

# Estudio de afectación del servicio ecosistémico de regulación hídrica por actividades de agricultura en la cuenca del río Gachaneca I, páramo Rabanal

*Study of the Ecosystem Service's Impact for Water Regulation by Agricultural Activities in the Gachaneca I River Basin, Paramo Rabanal*

Yulia Ivanova<sup>a, b</sup>, Laura Camila Marín-Arévalo<sup>a</sup>

## RESUMEN

Los páramos colombianos son ecosistemas estratégicos en cuanto al suministro de diferentes servicios ambientales, incluyendo servicios asociados al recurso hídrico. A pesar de las acciones encaminadas hacia la conservación de páramos, muchos de estos se encuentran intervenidos por diferentes actividades antrópicas. La cuenca del río Gachaneca I del páramo Rabanal no es la excepción a estas dinámicas y, aunque una parte de la cuenca está en buen estado de conservación, otra se caracteriza por la ocupación de cultivos transitorios que vulnera la prestación de servicios de provisión y de regulación hídrica. En este estudio se diseñó una metodología en donde se evaluó el efecto que genera el desarrollo de actividades agrícolas sobre los servicios hídricos. Entre los principales hallazgos se encontró que la oferta hídrica media disminuyó en un 8,8% bajo el escenario de presión por agricultura, llegando a ser equivalente a la oferta hídrica en los meses de estiaje de años hidrológicos secos. La variabilidad interanual del recurso hídrico incrementa en un 9,9% indicando una mayor irregularidad en la oferta temporal de escorrentía superficial y, como consecuencia, mayor irregularidad del servicio de provisión del agua. El desarrollo de actividades de riego disminuye en un 27,8% la capacidad de regulación de la cuenca que, por sus condiciones de suelo y coberturas vegetales, no dispone de una condición natural apropiada para regular la escorrentía superficial. De esta manera, es necesario profundizar en la investigación de este panorama para mitigar los efectos negativos sobre este tipo de ecosistemas.

**PALABRAS CLAVE:** servicios ecosistémicos; servicio de regulación hídrica; páramo; variabilidad hídrica.

## ABSTRACT

Colombian paramos are strategic ecosystems in terms of the provision of different environmental services, including those associated with hydric resource. Despite the actions in favor of paramos conservation, many of these are intervened by different anthropic activities. The Gachaneca I river basin of paramo Rabanal is not the exception of this dynamics and, although one part of the basin is in state of paramo conservation, the other is characterized by being occupied by transitional crops, which violates the provision of water regulation and its benefit. In this study, a methodology was designed through which the effect of agriculture activities development in the provision and regulation services of hydric resource is assessed. The main findings suggest that the average water supply decreases in 8.8% under a panorama of agricultural pressure, being the equivalent of the water supply in the dry months of dry hydrological years. The hydric resource interannual variability increases in 9.9% suggesting higher rates of irregularity in the temporary supply of surface runoff and as a consequence, higher rates of irregularity in water supply service. The development of irrigation activities decreases in 27.8% the basin regulation capacity that, due to its soil conditions and plant covering, does not have a proper natural condition to regulate the surface runoff. In this way, it is necessary to go deeper into the exploration and research of this panorama in order to mitigate the negative effects on this type of ecosystems.

**KEY WORDS:** ecosystem services; water regulation; paramo; water variability.

a Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería. Bogotá, Colombia. ORCID Ivanova, Y.: 0000-0001-8836-5175; ORCID Marín-Arévalo, L.C.: 0000-0003-4910-7143

b Autor de correspondencia: [yulia.ivanova@unimilitar.edu.co](mailto:yulia.ivanova@unimilitar.edu.co)

## Introducción

La compleja orografía del territorio colombiano, su ubicación geográfica y disponibilidad hídrica son algunos de los factores por los cuales es considerado un país más biodiverso del mundo (IAvH, 2017). No obstante, en los últimos años se ha observado una disminución de especies nativas cercano al 18% cuya causa principal es la pérdida del hábitat asociada a las actividades de agricultura y ganadería expansiva, cambio en las condiciones climáticas, entre otros.

Gracias a la fertilidad de suelos y disponibilidad hídrica, casi todos los páramos del país se han convertido en zonas de intervención agrícola. Algunos estudios confirman que el cultivo de papa es más resistente a las heladas, junto con el aumento de temperaturas por el cambio climático, hacen que la frontera agrícola en los páramos se expanda en algunas zonas de los 4.000 msnm (IAvH, 2007). Junto con la destrucción de la capa vegetal y el uso de agroquímicos, se producen procesos de erosión que afectan negativamente las propiedades del suelo, disminuye la capacidad de retención de humedad y, por consiguiente, afectan el ciclo hidrológico de los páramos y sus servicios de provisión y regulación hídrica (Rodríguez-Morales et al., 2019, pp. 573-591).

Para incentivar la conservación y restauración de las áreas estratégicas de Colombia, en el año 2018 el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible expidió el Decreto 1007 (MADS, 2018, p. 2) que reglamenta el pago de los servicios ambientales (PSA) como incentivo económico por las acciones de preservación y restauración del suelo en las zonas RUNAP (Registro Único de Áreas Protegidas), donde están incluidos los ecosistemas de páramos. Uno de los servicios ecosistémicos que se tiene en cuenta en el Decreto es la regulación hídrica. Una interpretación somera del concepto de regulación hídrica se asocia al cambio en el valor promedio de la oferta hídrica, dejando de lado la capacidad natural para regular la escorrentía superficial por los componentes de la cuenca hidrográfica que influyen en la retención de sus aguas (Onaindia et al., 2013, pp. 1-9) como las coberturas vegetales (García, 2007, pp. 127-147), las conexiones con aguas subterráneas (Onaindia et al., 2013, 1-9), el régimen pluviométrico (Fu et al., 2013, pp. 238-246) y las características

del suelo que tienen incidencia directa en la infiltración (Jackson et al., 2013, pp. 74-88).

Por lo anteriormente es necesario desarrollar una metodología acorde con los lineamientos del Decreto 1007 y que, al mismo tiempo, sea capaz de evaluar el cambio en la capacidad regulativa de las cuencas hidrográficas bajo diferentes usos antrópicos del agua. Teniendo en cuenta que el uso agrícola es uno de los principales causantes de deterioro del recurso hídrico en páramos colombianos, la metodología se centró en esta demanda hídrica.

Adicionalmente, la metodología se diseñó contando con dos criterios adicionales que posibiliten su aplicación en condiciones locales. El primero se relaciona con la funcionalidad de la metodología bajo diferentes niveles de disponibilidad de la información hidrometeorológica y las demandas hídricas. Algunas cuencas se localizan en regiones donde existen limitaciones y/o escasez de la información hidrometeorológica que pueden dificultar este tipo de evaluaciones. El segundo se relaciona con la simplicidad de la metodología dado que esta debe ser funcional y de fácil comprensión para los profesionales de las áreas relacionadas con los temas de conservación y preservación, con el objetivo de motivar su uso en los proyectos PSA y, de esa manera, contribuir a la conservación del recurso hídrico en zonas ambientalmente estratégicas de Colombia.

La metodología desarrollada se aplicó en la cuenca del río Gachaneca I, localizada en el páramo Rabanal, y en la cual se encuentran cultivos de papa que impactan negativamente tanto la oferta hídrica como su variabilidad y capacidad de regulación hídrica.

## Materiales y métodos

El páramo de Rabanal está ubicado entre los Departamentos de Cundinamarca y Boyacá a 1.093.706 N y 1.058.549 E. Las temperaturas medias oscilan entre 5,5 y 15,0°C y las precipitaciones son cercanas a los 616,9 mm anuales (Corpoboyacá, 2008, p. 62). Se declara Parque Natural Regional en el Acuerdo 026 (Corpoboyacá, 2009) y se establecieron las zonas de preservación y restauración en el Acuerdo 030 (Corpoboyacá, 2016), y dentro de los objetivos de conservación se encuentran “preservar

y recuperar los ecosistemas con el fin de mantener y mejorar las condiciones hidrológicas del páramo como estrella fluvial regional y contribuir a la permanencia en la prestación de los bienes y servicios ambientales” (Corpoboyacá, Acuerdo 026, 2009). Aunque la extensión del páramo alcanza 17.567 ha, presenta un buen estado de conservación, existen algunas áreas, equivalentes al 15,68% del área total del páramo, que han sido transformadas por actividades agrícolas, siendo esta la principal amenaza para la biodiversidad presente y los servicios ecosistémicos que presta. Los habitantes son generalmente campesinos ubicados por debajo de la frontera colindante con el páramo. No se encuentra ningún centro urbano de importancia, pero se cuenta con la población flotante que se sirve de bienes y servicios que este ofrece. El alquiler de predios permite la explotación minera, agrícola y ganadera involucrando pobladores esporádicos que no se encuentran censados y que visitan con frecuencia el páramo y quienes, aunque no viven en él, se sirven de los bienes y servicios de este (Corpoboyacá, 2008, p. 200).

Como zona de estudio se escogió la cuenca del río Gachaneca I (Figura 1) con un área de 0,97 km<sup>2</sup> hasta el embalse con la misma denominación, dentro de la zonificación del Plan de Manejo Ambiental y que pertenece a la zona de conservación (Corpoboyacá, 2008, p. 424). Esta cuenca se caracteriza por tener suelos pobremente drenados y de baja fertilidad con

coberturas vegetales donde predominan herbazales y mosaicos de pastos, sosteniendo la vegetación de páramo y plantaciones esporádicas de pino forestal.

La importancia ecosistémica de la cuenca radica en los servicios de provisión y regulación hídrica. El servicio de provisión es uno de los servicios ambientales fundamentales y se refleja en el uso de aguas por los acueductos comunitarios Quebraditas, La Fábrica y La Chorrera, que tienen como finalidad el consumo humano. El embalse Gachaneca I se localiza a 3.350 msnm y tiene capacidad de 4'720.000 m<sup>3</sup>. Este sistema fue construido alrededor de 1950, uno de los más antiguos de Colombia (Rodríguez, 2016, pp. 18-20). Sus aguas se utilizan para riego en las épocas de estiaje y control de inundaciones en temporadas de lluvias, así como para el abastecimiento de agua al distrito de riego Asusa. El servicio de regulación hídrica ha servido como soporte para la conservación de biodiversidad en la cuenca y para garantizar la permanencia de la oferta hídrica del embalse. Adicionalmente, en la cuenca se encuentran cultivos de papa que usan agua para riego. La presión antrópica es tan diversa y variada que algunos estudios han puesto en duda si los usos de agua en la cuenca respetan la disponibilidad de este recurso para la conservación de ecosistemas y otros usos domésticos presentes (Rodríguez, 2016, pp. 18-20).

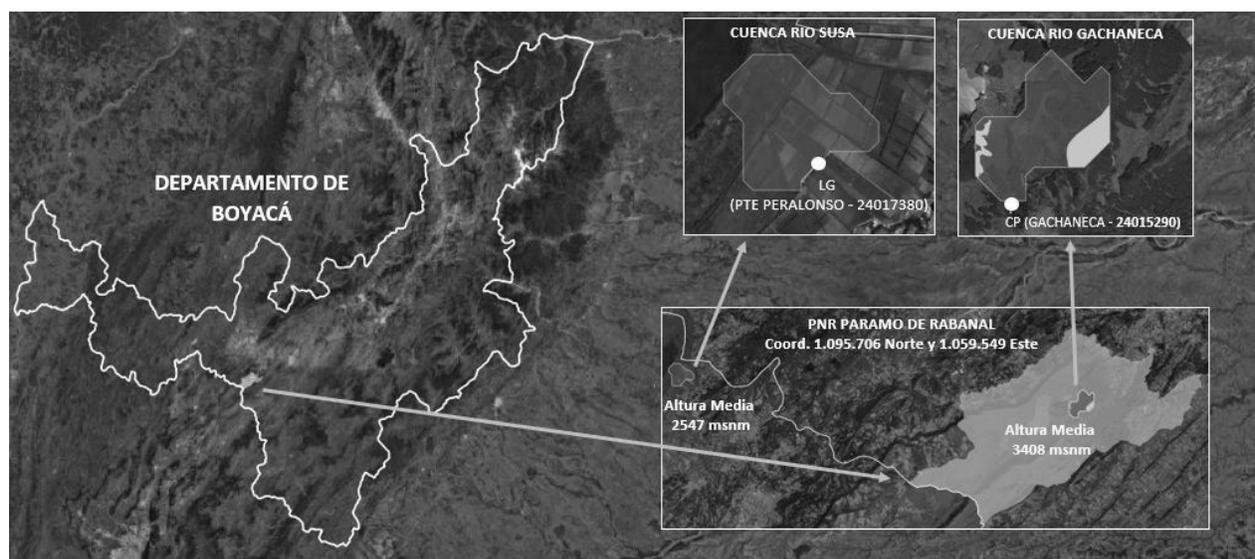


Figura 1. Localización de la zona del estudio

Ante la necesidad de evaluar el impacto generado por la agricultura, el principal renglón económicos que afectan la oferta y capacidad hídrica de la cuenca, se diseñó una metodología que consta de cuatro pasos: 1) búsqueda de insumos, 2) evaluación de la capacidad de regulación hídrica natural de la cuenca, 3) identificación de la regulación hídrica bajo escenarios de presión antrópica por agricultura, y 4) evaluación del cambio en la regulación y régimen hídrico por dichas actividades. El desarrollo general de la metodología se representa en la Figura 2.

Durante la etapa de recolección de los insumos se consultaron fuentes de información secundaria: identificación de características del suelo, tipos de cultivos y área respectiva, oferta y demanda hídrica mensual. Se prestó especial atención en los registros históricos de caudales mensuales sin afectación antrópica, con los cuales, se definió la capacidad natural de la regulación hídrica.

En la segunda etapa, con el objetivo de evaluar la regulación hídrica natural de la cuenca, se buscaron estaciones hidrológicas localizadas dentro de la cuenca, donde el régimen hídrico no estuviese intervenido por actividades económicas, esto garantiza

que su análisis permite evaluar la regulación hídrica natural. Normalmente, estas estaciones se localizan en la cuenca alta, donde actividades humanas son ausentes o no significativas. La serie de caudales medios diarios de la estación hidrológica traspasa el punto del cierre de la cuenca a través de la relación entre las áreas aferentes. Así, se obtienen registros de caudales medios de la cuenca sin afectación antrópica. Esta serie se denominará *serie natural de caudales*.

Si la cuenca de estudio no dispone de estaciones hidrológicas, la generación de los caudales para esta se realiza a través de los registros hidrológicos de la cuenca de referencia que cumple con los criterios de similitud de características morfométricas y físico-geográficas. A través del mismo método de traspaso de caudales en función de áreas aferentes, la serie de caudales mensuales de la cuenca de referencia se convierte a los caudales de la cuenca del estudio (*serie natural de caudales*).

En la misma etapa, se evaluó la capacidad natural de regulación hídrica a través del Índice de Regulación Hídrica (IRH) (IDEAM, 2018, pp. 65-66) y caracterización de la variabilidad natural de caudales, la cual se identifica a través del valor promedio

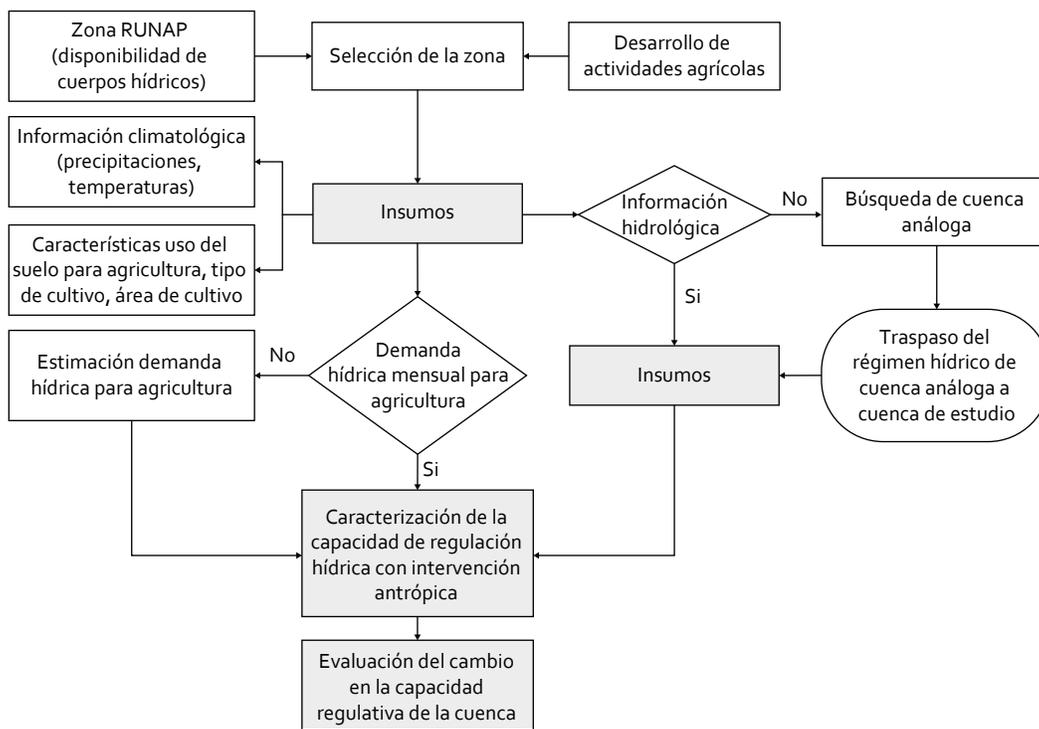


Figura 2. Metodología de evaluación por cambios en la regulación hídrica ocasionada por actividades agrícolas

de la oferta hídrica y el valor de desviación estándar o coeficiente de variación. La ecuación de cálculo para índice de regulación hídrica se presenta a continuación (Ecuación 1):

$$IRH = \frac{a_1}{a_t} \quad (1)$$

donde  $IRH$  es el índice de regulación hídrica,  $a_1$  el área inferior del valor promedio de la curva de duración de caudales y  $a_t$  el área total debajo de la curva de duración de caudales.

El paso tres evalúa la regulación y variabilidad hídrica de los caudales afectados por actividades agrícolas. En este paso se integró la información proveniente de la demanda hídrica por agricultura. Con la disponibilidad de la información sobre el consumo de agua por cultivos, estos se restan de caudales medios mensuales de la serie natural, obteniendo la serie de caudales afectados por la agricultura. En el caso de inexistencia de registros, se obtuvieron de manera indirecta, empleando el cálculo de necesidades de riego de cultivos según Allen et al. (2006, pp. 3-13). Se propone también, construir el balance hídrico-climático (Claro, 2006, pp. 3-7) que integra los registros de precipitaciones y temperaturas medias mensuales del periodo de registro disponible, características del suelo y tipo de cultivo. El IDEAM recomienda el método de Thornthwaite según el uso de las metodologías existentes (IDEAM, 2017). De esta manera, los primeros dos parámetros se obtienen del IDEAM y los dos últimos a través de las fuentes de información secundaria.

El cálculo de la demanda hídrica por agricultura se estableció como la necesidad de riego del cultivo. Esta necesidad de riego presenta un balance entre precipitación efectiva y demanda hídrica de cultivo. Este parámetro se obtiene de manera mensual a través de la construcción del balance hídrico-climático para todos los años de registro de la estación climática Gachaneca (24015290), localizada a 130 m de la línea divisoria de agua de la cuenca. Teniendo en cuenta su ubicación, sus registros se consideran como representativos para toda la cuenca del río Gachaneca I en la extensión de 0,97 km<sup>2</sup>. La demanda de agua del cultivo se calcula por medio de la Ecuación 2:

$$D_a = 10 \sum_{d=1}^{lp} \frac{(k_c \times ETP) - \frac{(P \times K_c)}{100}}{k_r} \times A \quad (2)$$

donde  $D_a$  es la demanda de agua del cultivo (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>), 10 es el factor que aplica para convertir a m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>,  $k_c$  el coeficiente de cultivos,  $lp$  la duración del periodo de crecimiento,  $ETP$  la evapotranspiración de referencia (pasto) potencial (mm),  $P$  la precipitación (mm),  $k_e$  el coeficiente de escorrentía,  $k_r$  el coeficiente de eficiencia de riego. Por parte del IDEAM se recomienda tener el coeficiente de eficiencia promedio del 65% (IDEAM, 2010a, pp. 178-180) y el área sembrada (ha).

El valor de la evapotranspiración del cultivo ( $K_c$ ) se tuvo en cuenta por fases de desarrollo, por el método de Thornthwaite descrito por Allen et al. (2006, pp. 3-13). Al conocer el área de cultivo y la demanda mensual en m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>, se convierte a mm para ser comparado con el valor de precipitación efectiva. Cuando la demanda hídrica del cultivo es menor a la precipitación efectiva, no se necesitan actividades de riego y esta se satisface por medio de la lluvia, mientras que, cuando la demanda hídrica del cultivo es mayor que la precipitación efectiva, se necesita el riego cuyo valor será la diferencia entre el valor de la demanda hídrica del cultivo y el de la precipitación efectiva del mes. De esa manera, se caracterizan las necesidades de riego mensual para todos los años de registro de la estación climatológica, expresado a través del caudal mensual en m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Al restar de la serie natural de caudales estas demandas de riego, se construye la serie de caudales medios mensuales en el escenario de uso antrópico de agua. Para esta serie se definen el IRH, oferta media y variabilidad del recurso hídrico, afectados por el riego de los cultivos.

Conociendo la capacidad de regulación hídrica natural, por demandas de agricultura, oferta hídrica y variabilidad en los dos escenarios, permitió evaluar el cambio en la capacidad reguladora de la escorrentía superficial por el desarrollo de esta actividad económica que hacen parte de la cuarta parte de la metodología.

Inicialmente en la cuarta etapa, se analiza el cambio porcentual del IRH, donde el valor negativo

indica la disminución de la regulación hídrica y el valor positivo, el aumento de esta.

En la metodología se considera que el cambio en la regulación hídrica afecta no solo la oferta media en la cuenca, sino su variabilidad temporal. El cambio en la oferta hídrica se definió como la diferencia porcentual entre el valor promedio del caudal de la serie natural de caudales y el valor promedio de la serie antrópica de caudales el cual se expresa a través de la siguiente Ecuación 3:

$$\Delta_Q = \frac{Q_{natural} - Q_{antrópica}}{Q_{natural}} \times 100\% \quad (3)$$

Los valores negativos del cambio porcentual indican disminución en la oferta media de la cuenca y viceversa. Cabe resaltar que la extracción del caudal del río en ningún momento puede ser igual o superior al caudal ambiental (entendido por este como el mayor valor entre los índices 7Q10, Q95 y Q75% de la curva de duración de caudales, sin considerar metodologías que exijan otros parámetros, diferentes de los hidrológicos, porque no es el objetivo del estudio) (MADS, 2013, pp. 26-29), el cual es necesario para la conservación de los ecosistemas.

Por otra parte, el cambio en la variabilidad hídrica se definió como el cambio porcentual de la desviación estándar de la serie de caudales bajo la afectación antrópica con relación a la serie natural. El efecto de la actividad antrópica sobre la variabilidad se puede reflejar tanto en el aumento como en la disminución de esta y se define a través de la Ecuación 4:

$$\Delta_\sigma = \frac{\sigma_{natural} - \sigma_{antrópica}}{\sigma_{natural}} \times 100\% \quad (4)$$

Finalmente, se evaluó la alteración en la regulación hídrica, donde se escogió el valor máximo entre la oferta y la variabilidad, con el objetivo de mejorar la conservación y restauración de los ecosistemas.

Este valor porcentual se convierte en el valor del caudal, calculado con relación al valor promedio de la oferta hídrica en la cuenca del estudio (Ecuación 5):

$$\Delta Q = \frac{\bar{Q} \times \Delta_{Q/\sigma}}{100} \quad (5)$$

## Resultados

La primera etapa consistió en la recolección de los insumos, donde se identificó que la cuenca tiene una estación de categoría climática principal llamada Gachaneca (24015290) con el área de influencia de 2.500 km<sup>2</sup> según OMM (2011), la cual, no dispone de mediciones hidrológicas. Por eso se buscó una cuenca análoga que tuviera condiciones físico-geográficas y morfológicas similares. Por ende, se definió la cuenca del río Susa con el cierre hasta la estación limnigráfica con el nombre Puente Peralonso, la cual se encuentra a 18 km de la cuenca del río Gachaneca I y cuenta con los registros de caudales en el periodo de 1965-2008.

La cercanía en los valores de los parámetros morfométricos y climáticos define similitud en el régimen hídrico y en los patrones de escurrimiento superficial. A continuación, se presentan algunos valores de parámetros climáticos y morfométricos que evidencian similitud entre las dos cuencas analizadas.

Por otra parte, la distancia entre las dos cuencas (menos de 20 km) y su pertenencia a la misma vertiente indicaron que las condiciones climáticas son similares. De acuerdo con esta información, se concluyó que la cuenca alta del río Susa hasta la estación Puente Peralonso se puede considerar como cuenca análoga.

Posteriormente se llevó a cabo el traspaso de caudales en función de las áreas aferentes de las dos cuencas para obtener la *serie natural* de caudales de la cuenca Gachaneca I.

**Tabla 1.** Principales parámetros climáticos y morfométricos de la cuenca del estudio y referencia

Cuenca/parámetro	Parámetros morfométricos				Parámetros climáticos			
	Área (km <sup>2</sup> )	Índice de forma	Perímetro (km)	Altura (m)	T Media (°C)	T Mín (°C)	T Máx (°C)	P total anual (mm)
Gachaneca I	0,97	1,32	4,59	3.408	8,6	4,2	14,0	766,6
Susa hasta el puente Peralonso	0,81	1,18	3,77	2.547	14,2	9,7	19,5	680,0

T, temperatura; P, precipitación.

Con base en los datos de dichos caudales se construyó la curva de duración de caudales correspondiente al régimen natural y se obtuvieron los valores de IRH, oferta hídrica promedio y coeficiente de variación, los cuales se presentan en la primera fila de la Tabla 2. La curva de duración de los caudales se presenta en la Figura 3.

**Tabla 2.** Caracterización del régimen hídrico de la cuenca del río Gachaneca I bajo los escenarios analizados

Régimen	IRH	Q promedio (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Cv
Natural	0,36	0,34	1,61
Intervenido antrópicamente	0,26	0,31	1,77
Diferencia porcentual	-27,8%	-8,82	9,94

Como se puede observar, los datos relacionados en la primera fila de la Tabla 1, hacen referencia a la regulación hídrica, en donde la cuenca hidrográfica se puede caracterizar por tener un IRH muy baja debido a que dicho valor se encuentra por debajo de 0,5 (IDEAM, 2010a, pp. 178-180). Este resultado contradice el concepto común de que los páramos colombianos son reguladores del ciclo hidrológico (Cárdenas y Tobón, 2017, pp. 403-412). Realmente, la capacidad de regulación del régimen hídrico en cuencas hidrográficas depende de las condiciones del suelo, de las características geológicas y de las coberturas del suelo (Lazo et al., 2019, pp. 805-819), las cuales son muy variables en condiciones locales. En la cuenca hidrográfica Gachaneca I los suelos son superficiales, con presencia de fragmentos de roca en la superficie y con alto contenido de carbón orgánico y aluminio en la superficie y pendientes pronunciadas. Las coberturas vegetales se caracterizan por hierbazal denso, mosaico de pasto y cultivos transitorios y superficie boscosa en la parte alta de la cuenca. En conjunto, estas características de suelo y coberturas vegetales no contribuyen a una buena capacidad de regulación de escorrentía superficial.

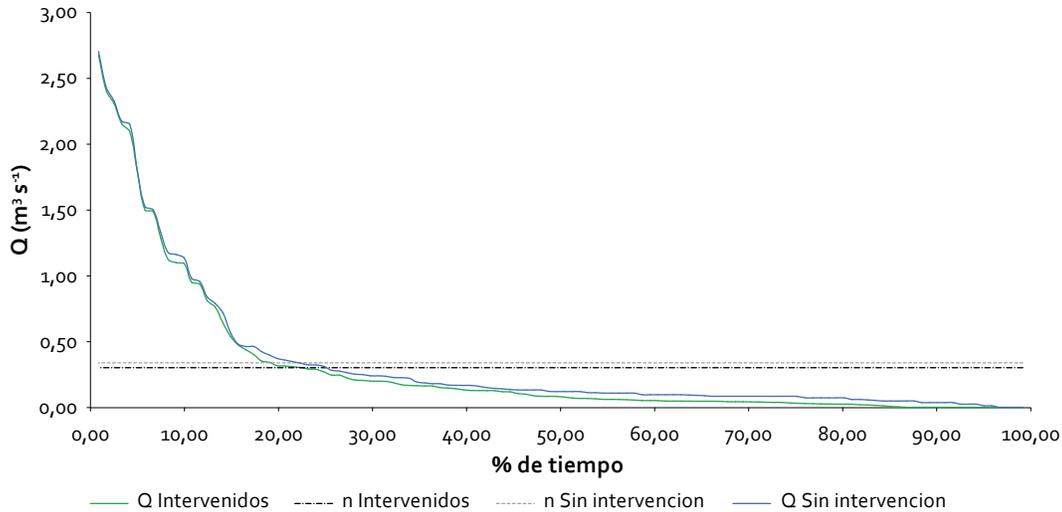
Posteriormente se identificaron los parámetros de IRH, oferta media y coeficiente de variación del régimen hídrico afectado por las demandas de agricultura. Para este fin, se requirieron datos de demanda

mensual de agua por cultivos y su área de siembra. A través de las imágenes satelitales correspondientes al año 2019, se identificó 0,15 km<sup>2</sup> destinados a los cultivos en la zona de estudio. Ya que los valores mensuales de riego no se encuentran disponibles, estos se obtuvieron de manera indirecta, empleando los datos climáticos e índice de cultivos (Allen et al., 2006, pp. 3-13), integrados al balance hídrico-climático (Claro, 2006, pp. 3-7), así como se menciona en la metodología. Los resultados de necesidades de riego de cultivos de papa en la cuenca indican que, en algunos periodos de años hidrológicos secos (se define como el valor de menor valor anual, tomando como base los caudales de la serie histórica disponible en el periodo del 1965 a 2018) (indicadores hídricos: IDEAM, 2010b) comprendidos entre los meses de febrero a marzo y de noviembre a diciembre, las demandas hídricas se acercan o superan la oferta hídrica en la cuenca hidrográfica. Estos resultados son alarmantes y deben ser comprobados con mediciones de demanda hídrica con el fin de evitar una posible escasez de agua en la cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta su importancia estratégica para conservación del ecosistema de páramo y la disponibilidad de agua para el embalse Gachaneca I.

En la Tabla 2 se presentan los valores del IRH, oferta media y coeficiente de variación bajo el escenario de riego de los cultivos de papa en la cuenca y en la tercera fila se presenta la diferencia porcentual entre estos parámetros.

Como se observa en los resultados, el IRH bajo el escenario de desarrollo de agricultura, disminuye 27,8%, llegando a tener un valor de 0,26. Este resultado es coherente con la evaluación del cambio de la oferta hídrica y variabilidad temporal, hecha a través del coeficiente de variación que indica que las actividades de riego disminuyen la oferta media en un 8,8% e incrementan la variabilidad temporal en un 9,94%, lo cual describe una menor disponibilidad del recurso hídrico junto con una mayor irregularidad de esta. Los resultados obtenidos de manera gráfica en la Figura 3.

La curva de duración bajo el escenario de intervención antrópica tiene mayores irregularidades que la curva de duración del régimen natural, lo que genera un incremento en el valor del coeficiente de variación. En la parte de caudales bajos con



**Figura 3.** Curvas de duración de caudales del régimen natural y afectado por el riego de cultivos en la cuenca del río Gachaneca I.

permanencia del 90% en adelante, los caudales son muy cercanos o iguales a cero, lo cual indica que, en algunos meses de años hidrológicos con oferta hídrica restringida, la demanda hídrica se iguala a la oferta dejando el río sin oferta ambiental. Este hecho puede producir graves daños sobre los ecosistemas de páramo y sobre el suministro del agua al embalse Gachaneca I.

Teniendo en cuenta que el efecto de desarrollo de agricultura en la cuenca impacta más la variabilidad del recurso hídrico que su oferta natural, la alteración del régimen hídrico se evaluó por el cambio porcentual del coeficiente de variación, utilizando la Ecuación 5. Este valor equivale a  $0,034 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  como valor estimado a través del cual puede calcularse la compensación económica de PSA de la regulación hídrica.

## Discusión

El tema de la evaluación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica abre un abanico de aspectos a discutir que abarcan desde la falta de mediciones hidrometeorológicas, biológicas, de presiones antrópicas y otras en zonas de alta montaña de Colombia, hasta la evaluación de la recuperación de servicios ecosistémicos como efecto de programas de conservación y restauración de cuencas hidrográficas.

Los ecosistemas de páramos colombianos se encuentran bajo constante presión de factores exógenos (cambio climático, emisiones de grandes centros urbanos e industriales) y endógenos (intervenciones antrópicas en la zona de páramos) que afectan de manera negativa la prestación de servicios ecosistémicos. No obstante, la falta de monitoreos en páramos dificulta su evaluación y grado de afectación por el desarrollo de actividades socioeconómicas. Por ende, existe una creciente necesidad de crear un sistema de información multicriterio en páramos con el fin de evaluar el estado de los ecosistemas y su sensibilidad bajo diferentes escenarios de desarrollo (Llambí et al., 2019, pp. 8-20). Esto permitiría una adecuada gestión del territorio, conservando balance entre la sanidad del ambiente y el desarrollo humano.

La falta de monitoreo hidrológico en páramos lleva a generalizaciones inadecuadas sobre la capacidad de estos ecosistemas de regular la escorrentía superficial. En condiciones locales, es costumbre asociar a los páramos con sus buenas capacidades de regulación hídrica, mientras que los resultados presentados en este estudio y en diferentes investigaciones de la zona alto Andina se llega a la conclusión de que la capacidad de regulación hídrica depende de las características de suelo y coberturas vegetales que tienen una significativa variación espacial (Lazo et al., 2019, pp. 805-819) que conlleva a la

variabilidad en la prestación de los servicios ambientales de páramos.

Así mismo, la falta de un sistema de información y de monitoreo en páramos obliga a trabajar, como en el caso del estudio, con las fuentes de información secundaria que pueden llevar a una incertidumbre y generalización de los resultados obtenidos. Esto, en su parte, pueden orientar sobre el posible grado de afectación de los servicios ambientales del páramo y sobre prefactibilidad de los proyectos PSA en la regulación hídrica, pero deben ser corroborados con las mediciones *in situ* que requieren un costo temporal y económico elevado y, posiblemente, desvirtuar proyectos de restauración de cuencas hidrográficas.

Por último, aunque la restauración de coberturas naturales en cuencas hidrográficas mejora la regulación hídrica, disminuye la erosión y los servicios de provisionamiento, estos impactos positivos se pueden evaluar a mediano y largo plazo considerando la recuperación paulatina de las superficies con coberturas naturales (Bonnesoeur et al., 2019, pp. 569-584). Eso exige que los proyectos de conservación de páramos no solo deben generar medidas de restauración, sino su constante monitoreo para evaluar su eficiencia y eficacia. Otra de las alternativas de conservación de páramos se relaciona con prácticas de agricultura sostenible, involucrando conocimientos ancestrales de diversidad estructural multiestratificada que incrementa la capacidad de regulación de cuencas (Ruiz-Agudelo et al., 2019, pp. 26-35).

## Conclusiones

El diseño de la metodología a través de cual se puede evaluar el cambio en la regulación hídrica causado por actividades como agricultura pueden ser aplicados en los proyectos PSA (Pago por Servicios Ambientales) de regulación hídrica, ya que cumplen la normatividad vigente (Decreto 1007/MADS, 2018, p. 2).

La metodología puede ser aplicada bajo diferentes escenarios de disponibilidad de la información hidrometeorológica y demanda agrícola. No obstante, sirve en la etapa de evaluación de prefactibilidad de proyectos y, al llevarla a la siguiente etapa, se recomienda complementar fuentes de información secundaria con los datos de mediciones de campo.

La evaluación de la capacidad de regulación hídrica de la cuenca del río Gachaneca I demostró que el páramo Rabanal por sus condiciones de suelo y coberturas vegetales no tiene una buena capacidad de regulación hídrica, resultando un valor por debajo de 0,5 para IRH.

El desarrollo de las actividades de riego de los cultivos transitorios disminuye aún más la capacidad de regulación de la cuenca hidrográfica en un 27,8%, incrementando la variabilidad temporal del régimen hídrico.

La demanda hídrica anual para el riego de cultivos transitorios disminuye la oferta hídrica promedio en un 8,8%.

En los meses de estiaje de años hidrológicos con la oferta hídrica inferior al valor promedio, la demanda hídrica puede igualarse a la oferta de la cuenca, vulnerando la disponibilidad de agua para el ecosistema y para las afluencias del embalse Gachaneca I. Esto indica que la cuenca debe ser priorizada para la ejecución del proyecto PSA de regulación hídrica para recuperar los servicios ecosistémicos de provisión y regulación hídrica.

El impacto de la agricultura sobre la variabilidad del recurso hídrico es mayor que el de la oferta hídrica, aumentando el coeficiente de variación en un 9,92%. Esto indica que la oferta hídrica interanual se vuelve más irregular y menos constante, lo cual tiene un impacto negativo en la regularidad de las afluencias del embalse Gachaneca I.

## Referencias

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. FAO, Roma. pp. 3-13.
- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M., Ochoa-Tochachi, B., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., Mathez-Stiefel, S.-L., 2019. Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *For. Ecol. Manag.* 433, 569-584. DOI: 10.1016/j.foreco.2018.11.033
- Cárdenas, M., Tobón, C., 2017. Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Rev. UDCA Act. & Div. Cient.* 20(2), 403-412. DOI: 10.31910/rudca.v20.n2.2017.381
- Claro, F., 2006. Índice de disponibilidad hídrica (IDH): metodología de cálculo y aplicación en Colombia. IDEAM, Bogotá, DC.

- Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), 2008. Estudio sobre el estado actual del macizo del páramo de Rabanal. Convenio interadministrativo No. 07-06-263-048 (000404). CAR; IAvH; Corporchiv, Bogotá, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), 2009. Acuerdo 026, por el cual se declara y alinda el Parque Natural Regional Rabanal, en el Municipio de Samacá en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá, Corpoboyacá. Tunja, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), 2016. Acuerdo 030, por medio del cual se declara y alinda el Parque Natural Regional Rabanal, en el municipio de Samacá en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Boyacá - Corpoboyacá. Tunja, Colombia.
- Fu, B., Wang, Y., Xu, P., Yan, K., 2013. Mapping the flood mitigation services of ecosystems - A case study in the Upper Yangtze River Basin. *Ecol. Eng.* 52, 238-246. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.11.008
- García, C., 2007. Regulación hídrica bajo tres coberturas vegetales en la cuenca del río San Cristobal, Bogotá D.C. *Colomb. For.* 10, 127-147. DOI: 10.14483/udis-trital.jour.colomb.for.2007.1.a07
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), 2010a. Estudio Nacional del Agua 2010. Bogotá, DC.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), 2010b. *Database Evaluación del Recursos Hídrico: Indicadores hídricos*. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1>; consultado: mayo de 2020.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), 2017. Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia para Colombia. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21147/Evapotranspiracion+de+Referencia+ETo+para+Colombia.pdf/12700c18-c492-40cc-8971-46f48f144824>; consultado: febrero de 2021.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), 2018. Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá, DC.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), 2007. Atlas de páramos de Colombia. Bogotá, DC.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), 2017. Biodiversidad colombiana: números para tener en cuenta. Boletín de prensa, disponible en: <http://www.humboldt.org.co/es/boletines-y-comunicados/item/1087-biodiversidad-colombiana-numero-tener-en-cuenta>; consultado: mayo de 2020.
- Jackson, B., Pagella, T., Sinclair, F., Orellana, B., Henshaw, A., Reynolds, B., McIntyre, N., Wheeler, H., Eycott, A., 2013. Polyscape: A GIS mapping framework providing efficient and spatially explicit landscape-scale valuation of multiple ecosystem services. *Landsc. Urban Plan.* 112, 74-88. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2012.12.014
- Lazo, P., Mosquera, G., McDonnell, J., Crespo, P., 2019. The role of vegetation, soils, and precipitation on water storage and hydrological service in Andean Páramo catchment. *J. Hydrol.* 572, 805-819. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.03.050
- Llambí, L., Becerra, M., Peralvo, M., Avella, A., Baruffol, M., Díaz, L., 2019. Monitoring biodiversity and ecosystem services in Colombia's high andean ecosystems: Toward an integrated strategy. *Mt. Res. Dev.* 39(3), 8-20. DOI: 10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00020.1
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS), 2013. Metodología para la estimación y evaluación del caudal ambiental en proyectos que requieren licencia ambiental. Bogotá, DC.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (MADS), 2018. Decreto 1007, por el cual se modifica el Capítulo 8 del Título 9 de la Parte 2 del Libro 2 del Decreto número 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con la reglamentación de los componentes generales del incentivo de pago por servicios ambientales y la adquisición y mantenimiento de predios en áreas y ecosistemas estratégicos que tratan el Decreto-ley número 870 de 2017 y los artículos 108 y 111 de la Ley 99 de 1993, modificados por los artículos 174 de la Ley 1753 de 2015 y 210 de la Ley 1450 de 2011, respectivamente. DO 50.624. Bogotá, DC.
- Organización Meteorológica Mundial (OMM), 2011. Guía de prácticas hidrológicas. Vol. 1: Hidrología - De la medición a la información hidrológica. OMM-N 168. 6a ed. Ginebra.
- Onaindia, M., Fernández de Manuel, B., Madariaga, I., Rodríguez-Loinaz, G., 2013. Co-benefits and trade-offs between biodiversity, carbon storage and water flow regulation. *For. Ecol. Manag.* 289, 1-9. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.10.010
- Rodríguez-Morales, M., Acevedo-Novoa, D., Machado, D., Ablan, M., Dugarte, W., Dávila, F., 2019. Ecohydrology of the Venezuelan páramo: Water balance of a high Andean watershed. *Plant Ecol. Divers.* 12(6), 573-591. Doi: 10.1080/17550874.2019.1673494
- Rodríguez, C., 2016. Estimación de la valorización social de los servicios ecosistémicos en el marco del ejercicio de valoración económica de un servicio ecosistémico en el páramo de Rabanal (Boyacá-Cundinamarca). Informe de consultoría: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH), Bogotá, DC.
- Ruiz-Agudelo, C., Hurtado, S., Carrillo, Y., Parrado, C., 2019. Lo que sabemos y no sabemos sobre los ecosistemas agroforestales tropicales y la provisión de múltiples servicios ecosistémicos. Una revisión. *Ecosistemas* 28(3), 26-35. DOI: 10.7818/ECOS.1697