

— CAPÍTULO 3

HIDROLOGÍA DE LOS PÁRAMOS EN EL ECUADOR

Giovanny M. Mosquera | Ana E. Ochoa-Sánchez |
Juan Pesántez | Patricio Crespo | Rolando Céleri

Riachuelo de páramo.
Fotografía: cortesía de Pablo Corral Vega ©



Resumen

Los páramos brindan servicios hidrológicos esenciales que incluyen la generación y regulación de caudal, el control de la erosión y el abastecimiento de agua para consumo humano. Dichos servicios ayudan a sostener el desarrollo socioeconómico de zonas rurales y urbanas a lo largo del Ecuador. Debido a esto, el número de estudios científicos sobre la hidrología del páramo ha aumentado considerablemente en las últimas dos décadas. Sin embargo, la información existente se encuentra dispersa, lo que limita su disponibilidad para mejorar el manejo y la gestión de los recursos hídricos del ecosistema. En este capítulo presentamos una síntesis de la literatura científica sobre estudios relacionados a la cantidad y calidad de agua en el páramo ecuatoriano.

La mayor parte de la investigación hidrológica se ha desarrollado en los páramos húmedos del sur del Ecuador. Las mediciones en campo indican que, aunque la precipitación en el páramo está principalmente compuesta por llovizna de baja intensidad ($<1 \text{ mm hr}^{-1}$), existe una alta variabilidad espacial de la lluvia anual a lo largo del Ecuador. A pesar de que la neblina aumenta la humedad atmosférica hasta en un 20 %; esta no aumenta el contenido de agua en el suelo de páramo cubierto por vegetación de baja estatura tal como el pajonal, y por lo tanto no influencia el rendimiento hídrico a escala de cuenca. En pajonales de páramo conservados en el sur del Ecuador alrededor del 50 % de la precipitación que entra al sistema regresa a la atmósfera a través de la evapotranspiración. La presencia de vegetación nativa de páramo facilita la infiltración de agua en el suelo, lo que a su vez reduce los procesos erosivos.

Los procesos y mecanismos relacionados a la generación de caudal han sido investigados en detalle en el páramo del sur del Ecuador que presenta condiciones características tales como suelos de origen volcánico (Andosoles) de poca profundidad (1-2 m), suelos formados por la acumulación de materia orgánica (Histosoles) que forman humedales generalmente poco profundos ($<10 \text{ m}$) y una roca madre con una muy baja permeabilidad (casi compacta). En dicha región, se ha determinado que los humedales de páramo que cubren una extensión superficial relativamente pequeña (entre el 5 y 20 % del área de las cuencas hidrográficas) y que principalmente se ubican en zonas planas alrededor de ríos y arroyos, son la principal zona de almacenamiento de agua y fuente de generación de caudal.

Los Andosoles que cubren el resto del terreno (80-95 % de la superficie de las cuencas) por otro lado ayudan a regular el caudal por medio de la recarga de agua a los humedales durante periodos de sequía. En relación con los impactos del cambio de uso de la tierra en la hidrología del páramo, la forestación con pinos reduce el almacenamiento de agua en el suelo, así como la

generación y regulación de caudal. Los impactos del pastoreo y la agricultura en la función hidrológica de los pajonales de páramo no son generalizables ya que dependen en gran medida del manejo histórico y las prácticas actuales de uso de la tierra. Finalmente, identificamos vacíos de conocimiento que deben ser abordados en futuras investigaciones para mejorar el manejo de los recursos hídricos del páramo en el Ecuador.

Summary

The páramo provides essential hydrological services, flow generation and regulation, and erosion control and water supply for human consumption. These services help sustain the socio-economic development of rural and urban areas throughout Ecuador. As a result, the number of scientific studies on páramo hydrology has increased considerably in the last two decades. However, the existing information is scattered, which limits its availability for improving the management and administration of the ecosystem's water resources. In this chapter we present a synthesis of the scientific literature on studies related to water quantity and quality in the Ecuadorian páramo.

In general, most of the hydrological research has been carried out in the humid páramos of southern Ecuador. Field measurements indicate that although precipitation in the páramo is mainly composed of low intensity drizzle ($<1 \text{ mm hr}^{-1}$), there is a high spatial variability of annual rainfall across Ecuador. Although fog increases atmospheric humidity by up to 20%, it does not increase the water content of the páramo soil covered by low-height vegetation such as grasslands, and therefore does not influence water yield at the catchment scale. In conserved páramo grasslands in southern Ecuador about 50% of the precipitation entering the system returns to the atmosphere through evapotranspiration. The presence of native páramo vegetation facilitates water infiltration into the soil, which in turn reduces erosion processes.

The processes and mechanisms related to flow generation have been investigated in detail in the páramo of southern Ecuador, which presents characteristic conditions such as the presence of shallow (1-2 m) soils of volcanic origin (Andosols), soils formed by the accumulation of organic matter (Histosols) that form generally shallow wetlands ($<10 \text{ m}$) and a bedrock with a very low permeability (almost compact). In this region, páramo wetlands covering a relatively small surface area (between 5 and 20% of the watershed area) and mainly located in flat areas around rivers and streams have been identified as the main water storage area and source of water flow generation.

The Andosols that cover the rest of the land (80-95% of the catchment area) on the other hand help to regulate flow by recharging water to wetlands

during periods of drought. In relation to the impacts of land use change on páramo hydrology, pine afforestation reduces water storage in the soil, as well as flow generation and regulation. The impacts of grazing and agriculture on the hydrological function of páramo grasslands are many and varied as they are highly dependent on historical management and current land use practices. Finally, we identify knowledge gaps that need to be addressed in future research to improve the management of páramo water resources in Ecuador.

Figura 3.1 Un riachuelo formándose en el páramo del Antisana con los glaciares del volcán al fondo. La hidrología de los páramos comprende fenómenos complejos debidos a las condiciones geográficas, biofísicas e hidrometeorológicas del paisaje. Fotografía: Patricio Mena-Vásquez



Introducción

El páramo posee una alta capacidad de regulación hídrica debido a su ubicación geográfica —por encima de la línea de los árboles y debajo de los glaciares (donde estos están presentes)— y sus características biofísicas (por ejemplo, la topografía, la vegetación, el suelo y la geología) e hidrometeorológicas (Buytaert et al., 2006a; Figura 3.1). Dicha regulación suple las necesidades de agua para consumo doméstico, industrial, agrícola, ganadero y recreativo, así como las demandas de energía hidroeléctrica de millones de personas que habitan en los Andes tropicales y sus alrededores (Céleri y Feyen, 2009; Correa et al., 2020). Si bien estos servicios ecosistémicos hidrológicos han creado una gran base social para la conservación, restauración y el manejo sostenible del páramo en el Ecuador, otros usos que incluyen la extracción de minerales, la forestación con especies exóticas, el pastoreo intensivo y la agricultura a gran escala, pueden afectar su capacidad de proporcionar beneficios hidrológicos para la sociedad (Mosquera et al., 2022). Por ello, es fundamental comprender los elementos y procesos que influyen en la provisión de servicios hidrológicos de forma que dicho conocimiento sea la base para informar estrategias y políticas destinadas a asegurar la gestión sostenible de los recursos hídricos del páramo.



Aunque la diversidad, fisionomía y ecología de la vegetación del páramo han sido estudiadas en detalle desde el siglo XIX (por ejemplo, Humboldt y Bonpland en 1807) y con mayor énfasis a lo largo del siglo XX (por ejemplo, Cuatrecasas, 1958; Monasterio, 1980; Acosta-Solís, 1984; van der Hammen y Cleef, 1986), la investigación sobre sus recursos hídricos comenzó hace apenas tres décadas. En 2006, Buytaert et al. (2006a) sintetizaron sobre el estado de la investigación hidrológica en el páramo en la que se proporcionó una descripción inicial de sus principales características biofísicas (por ejemplo, vegetación, suelos, topografía) e hidrometeorológicas (clima, precipitación y caudal). Sin embargo, los autores identificaron varias brechas de conocimiento, principalmente como consecuencia de la falta de mediciones de componentes esenciales del ciclo hidrológico, de los cortos periodos de monitoreo o la mala calidad de los datos hidrológicos disponibles. Adicionalmente, dicho documento evidencia una falta de investigación sobre la hidrología de los humedales y bosques altoandinos.

Durante la última década se han llevado a cabo numerosas investigaciones para llenar estos vacíos de conocimiento. Las investigaciones incluyen la dinámica de la lluvia y la niebla (por ejemplo, Padrón et al., 2015; Cárdenas et al., 2017; Esquivel-Hernández et al., 2019; Berrones et al., 2021, 2022); la evapotranspiración (por ejemplo, Carrillo-Rojas et al., 2019; Ochoa-Sánchez et al., 2019, 2020); el movimiento de agua en el suelo (por ejemplo, Mosquera et al., 2020b, 2020a); los procesos de generación de escorrentía (por ejemplo, Mosquera et al., 2015, 2016a; Correa et al., 2017; Lazo et al., 2019; Ramón et al., 2021); y el almacenamiento de agua en la subsuperficie (por ejemplo, Lazo et al., 2019). Asimismo, el conocimiento sobre las características químicas del agua generada por los arroyos y ríos del páramo ha incrementado (Pesántez et al., 2018, 2021; Arízaga-Ildrovo et al., 2022).

Aunque la comprensión de la hidrología de los recursos hídricos del páramo en el Ecuador ha aumentado sustancialmente en las dos últimas décadas, esta información aún se encuentra dispersa y desconectada de las políticas dirigidas a mejorar la gestión de los recursos naturales. Esta situación limita el uso de la información disponible para guiar la toma de decisiones y desarrollar políticas basadas en evidencia científica. Por lo tanto, este capítulo se enfoca en la síntesis y evaluación del estado actual del conocimiento científico sobre los procesos hidrológicos del páramo ecuatoriano y su vínculo con la calidad del agua. Adicionalmente, identificamos brechas de conocimiento fundamentales que dificultan el manejo sostenible de los recursos hídricos del páramo en el Ecuador.

Procesos y variables hidrológicas

La generación y regulación de caudal son dos de los servicios ecosistémicos más importantes que brinda el páramo (Buytaert et al., 2006a; Mosquera et al., 2015; Correa et al., 2020). Dado que estos servicios dependen, en gran medida, del balance hídrico de las cuencas hidrográficas, la cuantificación de las entradas, el almacenamiento y las salidas de agua son fundamentales para obtener una comprensión de los procesos que dominan su hidrología. Esta sección sintetiza el conocimiento disponible sobre los procesos hidrológicos y las variables que influyen en el balance hídrico de las cuencas del páramo en el Ecuador (Figura 3.2).



Figura 3.2 Generación de caudal en una cuenca de páramo ubicada al sur del Ecuador dentro del Parque Nacional Cajas. Fotografía: Giovanni Mosquera

Precipitación

Algunas caracterizaciones detalladas de la lluvia en el páramo del sur del Ecuador han reportado medias anuales entre 1000 y 1300 mm (Buytaert et al., 2006b; Célleri et al., 2007; Padrón et al., 2020). A través de mediciones de campo, la lluvia media anual cerca del volcán Antisana, en los páramos del norte de Ecuador, se estimó en 779 mm durante el periodo 2014 a 2020 (Lahuatte et al., 2022). La lluvia en el páramo del Ecuador presenta una alta variabilidad espacial (Buytaert et al., 2006a; Ochoa et al., 2014; Correa et al., 2020). En un sitio de estudio del páramo central del Ecuador, cerca al volcán Chimborazo, se registró un importante gradiente de precipitación media anual de 900 mm al este del volcán y 145 mm al lado oeste durante el periodo 1974-1996 (Sklenář y Lægaard, 2003).

La lluvia en los Andes del Ecuador está influenciada principalmente por la Zona de Convergencia Intertropical y por el fenómeno de El Niño y La Niña (Vuille et al., 2000), las anomalías de temperatura en la superficie del océano Atlántico y, en menor grado, en la superficie del océano Pacífico, a pesar de la cercanía de este último a la cordillera de los Andes. En efecto, en los páramos del sur del Ecuador, la lluvia está formada principalmente por humedad atmosférica reciclada proveniente de la selva amazónica (Esquivel-Hernández et al., 2019; Zhiña et al., 2022).

La ocurrencia de llovizna en el páramo es frecuente, tal como se demostró en los páramos del sur del Ecuador donde esta representó hasta un 30 % de la precipitación anual total durante el periodo 2011-2014 (Padrón et al., 2015). Hasta el momento, solo un estudio en la misma región ha evaluado la influencia de la niebla en la precipitación del páramo. Berrones et al. (2021) encontraron que la niebla ocurre principalmente temprano en la mañana y en la noche, y estimaron que el contenido combinado de llovizna y de la niebla podría aumentar, potencialmente, la precipitación anual hasta en un 22 % (es decir, 340 mm en un periodo de 12 meses durante 2017-2018). Sin embargo, un estudio sobre la captura de niebla en el mismo sitio, dominado por pajonales de pequeña altura (<0,5 m), sugiere que la precipitación por niebla se condensa en el pajonal, pero no llega al suelo; es decir, las gotas se quedan en la vegetación y no llegan a escurrir al suelo, por lo que la humedad del suelo no se incrementa y, por lo tanto, no contribuye al caudal (Berrones et al., 2022). La niebla, sin embargo, tiene importancia ecohidrológica dado que mantiene una alta humedad relativa del aire y disminuye el efecto incidente de la radiación solar, lo que a su vez limita las pérdidas de agua por evapotranspiración (Berrones et al., 2022). A pesar de ello, aún se desconoce el papel de la niebla en paisajes de páramo con vegetación de mayor altura (por ejemplo, bosques de *Polylepis* y rosetas gigantes).

Aunque las técnicas de teledetección y modelos climáticos globales se han utilizado comúnmente para caracterizar la variabilidad espacial de la lluvia en el páramo debido a la limitada disponibilidad de estaciones de monitoreo en tierra (por ejemplo, Vuille et al., 2000; Correa et al., 2020), dichas técnicas han mostrado diferencias notables en comparación con las mediciones terrestres debido principalmente a la compleja topografía de la cordillera de los Andes (Ochoa et al., 2016; González-Zeas et al., 2019). A pesar de esto, recientemente se han obtenido representaciones precisas de la precipitación espacial en el páramo mediante el uso de radares de lluvia con datos ajustados para condiciones locales (por ejemplo, Orellana-Alvear et al., 2019) o densas redes de estaciones pluviométricas (por ejemplo, Sucozhañay et al., 2018) para llegar a cuantificar la cantidad de lluvia y comprender su dinámica temporal, que son esenciales para mejorar la comprensión del funcionamiento hidrológico del páramo.

Evapotranspiración

La evaporación desde la superficie terrestre (sin incluir los cuerpos de agua), la evaporación del agua lluvia interceptada por el dosel vegetal y la transpiración desde los tejidos vegetales, que combinados forman el término de evapotranspiración del balance hídrico, representan una gran proporción del ciclo hidrológico global (Good et al., 2015). A pesar del importante rol que puede jugar la evapotranspiración en el páramo ecuatoriano, este componente del balance hídrico permaneció poco estudiado hasta hace media década.

La evapotranspiración actual o real (es decir, la cantidad de agua que es efectivamente evaporada desde la superficie del suelo y transpirada por la cubierta vegetal) de los pajonales de páramo (*Calamagrostis intermedia*) se midió directamente por primera vez en un sitio de páramo al sur de Ecuador (3765 m). El promedio diario de este flujo de agua en esa zona es de 1,7 mm día⁻¹, variando entre 1,6 mm día⁻¹ durante los meses húmedos y 2,0 mm día⁻¹ durante los meses relativamente secos para el periodo 2016-2019. Este flujo representa hasta el 50 % de la precipitación total anual (Carrillo-Rojas et al., 2019; Ochoa-Sánchez et al., 2019, 2020). Otro estudio reciente de un sitio de páramo al norte del Ecuador, en el área de conservación del volcán Antisana, reporta la evapotranspiración actual medida durante el periodo 2018-2021 (Páez-Bimos et al., 2022). Estos autores encontraron que la evapotranspiración actual representó el 42,5 % de la precipitación total para pajonales (*Calamagrostis intermedia*), asemejándose a los valores reportados para pajonales en el sur del país. Por otro lado, la evapotranspiración actual de la cobertura vegetal de almohadilla (*Azorella pedunculata*) representó el 76 % de la precipitación media anual, y las mayores diferencias se encontraron durante los meses secos en el área de estudio (enero, marzo y julio a septiembre).

Los componentes de la evapotranspiración actual no han sido cuantificados directamente en el páramo ecuatoriano. En el sur del Ecuador se midió indirectamente la pérdida por interceptación en pajonal durante eventos de lluvia en el periodo 2014-2018, encontrando altos porcentajes de interceptación (80-100 %) durante eventos de precipitación de hasta 2 mm de lluvia acumulada. Esto indica que la máxima capacidad de almacenamiento de agua en las acículas del pajonal es de 2 mm. En la misma región, la evapotranspiración actual de los pajonales está principalmente controlada por la radiación neta (Ochoa-Sánchez et al., 2020) y limitada por la neblina (Berrones, 2022).

Considerando las dificultades de realizar mediciones de evapotranspiración actual en zonas montañosas, varios estudios en regiones de páramo en el Ecuador han reportado valores de evapotranspiración potencial (es decir, la

demanda o cantidad máxima de agua que se evaporaría si hubiera suficiente agua disponible de la precipitación y la humedad del suelo). Dichos valores se pueden estimar con relativa facilidad mediante el uso de mediciones de variables climáticas tradicionales (por ejemplo, temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar) y su transformación a evapotranspiración actual mediante el uso de un coeficiente de cultivo (es decir, la relación que existe entre la evapotranspiración actual para un cultivo específico y la evapotranspiración de referencia en esas mismas condiciones y en ese mismo microclima).

En el Ecuador existen varios estudios que reportan la evapotranspiración potencial de la vegetación, principalmente de los pajonales. Al norte del país, en la reserva del volcán Antisana, se calcularon valores promedio de evapotranspiración potencial del pajonal entre 1,4 y 2,1 mm día⁻¹ en cuatro estaciones meteorológicas durante el periodo 2007–2010 (Sklenář et al., 2015). En dicho estudio, los menores valores de evapotranspiración potencial se encontraron en los sitios de menor elevación (4120 y 4280 m) y donde la vegetación tenía mayor densidad, mientras que los mayores valores fueron reportados en sitios ubicados a mayor elevación (4430 y 4460 m) y con vegetación escasa. En un sitio de páramo situado al sur del Ecuador, donde la vegetación es principalmente dominada por pajonal y arbustos pequeños, se calcularon valores promedio de evapotranspiración potencial de 2,4 mm día⁻¹, con un rango de variación entre 0,8 y 4,2 mm día⁻¹ durante el periodo 2010–2012 (Iñiguez et al., 2016).

Estos valores coinciden con estudios en otros dos sitios en el Sur del Ecuador, en zonas principalmente cubiertas por pajonal, donde se calcularon valores promedio de evapotranspiración potencial entre 1,9 y 2,0 mm día⁻¹ durante el periodo 2011–2013 (Córdova et al., 2015). Cabe resaltar que todos estos estudios aplicaron la ampliamente utilizada ecuación de Penman-Monteith sugerida por la FAO (FAO 56 PM; Allen et al., 1998) para el cálculo de la evapotranspiración potencial. Además, es importante señalar que, aunque el número de estudios sobre evapotranspiración potencial ha incrementado en los últimos años, solamente existe una investigación en la que se ha estimado el coeficiente de cultivo para transformar la evapotranspiración potencial en evapotranspiración actual. Carrillo-Rojas et al. (2019) reportaron un coeficiente de cultivo de 0,9 para los pajonales del sur del Ecuador mediante el uso de la ecuación FAO 56 PM.

Infiltración

Una vez que la precipitación llega a la superficie del suelo, la capacidad de infiltración de los suelos permite la redistribución del agua a través de caminos de flujo sobre (superficiales) y debajo (subsuperficiales) de la superficie (Hillel, 2004). Los

suelos de páramo originados por la acumulación de ceniza volcánica (Andosoles, véase el Capítulo 2) y cubiertos por pajonales en el norte del Ecuador poseen una alta capacidad de infiltración de agua en condiciones conservadas (Poulenard et al., 2001). Dicha tasa de infiltración normalmente varía entre 20 y 80 mm hr⁻¹, siendo mayor que la habitualmente baja intensidad de la precipitación (generalmente <10 mm hr⁻¹; Padrón et al., 2020). Por ejemplo, en 10 años de monitoreo en la estación La Toreadora (4000 m) ubicada dentro del Parque Nacional El Cajas al sur del Ecuador se encontró que en el 85 % de las horas que registraron precipitación se tuvo una intensidad igual o menor a 1 mm h⁻¹, y solamente ocho veces se alcanzaron intensidades entre 10 y 20 mm h⁻¹. Los suelos de sitios donde existe vegetación arbustiva y bosques de *Polylepis* presentan mayores tasas de infiltración en comparación con sitios donde hay pajonales (Suárez et al., 2013). La alta capacidad de infiltración de los suelos de páramo cubiertos por vegetación nativa reduce la ocurrencia de escorrentía superficial y facilita la entrada de agua en el suelo, favoreciendo la generación de flujo subsuperficial en las cuencas de páramo (Mosquera et al., 2016a; Correa et al., 2017; Páez-Bimos et al., 2022). La limitada ocurrencia de flujo superficial, a su vez, reduce procesos erosivos (Harden, 1993; Poulenard et al., 2001; Mosquera et al., 2022).

Los cambios en el uso de la tierra producen efectos perjudiciales sobre la infiltración. Las quemas frecuentes (cada 1 a 3 años), la labranza, el pastoreo intensivo de ganado en pastos no nativos (kikuyo, *Pennisetum clandestinum*) y la remoción completa de la vegetación reducen sustancialmente las tasas de infiltración (hasta 10 veces) en relación con la cobertura vegetal nativa (Poulenard et al., 2001; Suárez et al., 2013). Estos efectos demuestran las consecuencias desfavorables de ciertos usos de la tierra o del cambio de la cobertura vegetal sobre la infiltración de los suelos del páramo (Mosquera et al., 2022).

Movimiento y almacenamiento de agua en el suelo

El agua que se almacena y moviliza a través de los suelos es un componente esencial del balance hídrico del páramo ya que ayuda a regular la cantidad de caudal generado durante los periodos de estiaje (Buytaert et al., 2006a; Mosquera et al., 2016a). A pesar de esto, existen pocos estudios sobre la dinámica espacial y temporal del movimiento del agua en suelos de páramo no perturbados. Un estudio realizado en una ladera experimental cubierta por vegetación de pajonal (*Calamagrostis intermedia*; Figura 3.3) investigó cómo el agua se moviliza a través de suelo Andosol poco profundo (<1 m de profundidad) en el páramo del sur de Ecuador (Mosquera et al., 2020a). El estudio demostró que, a pesar de que los Andosoles tienen un alto contenido de agua durante todo el año debido a su

alto contenido de materia orgánica y textura fina o franco-arcillosa (Buytaert et al., 2006a; Mosquera et al., 2020b), el movimiento vertical del agua es la ruta de flujo dominante en estos suelos. Esto se observó a pesar de la formación de una capa saturada de agua en el horizonte orgánico del suelo debajo de la zona de raíces, lo que ejemplifica el comportamiento de esponja de los suelos de ceniza volcánica en el páramo. El predominio de las trayectorias de flujo vertical se explica por la estructura porosa y la alta conductividad hidráulica saturada de los Andosoles (Buytaert et al., 2006c).



Figura 3.3 Pajonales (dominados por *Calamagrostis intermedia*) que cubren un suelo originado de ceniza volcánica (Andosol) en la cabecera de la cuenca del río Quinuas en la provincia de Azuay.
Fotografía: Giovanny M. Mosquera

Cabe recalcar que, a pesar del flujo vertical dominante, durante eventos de lluvia de alta intensidad o volumen, el agua tiende a movilizarse lateralmente en la zona de raíces del suelo, lo que explica la rápida respuesta del caudal a escala de cuenca durante eventos de lluvia. Aún falta conocimiento sobre el movimiento del agua en suelos de cenizas volcánicas más gruesas que presentan profundidades de hasta varias decenas de metros y en suelos no volcánicos (incluidos los Histosoles que forman los humedales andinos o bofedales), aunque lo más probable es que el movimiento principal del agua también sea vertical.

Otra investigación reportó que los Andosoles no perturbados del páramo andino se humedecen hasta la saturación más rápido (dos a tres meses) que los suelos minerales encontrados a menor elevación (ocho meses) después de largos periodos de sequía (Iñiguez et al., 2016). Este comportamiento hidrológico resulta del efecto combinado del alto contenido de materia orgánica del suelo y el bajo consumo de agua de los pajonales de páramo (Ochoa-Sánchez et al., 2020), en relación con especies de pastos exóticos que dominan a menor elevación.

Varias investigaciones se han centrado en evaluar los impactos de los cambios en la cobertura vegetal y el uso de la tierra sobre el contenido y almacenamiento de agua en el suelo, particularmente en los páramos del sur del Ecuador. Varios estudios han demostrado consistentemente que la forestación con plantaciones de pinos reduce significativamente el contenido de agua del suelo (hasta un 50-60 %) en relación con la vegetación nativa (es decir, pajonales, arbustos, bosques de *Polylepis*; Hofstede et al., 2002; Farley et al., 2004; Harden et al., 2013; Marín et al., 2018; Patiño et al., 2021; Mosquera et al., 2022). Estas observaciones indican que se debe restringir la forestación con pinos en áreas de páramo conservadas para asegurar su capacidad de proveer los servicios de generación y regulación de caudales (Mosquera et al., 2022).

El cultivo —principalmente de papa— y el pastoreo intensivo de ovinos y bovinos han mostrado efectos contrastantes sobre el contenido y almacenamiento de agua del suelo que van desde fuertes reducciones (por ejemplo, Podwojewski et al., 2002; Daza Torres et al., 2014; Marín et al., 2018; Patiño et al., 2021) a ningún cambio o incluso aumentos leves (p. ej., Buytaert et al., 2005; Harden et al., 2013; Marín et al., 2018). Estas diferencias probablemente estén relacionadas con el manejo histórico y reciente de la tierra, incluidas las actividades de quema, labranza y pisoteo, así como con la cantidad de animales que pastan las áreas de páramo (Podwojewski et al., 2002; Marín et al., 2018). Con base en la notable variabilidad de los impactos de estas actividades, investigaciones pasadas recomiendan que se evite generalizar los impactos del cultivo y el pastoreo entre sitios de estudio, y se consideren los factores antes mencionados

al planificar estrategias de manejo de la tierra y agua en el páramo (Marín et al., 2018; Mosquera et al., 2022).

Con el objetivo de simular el efecto del pastoreo extensivo (es decir, una baja densidad de animales por unidad de área) en la humedad del suelo, también se evaluó el impacto de la eliminación del pajonal en el contenido de agua de los Andosoles no perturbados (Montenegro-Díaz et al., 2019). Si bien se observó un ligero cambio en la variación temporal del contenido de agua en el suelo debido a la reducción de la interceptación y transpiración en la parcela intervenida, no se encontraron cambios significativos en el contenido promedio de agua en el suelo. Estas observaciones sugieren que las propiedades hidrofísicas del suelo no se ven afectadas cuando solamente se elimina la vegetación, siempre que la estructura del suelo no se vea afectada por intervenciones humanas tales como la compactación del suelo debido al pastoreo intensivo (es decir, una alta densidad de animales por unidad de área).

El efecto de la cobertura vegetal en el movimiento de agua en el suelo ha sido investigado recientemente en el páramo del Antisana en el norte del Ecuador (Páez-Bimos et al., 2023). Estos autores reportaron que el suelo de ceniza volcánica cubierto por almohadillas (*Azorella pedunculata*) presenta una estructura de dos capas, en la cual el horizonte superficial (hasta 20 cm de profundidad) almacena agua que se encuentra disponible para la evapotranspiración, con un movimiento de agua restringido a capas de suelo más profundas. Por otro lado, el suelo cubierto por pajonales (*Calamagrostis intermedia*) presenta un movimiento de agua vertical homogéneo, que facilita la recarga casi constante de agua a todo el perfil del suelo. Estas observaciones fueron atribuidas a diferencias en la distribución de raíces en el horizonte superficial del suelo entre las dos coberturas vegetales, enfatizando la importancia del rol que juega la vegetación en la hidrología del páramo.

Generación de caudal

Dinámica del caudal

Las primeras evaluaciones hidrológicas en cuencas de páramo estuvieron enfocadas en definir la dinámica del caudal en respuesta a la variación temporal de la lluvia, particularmente, en el sur del Ecuador. En dicha región, el alto rendimiento hídrico de las cuencas de páramo no perturbadas que poseen una delgada capa de suelo Andosol (<1 m de profundidad) establecida sobre un lecho rocoso con muy baja permeabilidad se evidenció por su alto coeficiente de escorrentía (la

relación entre el caudal y la lluvia) que oscila frecuentemente entre 50 y 70 % a escala anual (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2010, 2011; Guzmán et al., 2015; Mosquera et al., 2015; Ochoa-Tocachi et al., 2016) y llega hasta un 90 % durante eventos de lluvia (Correa et al., 2016). Este alto rendimiento hídrico se debe, principalmente, al efecto combinado del aporte sostenido de lluvia y la alta humedad del aire que reduce la evapotranspiración a lo largo del año (Córdova et al., 2015; Padrón et al., 2015), junto con la alta capacidad de infiltración en relación con la intensidad de lluvia y retención de agua de los suelos debido a su estructura porosa, alto contenido de materia orgánica y textura fina (Buytaert et al., 2005, 2006a; Mosquera et al., 2020a).

Por el contrario, un menor rendimiento hídrico ha sido observado en cuencas de páramo ubicadas alrededor del volcán Antisana en el norte del Ecuador que presentan menores coeficientes de escorrentía, que varían entre 28 y 37 % (Ochoa-Tocachi et al., 2016; Lahuatte et al., 2022). Estas diferencias en la generación de flujo se atribuyen principalmente a dos factores. El primer factor es el de las condiciones climatológicas relativamente más secas y estacionales en algunas zonas de los Andes del norte y centro del Ecuador (Torres y Proaño, 2018), en comparación con las condiciones húmedas durante todo el año que se encuentran en el sur del país.

En cuanto al otro factor, se pueden mencionar las características edafológicas y geológicas de las cuencas (Ochoa-Tocachi et al., 2016; Rodríguez-Morales et al., 2019). Por un lado, los suelos más profundos resultado de un desarrollo poligenético debido a la acumulación de material volcánico de diferentes edades y propiedades físicas generalmente presentan textura gruesa y bajo contenido de materia orgánica en comparación con la región del sur del Ecuador (Páez-Bimos et al., 2022), favoreciendo el movimiento vertical del agua a través de las capas de suelo (Lahuatte et al., 2022). Por otro lado, la roca subyacente altamente fracturada y permeable o la presencia de piroclastos poco o no consolidados facilitan una percolación profunda del agua. Debido a la dificultad de cuantificar los componentes de flujo subsuperficial profundo o subterráneo en dichas cuencas, el cierre de su balance hídrico no se ha podido realizar hasta el momento.

Otros análisis de caudal mostraron que las cuencas de páramo no perturbadas en el sur del Ecuador poseen una alta capacidad de regulación hídrica, como lo indica un caudal base alto y sostenido durante la mayor parte del año (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2011; Mosquera et al., 2015; Ochoa-Tocachi et al., 2016). Dicha capacidad también se ve favorecida por las condiciones climáticas, edáficas y geológicas locales antes mencionadas. Aunque no existe información sobre este tema para cuencas de páramo en otras regiones con diferentes condiciones climatológicas (por ejemplo, estacionalmente secas),

pedológicas (por ejemplo, suelos de textura gruesa de varios metros de profundidad o suelos no volcánicos) y geológicas (por ejemplo, lecho rocoso fracturado altamente permeable), se puede esperar una capacidad de regulación de caudal diferente. Por ejemplo, otras cuencas de captación dominadas por pastizales y humedales en ambientes estacionalmente secos y lecho rocoso altamente fracturado a lo largo de los Andes tropicales presentan una capacidad de regulación de flujo sustancialmente menor que los páramos húmedos del sur de Ecuador (Ochoa-Tocachi et al., 2016).

A pesar de que con frecuencia se asume que las cuencas de páramo en los Andes tropicales generalmente presentan un alto rendimiento hídrico y una alta capacidad de regulación (por ejemplo, Buytaert et al., 2006a; Correa et al., 2020), las diferencias identificadas a lo largo de la región indican que el clima, el tipo de suelo y las características geológicas deben ser consideradas para lograr una mejor gestión de los recursos hídricos en el páramo ecuatoriano. Esto debe ser tomado en cuenta en el diseño de sistemas de monitoreo de caudales.

También se han evaluado los impactos del uso del suelo y el cambio de cobertura vegetal en la dinámica del caudal en cuencas de páramo en el Ecuador. Algunas investigaciones en el sur del país han demostrado que la forestación con pinos (Figura 3.4) afecta negativamente la generación de caudal al reducir todo el rango de caudales: altos, medios y bajos (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2010, 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2016; Cabrera-Balarezo et al., 2022). Este comportamiento responde a una mayor pérdida de agua hacia la atmósfera por medio de la intercepción y la transpiración de los árboles en relación con la vegetación de pajonal que domina en el páramo no degradado. El aumento de la evapotranspiración, a su vez, causa una disminución en el rendimiento hídrico hasta en un 50 %. Aunque no se ha encontrado que el cultivo de papas reduzca sustancialmente el rendimiento hídrico en cuencas de páramo (el coeficiente de escorrentía disminuye en ~10-20 %); esta práctica tiende a producir flujos máximos más altos y rápidos, así como a disminuir el flujo base, lo que causa una disminución en la capacidad de regulación del caudal (por ejemplo, Buytaert et al., 2004, 2006d, 2007; Crespo et al., 2010, 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2016). Estos efectos pueden atribuirse a la formación de surcos y zanjas en los cultivos, lo que a su vez provoca un drenaje más rápido del agua del suelo a los arroyos (Buytaert et al., 2007; Crespo et al., 2010). Asimismo, dichos efectos se ven exacerbados cuando el terreno tiene un arado siguiendo la pendiente del terreno, lo cual favorece el drenaje rápido del agua fuera de la cuenca y la subsecuente reducción de caudales base, lo que adicionalmente puede provocar un incremento acelerado de la erosión del suelo.



Figura 3.4 Plantación de pino (*Pinus patula*) en la cuenca del río Quinuas en el sur del Ecuador. Fotografía: Giovanni M. Mosquera.

Los impactos del pastoreo en la generación y regulación del caudal son menos evidentes. Mientras que la dirección del impacto depende principalmente de la densidad animal que puede causar una disminución de la cobertura vegetal y compactación del suelo, la magnitud del cambio se relaciona con las características biofísicas de la cuenca y las propiedades del suelo (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Los hallazgos en los Andes del sur del Ecuador indican que el pastoreo con una densidad de ganado de entre 0,5 y 3 cabezas por hectárea, no provoca cambios significativos ni en el rendimiento hídrico ni en la regulación del caudal (Crespo et al., 2010, 2011). Por otro lado, aunque los efectos del pastoreo intensivo (incluyendo una alta densidad de ganado que pastorea libremente en el terreno y no se encuentra estabulado) no han sido estudiados en el páramo; observaciones en campo sugieren que dicho impacto puede causar una fuerte reducción de la cobertura vegetal y compactación del suelo, lo que a su vez puede producir un aumento en la rapidez de la generación de escorrentía luego de una lluvia (es decir, aumentar el rendimiento hídrico), y reducir la cantidad de agua que es almacenada en la cuenca (es decir, disminuir la regulación de caudales) (Ochoa-Tocachi et al., 2016). Sin embargo, todavía hace falta definir la densidad de ganado que causa dichos efectos en el páramo ecuatoriano.

Procesos de generación de caudal

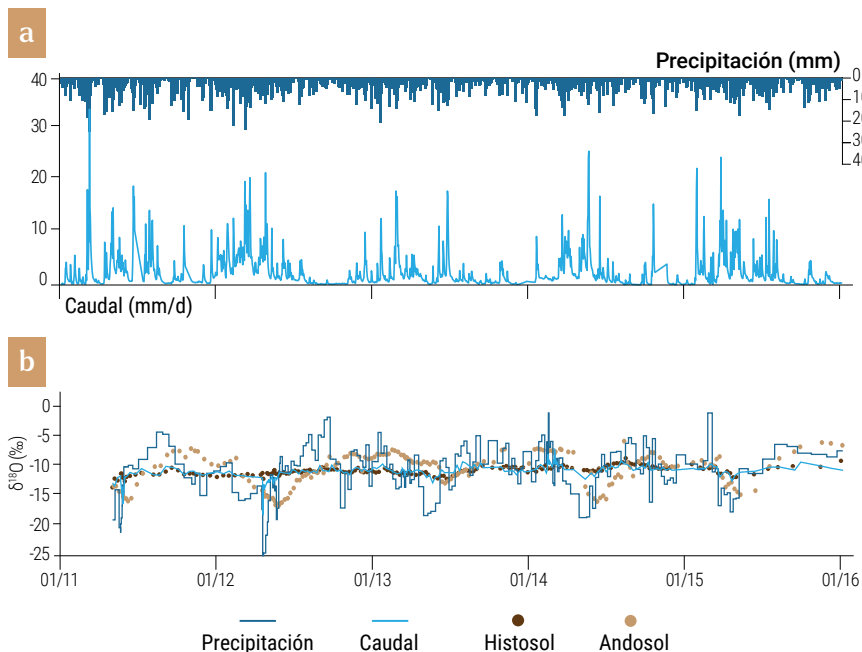


Figura 3.5 Observaciones hidrológicas e isotópicas y hallazgos clave sobre los mecanismos generación de escorrentía en una cuenca experimental de páramo (7,52 km²) situada dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhuruca y en el sur del Ecuador (3400-3900 m s.n.m.; Mosquera et al., 2016) durante el periodo mayo de 2011 a diciembre de 2016. a) La precipitación diaria (P) y el flujo de agua por unidad de área (Q) representan la dinámica de lluvia y escorrentía del sistema. b) La composición isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ en P, Q, suelos de ladera (Andosol) y ribereños (Histosol) muestra cualitativamente que el Histosol de ribera es la principal fuente de generación de caudal durante el periodo de monitoreo.

Dado que la generación y la regulación del caudal dependen del transporte y la mezcla de agua en las cuencas hidrográficas, en la última década ha aumentado el interés en definir las trayectorias del flujo de agua sobre (flujo superficial) y debajo (flujo subsuperficial) de la superficie en el páramo. La mayor parte de la comprensión de los procesos que dominan la generación de caudal en el páramo, hasta la fecha, se ha desarrollado en un sistema de monitoreo anidado de ocho cuencas de cabecera experimentales fuertemente instrumentadas y monitoreadas (0,2-7,5 km²) situadas en el sur de Ecuador dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhuruca y en el sur del Ecuador dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhuruca (Mosquera et al., 2016b). En dicha región, los suelos de origen volcánico son poco profundos (hasta 1-2 m de profundidad) y el lecho rocoso subyacente es prácticamente impermeable. Un resumen de las observaciones hidrológicas e

hidrogeoquímicas y los hallazgos clave desarrollados en el observatorio se muestran en la Figura 3.5 como referencia. En Zhurucay, las primeras investigaciones trataron de identificar cómo las características biofísicas del páramo (por ejemplo, vegetación, topografía, tipo y distribución espacial de suelo y geología) influyen en la generación y regulación del caudal (Mosquera et al., 2015). Estos autores encontraron que mientras el rendimiento hídrico representado por el coeficiente de escorrentía y la generación de caudales medios y altos están controlados por la extensión superficial de los humedales andinos (la combinación de suelos ricos en materia orgánica tipo turba —Histosoles— y vegetación de almohadillas), la regulación hídrica representada por la generación de los flujos bajos (considerados como flujo base) se encuentran principalmente influenciados por la topografía (pendiente promedio de las cuencas) que tiene un efecto gravitacional en el agua almacenada en la cuenca y en los humedales.

El uso de trazadores ambientales (isotópicos y geoquímicos) ha permitido caracterizar las rutas de flujo superficial y subsuperficial, el tiempo promedio de tránsito o edad del agua (es decir, el tiempo promedio transcurrido desde que las moléculas de agua ingresan a una cuenca en forma de precipitación hasta que salen de la cuenca en forma de caudal; McGuire y McDonnell, 2006), de suelos, arroyos y ríos, y la capacidad de almacenamiento de agua en las cuencas del observatorio de Zhurucay. La caracterización de las señales de isótopos estables del agua indicó que, aunque los humedales andinos cubren solamente el 20 % del área de Zhurucay, estos son la principal fuente de agua que contribuye a la generación de caudal durante todo el año (Mosquera et al., 2012; 2016a). Por otro lado, las laderas que cubren el 80 % restante del área juegan un papel clave en la recarga de agua hacia los humedales andinos durante los periodos secos y por ello contribuyen a la regulación hídrica (Mosquera et al., 2016a). La información geoquímica (nutrientes y metales disueltos) ha permitido cuantificar la contribución de diferentes fuentes de agua (por ejemplo, lluvia, suelos de ladera, humedales ribereños y manantiales) a la generación de caudal en diferentes condiciones de flujo (Correa et al., 2017; 2019). Estas investigaciones confirmaron que los Histosoles son la principal fuente de agua de los arroyos y ríos durante flujo base y fuertes eventos de lluvia al contribuir con entre el 50 y 60 % del caudal total. También se demostró que en Zhurucay las laderas se conectan hidrológicamente a la red de drenaje durante eventos de lluvia fuertes, contribuyendo hasta en un 40 % al caudal total (Correa et al., 2019).

El agua de manantial, como representación de agua subterránea poco profunda almacenada en las fracturas del lecho rocoso cerca de la superficie del suelo (< 30 m de profundidad), contribuye entre 10 a 25 % al flujo de la corriente, particularmente durante caudales bajos. Estos hallazgos están respaldados por

las edades relativamente jóvenes de agua en el suelo y arroyos, que son menores a un año y generalmente varían entre 2 y 9 meses (Mosquera et al., 2016c; Lazo et al., 2019; Larco et al., 2023), en comparación con edades del agua mucho mayores reportadas en otros ecosistemas donde el caudal se genera principalmente por el agua subterránea de acuíferos profundos donde la edad es del orden de varios años a décadas (por ejemplo, Cartwright y Morgenstern, 2015; Ma y Yamanaka, 2016). La capacidad de almacenamiento de agua de las cuencas de Zhurucay varía entre 300 y 600 mm, lo que representa entre un tercio y la mitad de la precipitación anual (Lazo et al., 2019). Los humedales proporcionan la mayor parte de este almacenamiento de agua y, por lo tanto, son el reservorio de agua más importante de las cuencas. Estos hallazgos se encuentran sustentados por la dominancia de la fracción de agua de preevento (o agua antigua almacenada en las cuencas previo a eventos de lluvia; Klaus y McDonnell, 2013) que generalmente representa más del 75 % del caudal total durante eventos de lluvia en Zhurucay (Lazo et al., 2023). En conjunto, estos hallazgos en el páramo del sur del Ecuador enfatizan: 1) la relevancia de los humedales andinos para la generación y regulación de caudal, a pesar de su pequeña extensión de área a lo largo del observatorio; 2) que la mezcla y el transporte del agua subsuperficial a través de los suelos poco profundos son mecanismos dominantes de generación de caudales; 3) que el aporte de aguas subterráneas profundas es bajo y se limita a aportes de aguas poco profundas a través de las grietas de la roca subyacente alterada (Figura 3.6).



Figura 3.6 Humedal de páramo que cubre suelo originado por la acumulación de materia orgánica (Histosol) en el Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay ubicado en la provincia del Azuay. Fotografía: Giovanny M. Mosquera.

El modelo hidrológico conceptual mencionado antes se evaluó recientemente en otra cuenca experimental (cuenca alta del río Tomebamba) en el sur del Ecuador con características de vegetación, suelos y geologías similares a las de Zhurucay, pero con un área de drenaje mayor (21,7 km²) e influenciada por la presencia de lagunas (Ramón et al., 2021). Curiosamente, se descubrió que los humedales aportan una proporción aún mayor de agua al caudal a pesar de su menor extensión superficial (solo el 8 % del área de drenaje) en comparación con Zhurucay (20 %). Por el contrario, los lagos que cubren el 5 % de la cuenca no representaron una fuente principal de agua para la generación de caudal como lo creían hasta ahora actores locales y administradores del agua en la región (por ejemplo, Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca ETAPA-EP, comunicación personal). Aunque la capacidad de regulación del caudal de los lagos puede ser importante en pequeñas cuencas de cabecera en el páramo, estos hallazgos sugieren que las fluctuaciones en su nivel del agua (debido a las constantes entradas de precipitación) y su capacidad de almacenamiento de agua no son suficientes para influir en la producción de caudal en cuencas de mayor extensión superficial. Estos hallazgos enfatizan la importancia de obtener una mejor comprensión basada en monitoreo de los procesos hidrológicos para definir correctamente hacia dónde deben dirigirse los esfuerzos de gestión y conservación. En el caso del páramo andino del sur del Ecuador esto es claro: se deben conservar los humedales andinos para mantener la disponibilidad de agua para los usuarios aguas abajo.

Aunque la comprensión de los principales procesos hidrológicos relacionados a la generación de caudal en otras regiones del páramo ecuatoriano aún es escasa, los pocos estudios disponibles han mostrado diferencias marcadas en relación con la hidrología bien entendida en los páramos del sur del Ecuador. En el norte del Ecuador recientemente se ha demostrado que las trayectorias de flujo de agua verticales son un importante mecanismo de transporte de agua en una pequeña cuenca de cabecera (0,68 km²) influenciada por vulcanismo reciente; es decir, que posee suelos volcánicos profundos (que alcanzan hasta 27 m de profundidad alrededor de la zona de estudio (Hall et al., 2017), y roca madre fracturada con alta permeabilidad (Lahuate et al., 2022). La combinación de baja precipitación anual (< 800 mm año⁻¹), con una marcada estacionalidad climática y una alta permeabilidad del suelo y del lecho rocoso que permiten que el agua se infiltre verticalmente a través del subsuelo (Lahuate et al., 2022) probablemente explican el bajo rendimiento hídrico reportado en los páramos del volcán Antisana en el norte del Ecuador (Ochoa-Tocachi et al., 2016; Lahuate et al., 2022). Estos hallazgos se alinean con la relevancia del flujo de agua subterránea en la generación de caudales reportada para

cuencas que poseen un lecho rocoso volcánico fracturado en el norte y centro del Ecuador (Favier et al., 2010; Saberi et al., 2019).

Dos investigaciones en cuencas de páramo que aún poseen cobertura de glaciar en el norte y centro de Ecuador han demostrado la importancia de las contribuciones del derretimiento de los glaciares a la generación de caudales. En una cuenca de 15,2 km² con un 15 % de área glaciar en el volcán Antisana, dichos aportes representaron el 20 % del caudal durante un evento de lluvia monitoreado durante la estación seca (Minaya et al., 2021). Asimismo, representaron entre 20 y 60 % a escala horaria durante el día en una cuenca de 7,5 km² con una cobertura glaciar de 34 % en el volcán Chimborazo (Saberi et al., 2019). En conjunto, estos hallazgos no solo resaltan el papel clave que están jugando las áreas de páramo en regiones sin glaciares o donde los glaciares han desaparecido recientemente como resultado del calentamiento global en los Andes tropicales (por ejemplo, Thompson et al., 2011; Mark et al., 2017), sino también la diversidad de caminos que el agua puede tomar para llegar hacia arroyos y ríos, dependiendo de las condiciones climatológicas, geomorfológicas, edafológicas y geológicas locales.

Calidad química del agua

La disponibilidad de suficiente cantidad de agua que cumpla con estándares de calidad para consumo humano es un objetivo clave para lograr el desarrollo sostenible de las naciones (Alcamo, 2019; Germann y Langergrabe, 2022). A la fecha, existe una creencia generalizada tanto por parte de la comunidad científica¹ como del público en general² de que las cuencas de páramo conservadas ofrecen agua de calidad química suficientemente alta para satisfacer las necesidades de la población urbana y rural. Sin embargo, sorpresivamente, esta característica de los recursos hídricos del ecosistema no ha sido evaluada en estudios de síntesis anteriores sobre la hidrología del páramo. Esta sección tiene como objetivo sintetizar el conocimiento disponible sobre la calidad química —aquí referida específicamente a sustancias disueltas que incluyen nutrientes, metales y contaminantes— en el caudal generado por páramos conservados y degradados en el Ecuador.

Hasta donde sabemos, la primera investigación científica sobre la calidad del agua del páramo se llevó a cabo en el volcán Antisana en el norte del Ecuador (Williams et al., 2001). Durante condiciones de clima seco, estos autores reportaron diferencias significativas en la concentración de especies inorgánicas y orgánicas de carbono, nitrógeno y fósforo entre el agua de los arroyos y los

¹ Por ejemplo, Buytaert et al., 2006a; Célieri y Feyen, 2009; Correa et al., 2020.

² Por ejemplo, comunicación personal de ETAPA-EP; Fondo para la protección del Agua FONAG, Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito EPMAPS.

humedales. Más recientemente, el monitoreo de alta resolución temporal de parámetros de calidad del agua (muestras recolectadas cada 4 horas durante 16 meses entre 2017-2019) en una cuenca en el sur de Ecuador indicó que se exportan altas concentraciones de carbono orgánico disuelto (COD) a los arroyos durante eventos de lluvia de alta intensidad. La producción de compuestos orgánicos en cuencas de páramo, y de COD en particular (Pesántez et al., 2021; Ramón et al., 2021), resulta de la acumulación de altas cantidades de C en los suelos (Buytaert et al., 2006a). Esto, especialmente en los humedales altoandinos (Hribljan et al., 2016) o cubiertos por vegetación de almohadilla (Páez-Bimos et al., 2022) que a menudo están hidrológicamente conectados con arroyos y ríos (Mosquera et al., 2016a). Aunque el COD no representa una amenaza directa para la salud humana, la desinfección con cloro (el método más comúnmente aplicado para el tratamiento de agua potable en el Ecuador) del agua rica en materia orgánica podría resultar en la potencial producción de subproductos cancerígenos como los trihalometanos (Hsu et al., 2001; WHO, 2017). Sin embargo, no encontramos información sobre la exportación de nutrientes en otras cuencas de páramo, ni sobre el efecto del proceso de cloración en la producción de subproductos potencialmente dañinos.

El contacto del agua con materiales liberados a la superficie de la Tierra durante eventos volcánicos disuelve elementos mayores y traza provenientes del lecho rocoso y de los suelos que posteriormente se movilizan a arroyos y ríos e influyen en la calidad química del caudal (Rodríguez-Espinosa et al., 2015; Páez-Bimos et al., 2022). Teniendo en cuenta el papel clave que juega el vulcanismo en la configuración del paisaje del páramo ecuatoriano, el monitoreo de parámetros de calidad del agua y de metales pesados, que en concentraciones elevadas pueden poner en peligro la salud humana,³ debería ser un requisito obligatorio. A pesar de esto, estudios directamente relacionados con la investigación de la concentración de metales disueltos en cuencas de páramo en el Ecuador todavía son limitados.

Hay una escasa información disponible en dos estudios realizados en el sur del Ecuador (Correa et al., 2019; Pesántez et al., 2021) que sugiere que el agua de los arroyos en las cuencas de páramo no perturbadas en dicha región presenta metales disueltos asociados con problemas de salud (por ejemplo, aluminio y cobre) en concentraciones por encima de los límites permisibles (Figura 3.7) para agua potable, agua embotellada y la preservación de la vida acuática, de acuerdo con las normas de calidad del agua de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, del Ecuador y de la Organización Mundial de la Salud.

³ Por ejemplo, Achene et al., 2010; Malandrino et al., 2015; Vigneri et al., 2017; Briffa et al., 2020

Estas observaciones resaltan la importancia de llevar a cabo evaluaciones de la calidad del agua que incluyan el análisis de nutrientes y metales disueltos, particularmente aquellos relacionados con problemas de salud (por ejemplo, cadmio, hierro, manganeso, mercurio y plomo) en el caudal generado por cuencas de páramo debido a la acumulación significativa de complejos organometálicos en sus suelos (Buytaert et al., 2005). Dichas evaluaciones deben realizarse durante diferentes condiciones de flujo (desde caudales base hasta caudales pico) ya que los diferentes solutos podrían movilizarse preferentemente durante eventos hidrológicos húmedos o secos en el páramo, e incluso algunos podrían movilizarse independientemente de las condiciones de caudal (Pesántez et al., 2018, 2021; Correa et al., 2019; Arízaga-Idrovo et al., 2022; Peña et al., 2023). Aunque la exportación de solutos podría verse exacerbada debido a cambios en el uso de la tierra (Pesántez et al., 2018; Matovelle, 2022) y los aumentos de temperatura esperados en zonas altoandinas en de los Andes tropicales (Buytaert et al., 2009, 2010), por el momento no existen estudios que analicen a fondo esta relación en el páramo del Ecuador.

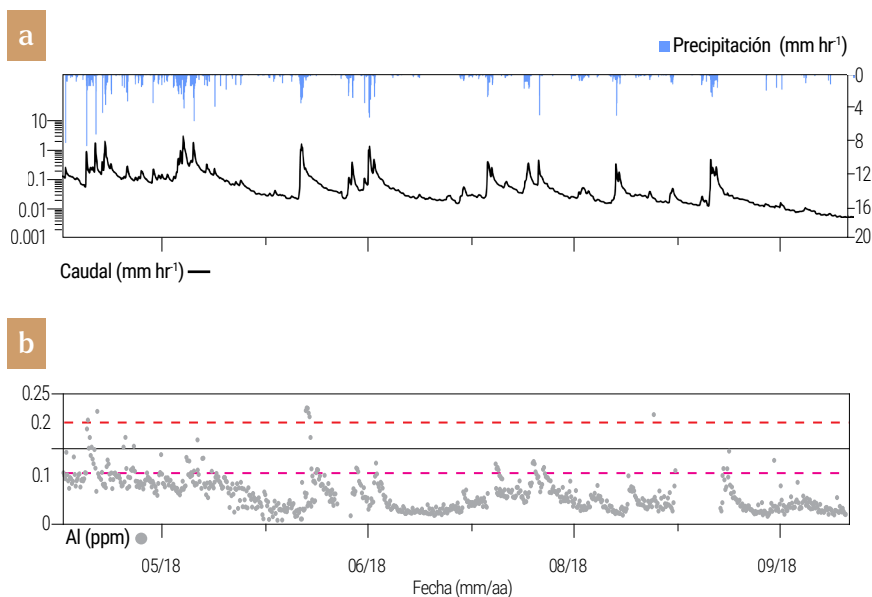


Figura 3.7 Serie temporal de alta frecuencia de a) precipitación y caudal (cada hora) y b) aluminio (Al) (cada 6 horas) en una cuenca de cabecera (3,28 km²) ubicada dentro del Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay en el páramo del sur de Ecuador. Las líneas discontinuas horizontales moradas y rojas en b) representan los límites máximos permisibles para la preservación de la vida acuática y para el suministro de agua potable, respectivamente, según los estándares de calidad del agua de la Normativa de Calidad de Agua del Ecuador, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud.

Aunque hay extensas áreas de páramo en los Andes del Ecuador que se ven afectadas por actividades antropogénicas (por ejemplo, pastoreo, agricultura y minería), hasta el momento existe solamente un estudio sobre los impactos de tales prácticas en la calidad química del agua de los arroyos y ríos que reciben sus descargas. En una cuenca de páramo en el sur del Ecuador se observó un deterioro en varios parámetros de calidad de agua (demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes totales, nitratos y sólidos suspendidos) a medida que el porcentaje de área destinada a ganadería aumentaba (Matovelle, 2022). Cabe resaltar que, si bien en las primeras etapas de los procesos de contaminación los suelos de páramo pueden acumular los metales, una vez los suelos alcancen su máxima capacidad de acumulación se convertirán en una enorme fuente de contaminación (González-Martínez et al., 2019). Este riesgo puede potenciarse por las condiciones de acidez de los suelos de páramo que facilitan la movilidad de metales y plaguicidas hacia el caudal (Mojica y Guerrero, 2013; González-Martínez et al., 2019).

Conclusiones y principales vacíos de conocimiento

Debido a la topografía compleja y los procesos climáticos causados por la presencia de la cordillera de los Andes, se ha encontrado una alta variabilidad espacial de precipitación a lo largo del páramo ecuatoriano. Aunque las mediciones de precipitación en campo han aumentado en varias regiones particularmente en el norte y sur del Ecuador en la última década, todavía existen muchos vacíos de datos, especialmente en el centro del país. Adicionalmente, a pesar de la esperada influencia de la niebla en el balance hídrico del páramo, este componente hidrológico aún no se ha investigado en detalle con excepción del sur del Ecuador. La evapotranspiración ha sido investigada en pajonales de páramo del sur del Ecuador, pero no existen cuantificaciones de este proceso hidrológico y su partición en diferentes componentes (intercepción, transpiración y evaporación del suelo) para pajonales en otras regiones, ni para otros tipos de vegetación (rosetas, arbustos, almohadillas y bosques nativos). También faltan estudios de la evaporación de lagos, humedales y suelos a lo largo del páramo ecuatoriano.

La mayoría de los estudios de flujo superficial y subsuperficial se han desarrollado para el páramo húmedo en el sur de Ecuador dominado por suelos volcánicos delgados (< 1-2 m) y un lecho rocoso con muy baja permeabilidad. Sin embargo, el conocimiento aún es escaso para las regiones de páramo estacionalmente secas como en la parte central del país. La infiltración de agua ha

sido investigada principalmente en sitios que presentan suelos volcánicos en el norte y sur del Ecuador, particularmente en ambientes dominados por pajonales altoandinos. Todavía no existen investigaciones sobre la infiltración en regiones con diferentes tipos de suelo tales como los Histosoles (turbas) formados a partir de la acumulación de materia orgánica, así como para diferente tipo de cobertura vegetal (por ejemplo, almohadillas, arbustos, bosques de *Polylepis* y frailejones). Aunque se conoce bien el movimiento del agua a través de los suelos de páramo de origen volcánico (Andosoles), faltan investigaciones en suelos no volcánicos y suelos ricos en materia orgánica (Histosoles). La comprensión de los procesos de lluvia-escorrentía es bien conocida para cuencas de páramo conservadas que poseen suelos volcánicos delgados (hasta unos pocos metros de profundidad) y lecho rocoso compacto, pero falta conocimiento para otras combinaciones de suelo y geología, particularmente para cuencas con alta permeabilidad del lecho rocoso. El papel de los lagos en el rendimiento hídrico y la regulación de caudales también sigue sin estudiarse. Cabe destacar que, a pesar del papel clave que desempeñan los humedales andinos como principales fuentes de generación de caudales en el sur del Ecuador, su dinámica hidrológica (por ejemplo, la variabilidad temporal de la humedad del suelo y la interacción con flujos subterráneos) aún se desconoce.

Además de la forestación con pinos, en el páramo ecuatoriano aún no se han investigado los impactos de otras plantaciones de especies exóticas (por ejemplo, *Cupressus* y *Eucalyptus*) y nativas (por ejemplo, *Polylepis*) sobre la dinámica y el almacenamiento del agua del suelo, así como sobre la generación y regulación de caudales. Asimismo, hace falta estudiar los posibles impactos (positivos o negativos) de las prácticas de revegetación en la hidrología como parte de la restauración de ecosistemas. La influencia de otros cambios en el uso de la tierra, incluidos los incendios, el pastoreo de ganado, la agricultura y la minería, en los procesos hidrológicos del páramo aún es limitada y muchas veces no concluyente o lo suficientemente detallada como para traducirse en recomendaciones de gestión. También faltan experimentos sobre cómo reaccionaría el contenido del agua del suelo a condiciones meteorológicas extremas, como las sequías, aunque dicha información podría ser muy valiosa para evaluar los impactos del cambio climático en el suelo del páramo y su hidrología a escala de cuenca. Adicionalmente, hacen falta evaluaciones sobre los efectos de la restauración en la función hidrológica del páramo.

A pesar de la noción proverbial de que el agua producida por las áreas de páramo andino conservadas es de alta calidad, existen muy pocas evaluaciones de la calidad química del agua en la literatura científica (concentración y carga anual), lo que hace que esta sea una brecha importante en el conocimiento que

debe llenarse en estudios futuros. Esto es particularmente significativo al considerar las implicaciones que altas concentraciones de compuestos orgánicos o la presencia de metales pesados de origen volcánico en el agua potable proveniente del páramo podrían tener sobre la salud humana y de animales domésticos. Además, los estudios de calidad del agua en áreas afectadas por cambios antropogénicos, incluyendo la extracción de minerales, la quema, la agricultura intensiva y el pastoreo, entre otros, aún son muy escasos en el páramo ecuatoriano. Esto puede ser particularmente importante en relación con la salud humana, cuando la contaminación relacionada con pesticidas, metales pesados, compuestos orgánicos y emergentes afecta el caudal generado.

Finalmente, un tema de relevancia en relación con la falta de estudios de calidad del agua se relaciona a la falta de control, monitoreo y seguimiento ambiental de las actividades humanas que se están ejecutando o planificando en el páramo ecuatoriano. De los estudios existentes se evidencia que los criterios de calidad ambiental o límites máximos permisibles para conservación de la vida natural no son, en muchos casos, aplicables ya que en su mayoría son menores a las concentraciones que se encuentran naturalmente en zonas de páramo (debido principalmente al origen volcánico de los suelos y la roca subyacente). Esto evidencia la urgencia de estudiar sobre calidad de agua y de desarrollar metodologías para el cálculo de valores de fondo. Sin dicha información, el seguimiento ambiental de actividades tan importantes como la extracción de minerales resulta compleja para el estado ecuatoriano, ministerios del ramo y gobiernos autónomos descentralizados, lo cual pone en grave riesgo a ecosistemas montañosos como el páramo y a la población que depende de ellos.