otras zonas montañosas del mundo.
- La evapotranspiración real⁴ en los Andes tropicales, principalmente en los páramos del Ecuador representa entre el 78 y el 90 % de la evapotranspiración de la cobertura vegetal de referencia (coeficiente de cultivo alto en relación con otras plantas herbáceas) ¹⁷.
- La evaporación de la precipitación interceptada por la vegetación del dosel representa la mayor parte del flujo de evapotranspiración de los pajonales de páramos ¹⁹.

Vacíos de conocimiento

- Aparte de los páramos del Ecuador, la evapotranspiración, el coeficiente de cultivo y la capacidad de almacenamiento de agua de otros pajonales altoandinos —en particular, en las regiones más secas y estacionales de los Andes tropicales— aún no han sido cuantificados.
- Se ha prestado poca atención al papel de los pajonales altoandinos en la captura de neblina y su influencia en el balance hídrico en todos los ecosistemas de pajonal a lo largo de los Andes tropicales.

⁴ El término evapotranspiración real (ETR) se refiere a la cantidad de agua que podría evaporarse y transpirarse hacia la atmósfera, dependiendo de las disponibilidades de agua, el tipo de vegetación y la humedad del suelo, a diferencia de la evapotranspiración de referencia (ET_o), que supone disponibilidad de agua ilimitada, un tipo estándar de vegetación y sin estrés hídrico en el suelo.



Foto: Jonathan Juan Chancasana Villacorta.

3.2.2 Provisión anual de agua y regulación de caudal

La provisión anual de agua (indicador del rendimiento hídrico) y la regulación de caudales están entre los servicios ecosistémicos hídricos más importantes que brindan los pajonales altoandinos^{4,9,20}. Las características físicas de la vegetación —en particular, la distribución y densidad de las raíces— influyen en la capacidad de infiltración del agua en los suelos²¹. Esta última capacidad y las propiedades intrínsecas del suelo (p. ej., textura, densidad aparente, estructura) controlan a su vez la dinámica del transporte de agua y los mecanismos de mezcla de agua en el subsuelo²².

Principales hallazgos

- La alta capacidad de infiltración de los suelos cubiertos por pajonales, en relación con la típica baja intensidad de precipitación medible en los ecosistemas altoandinos (compuesta principalmente de llovizna), reduce la ocurrencia de flujo superficial^{23–25} y, por lo tanto, disminuye la incidencia de procesos de erosión del suelo.
- Los pajonales de páramos sobre suelos volcánicos generan una infiltración homogénea de agua en el suelo^{22,26}, lo que, en combinación con el alto contenido de materia orgánica y la porosidad de los suelos volcánicos, favorece el movimiento vertical del agua en el suelo.
- Los pajonales altoandinos permiten la recarga continua de los humedales andinos (bofedales) y se conectan hidrológicamente a la red de drenaje durante tormentas de lluvia en cuencas de páramos con pequeñas contribuciones de agua subterránea^{27–29}. En este sentido, la interacción entre pajonales y humedales es fundamental para la producción y regulación del agua que llega a los ríos y, por ende, para la conservación de los ecosistemas y la provisión de servicios ecosistémicos hídricos.

Vacíos de conocimiento

- No existen estudios sobre la capacidad de infiltración de los suelos de pajonales altoandinos en las punas y jalcas, así como en suelos no volcánicos en los páramos.
- De forma similar, aunque hay información acerca del rendimiento hídrico (es decir, la relación entre el caudal y la precipitación anual) para cuencas de jalcas, punas húmedas y punas secas³⁰, todavía se ignora el funcionamiento hidrológico de dichos ecosistemas, que presentan condiciones climatológicas, edafológicas y geológicas particulares.
- El limitado monitoreo hidrológico en las punas y jalcas no permite caracterizar de mejor manera sus diferencias y similitudes hidrológicas en relación con los páramos y los impactos producidos por cambios en el uso del suelo. Se espera que las punas y jalcas, en condiciones naturales, muestren una respuesta hidrológica similar a los páramos, siendo su principal diferencia el efecto producido por la estacionalidad (estaciones de lluvias y seca muy marcadas en las punas y casi inexistentes en los páramos).



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica

3.3 Impactos del cambio de uso del suelo en la hidrología de los pajonales altoandinos

Comprender la manera en que los cambios de uso del suelo afectan funciones esenciales como la infiltración de agua, la producción y regulación de caudal y la erosión del suelo, es crucial para un adecuado manejo, conservación y restauración de los pajonales altoandinos. En los Andes tropicales se ha incrementado el conocimiento acerca de los impactos del cambio de uso del suelo (p. ej., forestación, pastoreo y agricultura) en el comportamiento hidrológico de los pajonales, en especial en los páramos ecuatorianos.

3.3.1 Forestación

Principales hallazgos

- La forestación con pinos produce una alta reducción del contenido de humedad del suelo en condiciones de campo (-35 %, en promedio, en comparación con los pajonales conservados). A pesar de este consenso, la magnitud de ese impacto también dependerá de factores relacionados con las condiciones históricas y las prácticas de manejo, como el tipo de plantación, la densidad de árboles y la frecuencia de aprovechamiento forestal³¹.
- Cuatro investigaciones reportaron que la forestación con pinos reduce hasta en 50 %³² el rendimiento hídrico de cuencas ubicadas en diferentes ecosistemas altoandinos dominados por pajonales a lo largo de los Andes tropicales (páramos, jalcas y punas), así como la producción de flujos base^{30,33,34}.
- Los impactos hidrológicos negativos de la forestación con pinos se atribuyen, sobre todo, al aumento en la evapotranspiración de los árboles en comparación con los pajonales.

Vacíos de conocimiento

- El impacto hidrológico de la forestación con otras especies exóticas (p. ej., eucalipto) y nativas continúa siendo limitado en ecosistemas dominados por pajonales altoandinos. Un solo estudio ha evaluado ese impacto con especies nativas y ha reportado que la plantación de bosque nativo (Polylepis o “queñual”) reduce ligeramente la humedad del suelo³⁵.
- No existen estudios acerca de los efectos de la forestación en la capacidad de infiltración de agua en el suelo, ni de esos efectos en los procesos de erosión, en ninguno de los ecosistemas de pajonales altoandinos.



Foto: Deivis Anderson Castro Toro.

3.3.2 Pastoreo

Principales hallazgos

- Aunque los estudios sobre los impactos del pastoreo en la erosión de los suelos son escasos, la información disponible sugiere que el sobrepastoreo produce altas tasas de erosión en comparación con los pajonales conservados de los páramos del Ecuador³⁶.
- A escala regional, si bien el pastoreo no cambia en forma significativa la provisión anual de agua, se ha reportado que afecta sobre todo a la regulación hidrológica, en particular la rapidez de respuesta, la magnitud de las crecidas y la recesión de los caudales luego de eventos de lluvia en los páramos, las jalcas y las punas³⁰.

Vacíos de conocimiento

- No hay estudios sobre los impactos del pastoreo en la erosión del suelo de los pajonales altoandinos de las punas y las jalcas, y son escasos en los páramos.
- Tampoco existen investigaciones sobre los efectos hidrológicos del pastoreo por camélidos en todos los ecosistemas de pajonales altoandinos de los Andes tropicales.

Controversia

- Los impactos del pastoreo de ganado vacuno en la hidrología de los pajonales de los páramos en Ecuador y Colombia han mostrado efectos contrastantes, desde fuertes reducciones hasta incrementos en la humedad del suelo^{23,31,37} y el caudal^{30,33}.
- La información disponible sugiere que la dirección y la magnitud de dichos impactos dependen de las condiciones antecedentes de uso y manejo de la vegetación y el suelo —como la densidad animal, la especie de ganado o las prácticas de rotación de ganado— en los sitios de estudio, y que, por lo tanto, se deben evitar las generalizaciones entre diferentes sitios y regiones³¹. Una carga animal muy alta (sobrepastoreo) podría provocar respuestas hidrológicas más rápidas y menos amortiguadas que sitios con carga animal menor³⁰.



Foto: Elio Munzon Zevallos Meza.

3.3.3 Agricultura

Principales hallazgos

- Estudios sugieren que, si bien los cultivos de papas no afectan la capacidad de producción de agua de los páramos, sí reducen su capacidad de regulación hidrológica^{4,32,33}, y hay evidencia de caudales de crecida más altos y caudales de estiaje más bajos.
- A escala regional, se ha reportado que los cultivos afectan todo el rango de caudales, en particular los flujos bajos, con independencia del ecosistema (páramos, jalcas y punas)³⁰.
- Estos resultados sugieren que, de manera similar al pastoreo, es esencial considerar el historial de manejo del suelo para determinar los impactos del cultivo, como el tipo de cultivo y el uso de prácticas de irrigación o drenaje en la producción y regulación de agua.
- La evidencia disponible sugiere que la degradación de los pajonales de páramos en el centro-norte del Ecuador —a causa de la labranza y las quemas que eliminan por completo la cobertura vegetal— reduce de manera sustancial la infiltración de agua en los suelos volcánicos^{24,25}.
- Diferentes investigaciones realizadas en cuencas andinas ecuatorianas han reportado un aumento en la tasa de erosión de suelos en páramos afectados por el cultivo de papas, en comparación con zonas conservadas, en donde no existe erosión del suelo, incluso con topografía pronunciada^{24,38}.

Vacíos de conocimiento

- A pesar de los hallazgos antes mencionados, la limitada información no permite llegar a conclusiones robustas sobre el efecto de las prácticas y actividades relacionadas con la agricultura para los pajonales de los páramos altoandinos.
- Se carece de información sobre los impactos de la agricultura en la infiltración de agua y los procesos erosivos en zonas de punas y jalcas.
- Faltan estudios acerca del impacto de diferentes tipos y prácticas de cultivo en los servicios ecosistémicos hídricos en los diferentes ecosistemas de pajonales altoandinos.

3.3.4 Quemadas

Posible

- Las quemadas o incendios en los ecosistemas altoandinos se relacionan estrechamente con las prácticas de pastoreo y agricultura en los Andes tropicales. A pesar de que las quemadas controladas y no controladas en dichos pajonales son recurrentes, aún se desconocen sus impactos en la evapotranspiración, la infiltración, la humedad del suelo y la producción y regulación de los caudales. Esta situación representa una brecha de conocimiento importante si se consideran los graves efectos de degradación que pueden generarse, como se reportó hace poco en los pastizales subtropicales del centro de Argentina, donde los caudales base se redujeron en forma sustancial durante la estación seca debido a las quemadas³⁹.



3.4 Restauración de los pajonales altoandinos

Existe poca información científica en torno a la recuperación de los servicios ecosistémicos hídricos luego de la restauración de los pajonales altoandinos, lo que hace difícil dar respuesta a una pregunta clave sobre la gestión del suelo y el agua: ¿cuál es el periodo de restauración necesario para recuperar las funciones hidrológicas de los pajonales altoandinos degradados? Para una mejor comprensión de este tema relevante, se recopilieron datos de investigaciones realizadas en la meseta tibetana^{40,41}, otra área montañosa del mundo en donde también dominan pajonales y que se caracteriza por una fuerte estacionalidad de la precipitación a lo largo del año, con grandes variaciones diurnas de temperatura, de manera similar a las características climáticas de las punas secas y los páramos secos.

Principales hallazgos

- Estudios de restauración realizados por periodos menores de dos años en los pajonales degradados de la Cordillera Blanca, en el centro-norte del Perú, evidenciaron que la revegetación con gramíneas nativas (*Festuca humilior* y *Calamagrostis macrophylla*), combinada con la adición de materia orgánica y la exclusión del ganado, fue ligeramente más eficiente en mejorar las condiciones hidrológicas de los suelos (infiltración y humedad del suelo) que las técnicas de surcos y hoyos, combinadas con la exclusión del ganado^{42,43}. No obstante, los periodos de análisis relativamente cortos no permiten generar conclusiones robustas acerca del efecto de medidas de restauración en las funciones hidrológicas de los pajonales altoandinos.
- Periodos de restauración de más de cinco años se requirieron para aumentar de manera sustancial el contenido de humedad del suelo (+36 %, en promedio, con respecto a pajonales sin recuperación) de los pajonales degradados en la meseta tibetana (Tabla 1). Este hallazgo podría explicar la antes mencionada falta de mejoramiento en las funciones hidrológicas luego de la restauración de los pajonales altoandinos durante un periodo más corto.

Vacíos de conocimiento

- La carencia de evaluaciones a mediano y largo plazo en torno al efecto de las prácticas de restauración en la función hidrológica limita la capacidad de determinar los periodos requeridos para asegurar la recuperación de la función hidrológica de los suelos bajo pajonales degradados.
- No existen estudios relacionados con la recuperación de otras funciones hidrológicas de los pajonales altoandinos, como la producción y regulación de caudales y la erosión del suelo.



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica.

RECOMENDACIONES



Utilizar técnicas de monitoreo que han dado lugar a resultados robustos en ecosistemas altoandinos. El conocimiento acerca del funcionamiento hidrológico ha sido obtenido principalmente en los ecosistemas de páramos. Varios de estos estudios presentan información sobre técnicas de monitoreo de bajo costo, fácil acceso y a corto plazo que permiten obtener información de alta calidad y que podrían ser usadas en las punas y jalcas.



Evaluar las hipótesis generadas a partir de la información disponible. La mayoría de las investigaciones se han realizado en páramos y pueden permitir la generación de hipótesis sobre las cuales se basen futuros estudios en los ecosistemas menos investigados de punas y jalcas o, incluso, en páramos con diferentes condiciones climatológicas, edafológicas y geológicas.



Evaluar diferentes tipos de prácticas de restauración de pajonales degradados. En vista de que, por el momento, la información relativa a la recuperación de pajonales altoandinos degradados en los Andes tropicales es prácticamente nula, es urgente considerar y evaluar alternativas para restaurar el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas degradados. Entre las viables, pueden considerarse la exclusión parcial o total del ganado, la restauración con la siembra de especies de pajonales y arbustos nativos, la adición de materia orgánica, así como la combinación de diferentes técnicas.



Implementar sistemas de monitoreo a mediano y largo plazo. Un principal factor limitante para la evaluación, tanto de las prácticas de restauración de los pajonales altoandinos en las propiedades hidráulicas de los suelos como de los impactos de prácticas como la forestación o el pastoreo, es la corta duración de los periodos de monitoreo, considerando que los efectos de dichas intervenciones pueden ser más severos a medida que aumenta el tiempo. Por ello, es recomendable llevar a cabo estudios a mediano y largo plazo que permitan evaluar los periodos más adecuados de restauración de pajonales degradados, así como el cambio en los efectos de las prácticas antrópicas (incluyendo el cambio climático) en el funcionamiento hidrológico de los pajonales altoandinos.



Prohibir la forestación con pinos u otras especies exóticas para proyectos de regulación hídrica en ámbitos de pajonales altoandinos relativamente bien conservados. Hay consenso científico en cuanto a los efectos negativos de las especies de rápido crecimiento y especies exóticas (como pinos o eucaliptos) en la provisión de caudal y la regulación hídrica. Si bien pueden existir otros propósitos para la forestación, en este caso es muy importante informar acerca de probables impactos hidrológicos negativos. Las consecuencias de la forestación con especies nativas (p. ej., *Polylepis sp.*) son todavía desconocidas y se requiere de más investigaciones al respecto.



Desarrollar adecuadas prácticas de pastoreo que no comprometan la provisión de servicios ecosistémicos hídricos como la regulación hídrica o la mitigación de la erosión hídrica. La actividad ganadera y el pastoreo son importantes en la economía rural de los Andes tropicales. La práctica de estas actividades, siempre que sea con una carga animal razonable, no tiene por qué producir una degradación de los ecosistemas de pajonales altoandinos. El sobrepastoreo o las prácticas de quema de pajonales son potencialmente mucho más dañinas, aun cuando futuras investigaciones deban confirmar esto en ecosistemas poco estudiados, como las punas y las jalcas.

REFERENCIAS

La principal fuente de referencia de este resumen de políticas es la que se indica en **negrita**

- 1 Josse, C. et al. *Ecosistemas de los Andes del norte y centro (Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela)*. Mapa y memoria técnica. Secretaría General de la Comunidad Andina, Programa Regional ECOBONA-Intercooperation, CONDESAN-Proyecto Páramo Andino, Programa BioAndes, EcoCiencia, NatureServe, IAvH, LTA-UNALM, ICAEULA, CDC-UNALM, RUMBOL SRL. Lima (2009).
- 2 Luteyn, J. L. "Páramos: a checklist of plant diversity, geographical distribution and botanical literature". *Memoirs of the New York Botanical Garden* **84**, (1999).
- 3 Young, B. E. et al. *Ecosystem profile: tropical Andes biodiversity hotspot*. (2015).
- 4 Buytaert, W. et al. "Human impact on the hydrology of the Andean páramos". *Earth-Science Reviews* **79**, 53-72 (2006).
- 5 Correa, A. et al. "A concerted research effort to advance the hydrological understanding of tropical páramos". *Hydrological Processes* hyp.13904 (2020).
- 6 Madrigal-Martínez, S. & Miralles i García, J. L. "Land-change dynamics and ecosystem service trends across the central high-Andean puna". *Scientific Reports* **9**, 9688 (2019).
- 7 Rolando, J. L. et al. "Key ecosystem services and ecological intensification of agriculture in the tropical high-andean puna as affected by land-use and climate changes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **236**, 221-233 (2017).
- 8 Aybar, C. et al. "Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day". *Hydrological Sciences Journal* **65**, 770-785 (2020).
- 9 Célleri, R. & Feyen, J. "The hydrology of tropical andean ecosystems: importance, knowledge status, and perspectives". *Mountain Research and Development* **29**, 350-355 (2009).
- 10 Young, K. R. "Andean land use and biodiversity: humanized landscapes in a time of change". *Annals of the Missouri botanical garden*. **96**, 492-507 (2009).
- 11 White, S. "Grass páramo as hunter-gatherer landscape". *The Holocene* **23**, 898-915 (2013).
- 12 Aguilar, L. B. P. *Effects of grazing and fire on herbaceous species in the Bolivian altiplano*. University of Basel (2012).
- 13 Farley, K. A. "Grasslands to tree plantations: forest transition in the Andes of Ecuador". *Annals of the Association of American Geographers* **97**, 755-771 (2007).
- 14 Quiroz Dahik, C. et al. "Contrasting stakeholders' perceptions of pine plantations in the páramo ecosystem of Ecuador". *Sustainability* **10**, 1707 (2018).
- 15 Locatelli, B. et al. *Impactos de las zanjas de infiltración en el agua y los suelos: ¿qué sabemos?* (2020).
- 16 **Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., Crespo, P. "Progress in understanding the hydrology of high-elevation andean grasslands under changing land use". *Science of the Total Environment*. **804**, 150112 (2022).**
- 17 Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R. & Bendix, J. "The breathing of the andean highlands: net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador". *Agricultural and Forest Meteorology* **265**, 30-47 (2019).
- 18 Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P., Carrillo-Rojas, G., Sucozhañay, A. & Célleri, R. "Actual evapotranspiration in the high andean grasslands: a comparison of measurement and estimation methods". *Frontiers in Earth Science*. **7**, 55 (2019).
- 19 Ochoa-Sánchez, A., Crespo, P. & Célleri, R. "Quantification of rainfall interception in the high andean tussock grasslands". *Ecohydrology* **11**, e1946 (2018).
- 20 Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Célleri, R., Wilcox, B. P. & Crespo, P. "Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands". *Catena* **125**, 120-128 (2015).
- 21 Fischer, C. et al. "Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties". *Plant and Soil* **397**, 1-16 (2015).
- 22 Mosquera, G.M. et al. "Water transport and tracer mixing in volcanic ash soils at a tropical hillslope: a wet layered sloping sponge". *Hydrological Processes* **34**, 2032-2047 (2020)

- 23 Benavides, I. F. et al. "The variation of infiltration rates and physical-chemical soil properties across a land cover and land use gradient in a páramo of southwestern Colombia". *Journal of Soil and Water Conservation* **73**, 400-410 (2018).
- 24 Poulénard, J., Podwojewski, P., Janeau, J. L. & Collinet, J. "Runoff and soil erosion under rainfall simulation of andisols from the Ecuadorian páramo: effect of tillage and burning". *Catena* **45**, 185-207 (2001).
- 25 Suárez, E., Arcos, E., Moreno, C., Encalada, A. & Álvarez, M. "Influence of vegetation types and ground cover on soil water infiltration capacity in a high-altitude páramo ecosystem". *Advances in Sciences and Engineering (in spanish)* **5**, B14-B21 (2013).
- 26 Tenelanda-Patiño, D., Crespo-Sánchez, P. & Mosquera-Rojas, G. "Umbrales en la respuesta de humedad del suelo a condiciones meteorológicas en una ladera altoandina". *Maskana* **9**, 53-65 (2018).
- 27 Correa, A. et al. "Temporal dynamics in dominant runoff sources and flow paths in the andean páramo". *Water Resources Research* **53**, 5998-6017 (2017).
- 28 Lazo, P. X., Mosquera, G. M., McDonnell, J. J. & Crespo, P. "The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological services in andean páramo catchments". *Journal of Hydrology* **572**, 805-819 (2019).
- 29 Mosquera, G. M. et al. "Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem". *Hydrological Processes* **30**, 2930-2947 (2016).
- 30 Ochoa-Tocachi, B. F. et al. "Impacts of land use on the hydrological response of tropical andean catchments": Ochoa-Tocachi et al.: "Land use impacts on tropical andean hydrology". *Hydrological Processes*. **30**, 4074-4089 (2016).
- 31 Marín, F. et al. "Changes in soil hydro-physical properties and SOM due to pine afforestation and grazing in andean environments cannot be generalized". *Forests* **10**, 17 (2018).
- 32 Buytaert, W., Iñiguez, V. & Bièvre, B. D. "The effects of afforestation and cultivation on water yield in the andean páramo". *Forest Ecology and Management* **251**, 22-30 (2007).
- 33 Crespo, P. et al. "Land use change impacts on the hydrology of wet andean páramo ecosystems. *Status and perspectives of hydrology in small basins, IAHS-AISH Publ (2010)* **336**, 71-76 (2010).
- 34 Crespo, P. J. et al. "Identifying controls of the rainfall-runoff response of small catchments in the tropical Andes (Ecuador)". *Journal of Hydrology* **407**, 164-174 (2011).
- 35 Harden, C. P., Hartsig, J., Farley, K. A., Lee, J. & Bremer, L. L. "Effects of land-use change on water in andean páramo grassland soils". *Annals of the Association of American Geographers* **103**, 375-384 (2013).
- 36 Harden, C. P. "Land use, soil erosion, and reservoir sedimentation in an andean drainage basin in Ecuador". *Mountain Research & Development* **13**, 177-184 (1993).
- 37 Montenegro-Díaz, P., Ochoa-Sánchez, A. & Celleri, R. "Impact of tussock grasses removal on soil water content dynamics of a tropical mountain hillslope". *Ecohydrology* **12**, (2019).
- 38 Harden, C. "Mesoscale estimation of soil erosion in the rio Ambato drainage, Ecuadorian sierra". *Mountain Research and Development* 331-341 (1988).
- 39 Cingolani, A. M. et al. "Fire reduces dry season low flows in a subtropical highland of central Argentina". *Journal of Hydrology* 590, 125538 (2020).
- 40 Verrall, B. & Pickering, C. M. "Alpine vegetation in the context of climate change: a global review of past research and future directions". *Science of The Total Environment* **748**, 141344 (2020).
- 41 Xue, Y., Ma, Y. & Li, Q. *Land-climate interaction over the tibetan plateau*. (2017).
- 42 Oscanoa, L. & Flores, E. "Influencia de técnicas de mejora de suelos sobre la función hídrica de pastos naturales altoandinos" *Ecología Aplicada* **15**, 91-99 (2016).
- 43 Tácuna, R. E., Aguirre, L. & Flores, E. R. "Influencia de la revegetación con especies nativas y la incorporación de materia orgánica en la recuperación de pastizales degradados". *Ecología Aplicada* **14**, 191-200 (2015).





Foto: Ana Castañeda



Foto: Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica.

Servicios ecosistémicos hídricos de los pajonales altoandinos ¿Qué sabemos?

El proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica promueve la conservación, restauración y recuperación de los ecosistemas en el Perú, 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 (SDPA), EcoDecisión e investigadores del Imperial College London.

¿Cómo citar esta investigación?

Mosquera G., Marín F., Stern M., Bonnesoeur V., Ochoa-Tocachi B.F., Román-Dañobeytia F., 2022. Servicios ecosistémicos hídricos de los pajonales altoandinos: ¿Qué sabemos?. Resumen de políticas, Proyecto "Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica", Forest Trends, Lima, Perú.



www.infraestructuranatural.pe