

Captadores de niebla y recolección de agua en un ecosistema de páramo colombiano

Fog catchers and water collection in a Colombian paramo ecosystem

Colectores de niebla en un páramo andino

Francisco Cortés-Pérez^{1*} ; Oscar M. Roa-Casas¹ ; Carlos Andrés Villate-Suarez¹ ; David Ricardo Hernández-Velandia¹ ; Felipe Moreno-Mancilla¹ ; Laura L. Hernández-Pineda¹ 

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, grupo de investigación Ecología de Bosques Andinos Colombianos (EBAC). Tunja - Boyacá, Colombia; e-mail: francisco.cortes@uptc.edu.co; oscarroa884@gmail.com; cavsoft@hotmail.com; davidhvel@gmail.com; felipemancilla@gmail.com; liliher12@hotmail.com

*autor de correspondencia: dcamargo@agrosavia.co

Cómo citar: Cortés-Pérez, F.; Roa-Casas, O.M.; Villate-Suarez, C.A.; Hernández-Velandia, D.R.; Moreno-Mancilla, F.; Hernández-Pineda, L.L. 2023. Captadores de niebla y recolección de agua en un ecosistema de páramo colombiano. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 26(1):e1994. <http://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.1994>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: junio 17 de 2021 **Aceptado:** abril 14 de 2023 **Editado por:** Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

Los captadores de niebla son usados para interceptar agua contenida en la niebla y abastecer de agua a comunidades que habitan en lugares donde este recurso escasea. Se evaluó el uso de captadores de niebla para la captación de agua en un área ubicada en el páramo Pan de Azúcar, Duitama-Boyacá. Se instalaron 60 captadores de niebla, 24 de ellos, con dispositivos para medir los volúmenes de agua interceptados. Los volúmenes de agua captados, se midieron en periodos de 24 horas, por 26 días, durante un año y se usó el modelo geométrico para diferenciar el agua proveniente de la niebla. La precipitación registrada fue mayor a la reportada en la literatura. La precipitación mensual osciló entre 51 y 1198 mm y la temperatura media mensual entre los 6 y 8 °C. Los volúmenes de agua promedio colectados por los 24 captadores de niebla estuvieron entre los 0,02 Lm⁻² día⁻¹ hasta los 4,4Lm⁻² día⁻¹. Los aportes de agua provenientes de la niebla oscilaron entre los 0,02 y 1,77 mmdía⁻¹. La dirección del viento no afectó la captación de agua y aún se presenta incertidumbre al separar el aporte real de agua proveniente de la niebla a partir de la lluvia orográfica, lo cual, sigue siendo un desafío en los ecosistemas de páramo, por lo que se debe ampliar la investigación, para mejorar los diseños y las eficiencias de los captadores de niebla.

Palabras clave: Páramos andinos; Recursos de agua dulce; Redes atrapanieblas; Sistema de colecta de agua; Suministro de agua doméstica.

ABSTRACT

Fog collectors are used to intercept water contained in fog and supply water to communities that live in places where this resource is scarce. We evaluated the use of mist collectors to collect water in an area located in the Pan de Azúcar paramo, Duitama-Boyacá. We installed 60 mist collectors, 24 of them with devices to measure the volumes of water intercepted. The volumes of water captured were measured in periods of 24 hours for 26 days during one year and we used the geometric model to differentiate the water from the fog. The recorded precipitation was higher than that reported in the literature. Monthly rainfall ranged between 51 and 1198mm and mean monthly temperature ranged between 6 and 8°C. The average volumes of water collected by the fog collectors were below 0.5Lm⁻² day⁻¹ with a maximum of 4.4Lm⁻² day⁻¹. The contributions of water from the mist ranged between 0.02 and 1.77 mmday⁻¹. The direction of the wind did not affect the capture of water and there is still uncertainty when separating the real contribution of water from the fog from the orographic rain, which continues to be a challenge in the paramo ecosystems, for which it is necessary to expand research, to improve the designs and efficiencies of fog collectors.

Keywords: Andean paramos; Domestic water supply; Fog Collectors; Fresh water resources; Water collection system.

INTRODUCCIÓN

Los páramos ofrecen gran variedad de servicios ecosistémicos que benefician a sus comunidades aledañas (Vásquez Cerón & Buitrago Castro, 2011). Entre los más importantes está la capacidad de interceptación, de almacenamiento y de flujo del agua en las fuentes hídricas superficiales y subterráneas, que ayudan en la regulación del clima, la conservación de la biodiversidad y el abastecimiento de agua (Vásquez Cerón & Buitrago Castro, 2011; Rodríguez-Morales *et al.* 2019); sin embargo, los páramos han sido deteriorados por el hombre, a través del tiempo, provocando que la prestación de servicios ecosistémicos se vea alterada (Pedrono *et al.* 2016; Said *et al.* 2019).

El servicio más afectado en los páramos es quizás la provisión de agua, que se evidencia en la reducción de los niveles de las lagunas y de los caudales de los ríos que provienen de ellos (Cárdenas-Vargas & García-Valbuena, 2019; Ruíz Ordoñez *et al.* 2023). Esta reducción podría estar relacionada con la pérdida de captación o interceptación de agua de los páramos, como puede estar ocurriendo en el páramo Pan de Azúcar, ubicado en el complejo Guantiva - La Rusia, departamento de Boyacá, Colombia (Morales *et al.* 2007). En este páramo se encuentra la laguna Pan de Azúcar, cuya microcuenca de captación hídrica ha sido sometida a procesos de degradación por actividades antrópicas (Crespo *et al.* 2010), que disminuye su capacidad de retención y de almacenamiento hídrico, afectando al municipio de Duitama - Boyacá, que se abastece del agua, que proviene de dicho páramo (Alcaldía municipal Duitama, 2016).

Hace varias décadas la cobertura vegetal del páramo Pan de Azúcar estaba principalmente representada por especies leñosas de porte arbustivo que, junto con las especies de hábito herbáceo y rosetas, contribuyen en la estructura y la función del páramo (Valencia *et al.* 2013); sin embargo, la disminución y la pérdida de leñosas arbustivas en algunos sectores, pudo provocar la reducción del principal mecanismo de captación de lluvia horizontal o niebla, ya que la vegetación, particularmente los arbustos y árboles, son considerados buenos colectores o interceptores de niebla (Fessehayé *et al.* 2014).

Por esto, autores como Estrela *et al.* (2019) consideran la necesidad de crear y usar nuevas tecnologías que permitan suplir o aumentar la probabilidad de captación de agua de niebla y reducir la escasez de agua, a partir de fuentes alternativas y no convencionales (Fessehayé *et al.* 2014). De acuerdo con Cárdenas-Vargas & García-Valbuena (2019), en Colombia, se puede aprovechar el potencial para la recolección de agua de niebla en ubicaciones montañosas, para usos domésticos, agrícolas, comerciales o para proyectos de restauración ecológica y reforestación (Fessehayé *et al.* 2014; Estrela *et al.* 2019).

Una de estas tecnologías para la captación de agua de niebla con sistemas pasivos son los colectores de niebla, estructuras artificiales que se instalan a determinadas altitudes para interceptar las partículas de agua que posee la neblina, a través de una malla de captación (Regalado & Ritter, 2016; Estrela *et al.* 2019), por lo tanto, podría ser útil usarlas en sitios disturbados, donde se ha perdido la vegetación y con ella, la capacidad de captación de agua, así como

para favorecer procesos de restauración ecológica en estas áreas, mediante el aumento de agua disponible para las plantas. Por esto, en este estudio, se planteó como objetivo, evaluar la captación de agua utilizando colectores de niebla en el páramo Pan de Azúcar, Duitama, Boyacá.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio: El páramo Pan de Azúcar está ubicado en el complejo de páramo Guantiva-La Rusia, que se localiza en el flanco occidental de la cordillera oriental, entre los 3.100 y 4.280 m s.n.m. En el área predominan chuscales entremezclados con pajonales y frailejonales-rosetales, que están fragmentados e intervenidos (Morales *et al.* 2007). El páramo Pan de Azúcar es un páramo seco, con una precipitación media anual de 1128 mm, una temperatura promedio de 8 °C, con dos periodos de lluvia de marzo a mayo y de septiembre a noviembre y dos periodos secos, de junio a agosto y de diciembre a febrero (Alcaldía municipal Duitama, 2012; 2016).

La vegetación característica son los herbazales con presencia de plantas de los géneros *Agrostis* y *Calamagrostis*; frailejonales con predominio de diferentes especies de *Espeletia*, arbustales con los géneros *Weinmania*, *Polylepis*, *Hypericum*, entre otros y una plantación forestal de *Pinus patula*. En este páramo se encuentra la laguna Pan de Azúcar, con coordenadas 5°55'23.39"N - 73° 1'55.80"O (Figura 1), donde nace el río Surba, la principal fuente de agua para el municipio de Duitama (Alcaldía municipal Duitama, 2016).

Captadores de niebla: Se instalaron 60 colectores de tipo convencional, los cuales, constan de mallas planas bidimensionales, sostenidas con dos postes de madera de 3 m de altura, enterrados perpendicularmente al suelo. La malla fue de polisombra negra al 80 %, con un área de captación de 6 m², colocada a una altura de 70 cm del suelo; los postes fueron anclados mediante un sistema de tensores de guaya y pernos, con el fin de mantener la tensión de la red de captación. A los 24 colectores seleccionados aleatoriamente se les instaló en la base una canaleta en PVC de 4", acoplada a una manguera que se conectó a dos recipientes de recolección, con una capacidad de 22.71 litros, cada uno (Figura 2).

Fase de campo: Los colectores de niebla fueron agrupados en dos conjuntos de 30, ubicados en las coordenadas 5°55'29.35"N - 73° 1'26.50"O y 5°55'43.96"N - 73°1'50.76"O, respectivamente (Figura 1), dispuestos en 20 puntos ubicados aleatoriamente, mediante una grilla de georreferenciación de celdas de 100 m². En cada punto georreferenciado, se instalaron grupos de 3 colectores de niebla ubicados en distintas posiciones (perpendicular y paralelo), a la dirección preponderante del viento. Los colectores fueron instalados en dos secciones ribereñas desprovistas de vegetación arbustiva, correspondientes a dos quebradas que alimentan la Laguna Pan de Azúcar. La dirección preponderante del viento se estableció mediante banderines instalados cerca de las dos zonas con colectores y a 3 m de altura, durante varios días se registró la dirección cada hora, entre las 9:00 y las 16:00 horas, mediante una rosa de los vientos, con referencia del norte geográfico.

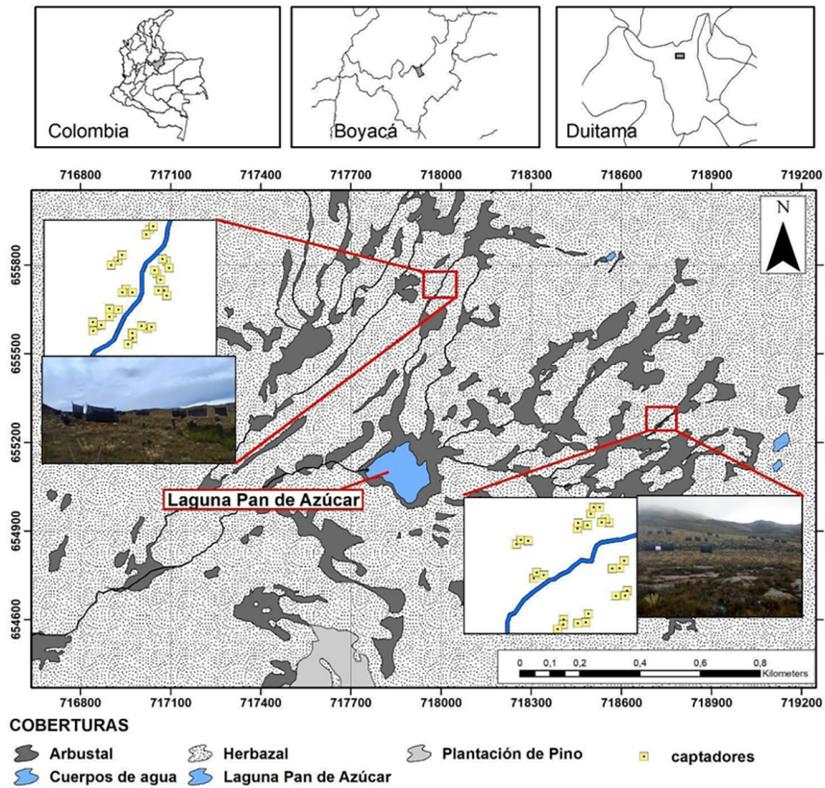


Figura 1. Ubicación de los captadores de niebla en el páramo Pan de Azúcar, Duitama-Boyacá. Los círculos de color rojo muestran las dos áreas seleccionadas para la instalación de los captadores de niebla. La cuadrícula que se ve en los círculos grandes indica las celdas de 100 m².

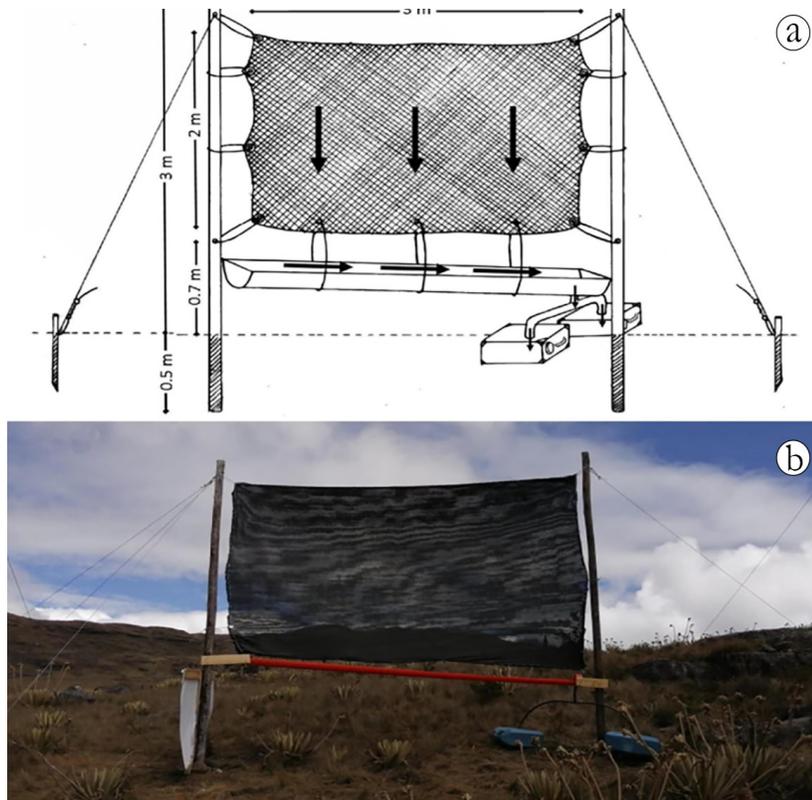


Figura 2. Captador de niebla. a) Esquema del captador de niebla utilizado; b). Fotografía del captador de niebla en el páramo Pan de Azúcar, Duitama - Boyacá, Colombia.

Toma de datos: Se realizó cada quince días durante un año, entre el 17 de septiembre de 2020 y el 28 de septiembre de 2021, se registró el volumen de agua captada en periodos de 24 horas, a las 09:00 a.m. de cada día, para un total de 26 días de registros diarios. Las mediciones del volumen de agua se efectuaron mediante un recipiente aforado, con una capacidad de 12 L y una probeta aforada, con capacidad de 250 mL. La temperatura y la precipitación se registraron mediante un pluviómetro con datalogger, marca HOBO, modelo RG3-M y la humedad relativa, mediante un datalogger marca HOBO Pro v2 Temp/RH U23-001, programados para registrar los datos cada 5 minutos. Ambos equipos quedaron ubicados en las coordenadas 5°55'36.43"N y 73°1'38.35"O, a una distancia menor de 500 m a los captadores de niebla.

Para complementar la información meteorológica se obtuvieron los datos de tres estaciones cercanas al lugar de estudio: la primera, denominada "ANTENA TV RUSIA LA", ubicada a 3.650 m s.n.m (IDEAM, 2021); la estación "GUANENTÁ", ubicada a 3.945 m s.n.m. (PNN, 2021) y la estación "ANDALUCIA", a 3265 m s.n.m (IDEAM, 2021). Estas tres estaciones estaban ubicadas a 6,8 km, 9 km y 3,8 km, respectivamente, de los equipos instalados en el páramo Pan de Azúcar.

Análisis de datos: Con los datos recolectados de precipitación y de temperatura se construyó el diagrama ombrotérmico, para los meses de estudio. Se hizo un gráfico de precipitación comparativo entre los datos registrados en el páramo Pan de Azúcar y las estaciones climatológicas consultadas. El volumen de agua recolectado se tomó para un área de captación de la malla de 6 m², pero se usó el volumen de agua captado en un área de 1 m², para poder hacer los análisis estadísticos. Se verificó previamente el supuesto de normalidad para los datos de volumen de agua captado, usando la prueba de Shapiro-Wilk y se aplicó una prueba de Friedman, para hallar diferencias significativas en la captación de agua diaria por los captadores perpendiculares y paralelos a la dirección preponderante del viento, durante los meses de estudio. Los análisis se realizaron en Rstudio versión 4.1.1 (R Core Team, 2021), usando los paquetes ggplot2 versión 3.3.2 (Wickham, 2016) y dplyr (Wickham *et al.* 2021), para la realización de figuras y el paquete stats (R Core Team, 2021), para los análisis estadísticos.

Para diferenciar el agua recolectada proveniente de neblina en los colectores se usó el modelo geométrico propuesto por Domínguez *et al.* (2017; 2019). Para ello, se utilizaron los volúmenes de agua captados cada 24 horas. El modelo se basa en que la intensidad y la dirección de la lluvia captada por un pluviómetro y el colector de neblina es la misma y ocurre si ambos dispositivos están ubicados cerca. Además, se asume que la intercepción de neblina se produce sobre la proyección perpendicular a la dirección del viento de la malla del colector. A continuación, se explica el modelo aplicado a los datos registrados en el páramo Pan de Azúcar:

Se halla el diámetro promedio de una gota de lluvia (RD) (ecuación 1):

$$RD=2,23*(0,03937*RF_v)^{0,102} \quad \text{ecuación 1}$$

RF_v es igual a la precipitación diaria medida por el pluviómetro, donde RD y RF_v están dadas en mm y mm t⁻¹ (t=tiempo del registro de precipitación), respectivamente. Para este estudio, se utilizó la precipitación registrada por el pluviómetro cada 24 horas. La velocidad de caída de la gota (UD) dada en ms⁻¹, se estimó a partir de RD (ecuación 2):

$$UD=3,378*Ln(RD)+4,213 \quad \text{ecuación 2}$$

El ángulo de inclinación de la lluvia (γ), se calculó a partir de la ecuación 3:

$$\gamma=U / UD \quad \text{ecuación 3}$$

Donde, U es la velocidad del viento, para el páramo Pan de Azúcar fue de 2,5ms⁻¹ (Meteoblue, 2021), RF_a es la magnitud de la lluvia real que tiene una inclinación y se puede estimar con una relación trigonométrica a partir de la ecuación 4:

$$RF_a =RF_v / \cos(\gamma) \quad \text{ecuación 4}$$

Dadas las suposiciones anteriores de los dos dispositivos, el volumen captado por el colector de niebla correspondiente a la lluvia real (VR_a) (ecuación 5):

$$VR_a =RF_a*S_r \quad \text{ecuación 5}$$

Donde, S_r es la proyección de la superficie del colector perpendicular a la dirección de RF_a de los colectores bidimensionales usados en el páramo Pan de Azúcar; S_r se halló usando la figura geométrica del perímetro de un cuadrado que corresponde a la sumatoria de todos sus lados; para el caso de los análisis, se hizo para el área de captación de 1 m² del captador de niebla. Finalmente, la magnitud de la intercepción de neblina dada en unidades de mmdía⁻¹, captada por el colector (NI), está dada por la ecuación 6:

$$NI = (VF_t - fe*VR_a) / S_v \quad \text{ecuación 6}$$

Donde, VF_t corresponde al volumen captado por los colectores de niebla, se usó el promedio del volumen de agua captado diariamente durante los 26 días de registro. Fe es un coeficiente de corrección aplicado a la medición de la lluvia en el colector, que corresponde a la pendiente de un modelo de regresión lineal, que relaciona la precipitación medida por el pluviómetro; el cálculo del coeficiente Fe en el páramo Pan de Azúcar, se construyó de una regresión lineal, usando los datos de precipitación diarios de todo el tiempo de estudio (n=353). S_v es la proyección de la superficie del colector perpendicular a la dirección del viento; para los colectores del páramo Pan de Azúcar, S_v fue estimado con las mismas relaciones trigonométricas utilizadas para obtener S_r (Domínguez *et al.* 2019) y fue constante para todo el periodo de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de las variables ambientales. Se observó que no existe un déficit hídrico del páramo Pan de Azúcar durante el año de estudio, ya que la precipitación no estuvo por debajo de

la temperatura en ninguno de los meses de registro, incluso, en el mes de enero, que registró una precipitación por debajo de los 80 mm (Figura 3a). La precipitación mensual osciló entre 51 y 1198 mm, en noviembre se registró el valor máximo y enero el valor mínimo; otros valores altos de precipitación se registraron en abril, mayo y agosto: 935, 831 y 794 mm, respectivamente (Figura 3a). La temperatura media mensual osciló entre los 6 y 8 °C, siendo diciembre, enero y febrero los que registraron temperaturas cercanas a los 8 °C y la temperatura más baja se dio en julio, con 6,6 °C (Figura 3a). Según el diagrama ombrotérmico, el régimen de lluvias en el páramo Pan de Azúcar es bimodal con mayores precipitaciones entre marzo-mayo y octubre-noviembre, lo que coincide con el régimen del complejo Guantiva – La Rusia, con mayores lluvias de abril-mayo y octubre-noviembre (Martínez-O. *et al.* 2019).

De las cuatro estaciones meteorológicas consultadas, solo la precipitación de Guanenta tuvo un comportamiento similar al registrado en Pan de Azúcar, con valores mensuales por arriba de los 550 mm, de marzo a mayo y noviembre, y bajas precipitaciones, de diciembre a febrero (Figura 3b). A pesar de la cercanía de las otras dos estaciones “ANTENA TV RUSIA LA” y “ANDALUCIA” al área de estudio, las precipitaciones difieren mucho; para estas dos estaciones, la precipitación osciló entre los 35 y los 200 mm, con valores máximos de marzo a mayo y de octubre a noviembre (Figura 3b). Martínez-O. *et al.* (2019) indican que para el complejo Guantiva – La Rusia las precipitaciones fluctúan entre 700 y 3.000 mm anuales y la temperatura oscila entre 12 y 30 °C.

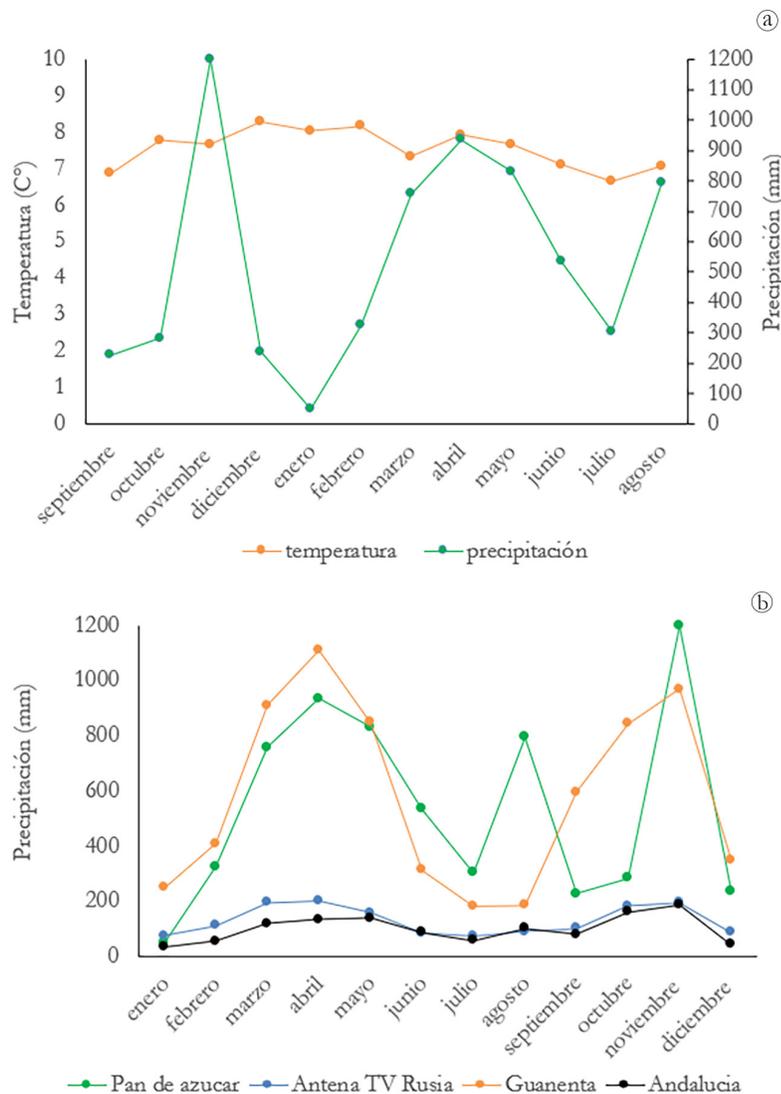


Figura 3. Registro de las variables climáticas en el páramo Pan de Azúcar. a) diagrama ombrotérmico de septiembre del 2020 a agosto del 2021; b) registro de la precipitación de cuatro estaciones meteorológicas en el complejo Guantiva - La Rusia desde el mes de enero hasta el mes de diciembre del 2021.

En el páramo Pan de Azúcar, se registró un total de 6.528 mm durante el año de estudio, clasificándolo como un páramo pluvial, según la clasificación pluviométrica propuesta por Díaz-Granados Ortiz *et al.* (2005); no obstante, Pan de Azúcar se ha reportado, quizá de manera equivocada, pues no se tiene registro histórico de su clima, como páramo seco (Alcaldía municipal Duitama, 2012), por su posición geográfica en la vertiente occidental de la cordillera oriental (Vásquez Cerón & Buitrago Castro, 2011); sin embargo, los resultados de este estudio indican que la precipitación es mayor, probablemente, influenciado por su cercanía al Santuario de Flora y Fauna Guanentá Alto Río Fonce (IAVH, 2017), que está regulado por las lluvias orogénicas provenientes del valle del Magdalena y los vientos locales de Santander, que presenta un régimen húmedo (Morales *et al.* 2007). Además, es posible que la precipitación registrada para este estudio también esté influenciada por el fenómeno de la niña, que registró un excedente de precipitación del 120-160 % para la provincia Tundama del departamento de Boyacá, durante el 2020 e inicios de 2021 (IDEAM, 2020).

Cuantificación de la interceptación mensual de los captadores de niebla. Los rendimientos diarios fueron mayores en marzo, con un promedio de $1,73 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ de los captadores paralelos y $1,25 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ de los captadores perpendiculares, con valores máximos por arriba de los $6 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. La mayoría de los meses registraron promedios por debajo de $1,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, aunque se observan algunos datos atípicos en noviembre, por arriba de los $2 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, en captadores perpendiculares (Figura 4a). La prueba de Friedman mostró que no hay diferencias significativas (p -valor = 0,52) en la captación de agua por los captadores perpendiculares y paralelos durante los meses de estudio; sin embargo, los valores de agua recolectados fueron bajos, con promedios entre los 0 y $0,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, similares a los promedios registrados por Tan *et al.* (2019).

Para los 26 días de registros diarios del páramo Pan de Azúcar, la precipitación diaria fue menor a 10 mm en la mayoría de los días. La máxima precipitación fue de 69 mm registrada el 16 de marzo del 2021, mientras que en los días de octubre, enero y septiembre fue de 0 mm. Otros días que tuvieron precipitaciones por arriba de los 30 mm fueron el 20 de noviembre y 29 de diciembre del 2020 (Figura 4b). El día 16 de marzo del 2021, se registró el mayor volumen de agua diario, con un promedio de $4,4 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, con valores máximos que llegaron a los $7,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. En general, en la mayoría de los días se captaron menos de $1,5 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$, aunque tres captadores pudieron recoger más de $2 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ el 19 de noviembre del 2020 (Figura 4c).

Respecto a otros estudios realizados en Colombia, García-Ubaque *et al.* (2013) registraron un promedio de agua de $7,21 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ en mallas de 6 m^2 , en el municipio de San Antonio-Cundinamarca o Molina & Escobar (2008), quienes obtuvieron valores diarios entre los $1,3$ y $4,8 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. Cárdenas-Vargas & García-Valbuena (2019), comparando tres tipos de captadores, registraron promedios entre los $0,97$ y $1,94 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$. Estos resultados muestran una mayor captación de agua en estas zonas de estudio.

En el caso de otros países de África, Medio Oriente, Asia y la Costa Oeste de Estados Unidos, los promedios oscilaron entre los $2,4$ y $20 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$ (Abdul-Wahab *et al.* 2007; Domen *et al.* 2014; Gandhidasan & Abualhamayel, 2012; Marzol & Sánchez-Megía, 2008). Para Latinoamérica, Tan *et al.* (2019) hicieron una revisión de varios estudios y encontraron promedios que oscilaban entre los $0,1$ y $25 \text{ Lm}^{-2}\text{día}^{-1}$; no obstante, los resultados obtenidos de estos estudios se basan en distintas metodologías usadas en el cálculo del agua proveniente de la neblina, como los modelos matemáticos propuestos por Domínguez *et al.* (2017; 2019) o Imteaz *et al.* (2011) o la importancia de la estacionalidad y variables climáticas en los distintos sitios de estudio (Montecinos *et al.* 2018; Regalado & Ritter, 2019) o, simplemente, la forma en tomar los datos. Con toda esta variedad de metodologías, no se cuenta aún con un método estándar para cuantificar la interceptación de niebla por los captadores (García-Ubaque *et al.* 2013) y su implementación presenta ciertas limitaciones (Fessehaye *et al.* 2014).

Cuantificación del agua proveniente de la niebla. Se usó el modelo geométrico descrito como una primera aproximación a la separación de la neblina de la lluvia; se encontró que el promedio de la intensidad de interceptación de niebla de los captadores osciló entre los $0,02$ y $1,77 \text{ mmdía}^{-1}$, siendo el 16 de marzo del 2021 el que registró este último valor. De los 26 días, 12 días registraron valores cercanos a los 0 mmdía^{-1} , tres días presentaron registros por arriba de los $0,4 \text{ mmdía}^{-1}$ y los demás días oscilaron entre los $0,1$ y $0,3 \text{ mmdía}^{-1}$ (Figura 4d). Estos valores son bajos comparados con los registrados por Echeverría *et al.* (2020), donde obtuvieron valores de los $3,4$ a los $7,9 \text{ mmdía}^{-1}$, en captadores cilíndricos y bidimensionales, con diferente coeficiente de sombra de la malla en la Isla de San Cristóbal- Galápagos; sin embargo, las variables climáticas de los dos ecosistemas difieren bastante, ya que San Cristóbal se encuentra a 600 m s.n.m. y registró un máximo de 72 mm diarios de precipitación y temperaturas de $18,2^\circ\text{C}$ (Echeverría *et al.* 2020).

Muchos son los factores climáticos y metodológicos que pueden incidir sobre la captación de agua de niebla, por esta razón, algunos autores, como Figueira *et al.* (2013), consideran que la cuantificación con precisión, tanto de la cantidad de agua que proviene de la lluvia como de la interceptación de nubes es extremadamente difícil, aunque la importancia hidrológica de la niebla para muchos ecosistemas costeros y montañosos es bien conocida. No existe aún una estandarización en la medición de la captación de agua por neblina, se deben mejorar las metodologías y las mediciones que tengan en cuenta las eficiencias de los atrapanieblas, mencionadas por Azeem *et al.* (2020), Carvajal *et al.* (2020) y Holmes *et al.* (2015): 1) La eficiencia aerodinámica que está determinada por la manera en que la niebla interactúa con la red y el tamaño del poro; 2) La eficiencia de deposición determinada por la forma en que las gotas son conducidas a través de la red hacia la canaleta; 3) La eficiencia de drenado que depende de la proporción de agua que llega a la canaleta y al recipiente de almacenamiento.

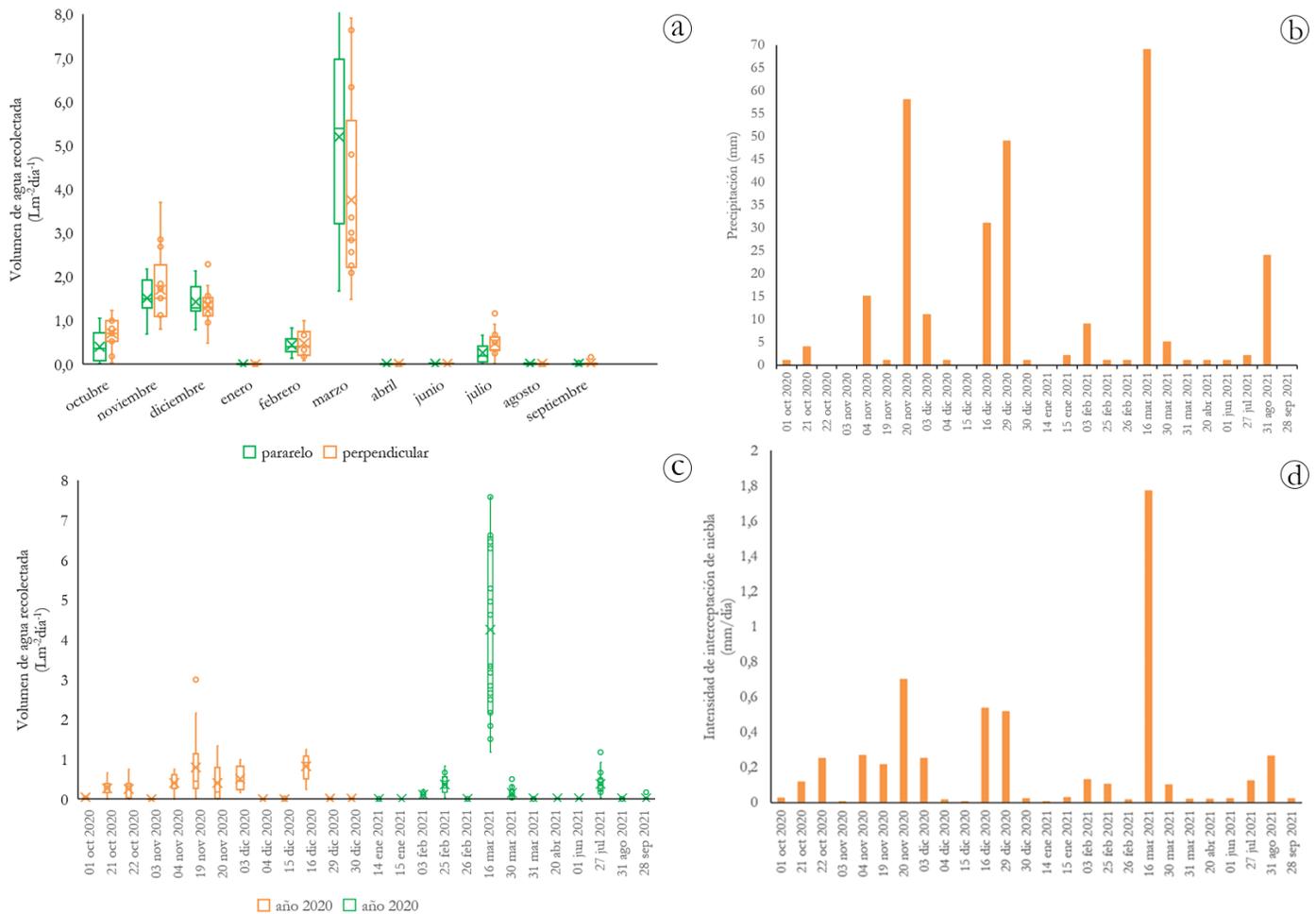


Figura 4. a) Volumen de agua recolectado diariamente por los captadores perpendiculares y paralelos a la dirección de viento durante los meses de estudio; b) Precipitación registrada para los 26 días de registros diarios; c) Volumen de agua recolectado en los 26 días de registro diario (la equis indica el promedio de recolección); d) Promedio de la intensidad de interceptación de niebla de los 26 días de registro diario basados en el modelo geométrico.

Este trabajo evidenció que los captadores interceptaron un bajo volumen de agua en comparación con otros estudios, debido a que el diseño de los captadores, probablemente, no fue el más eficaz, al ignorar las posibles pérdidas de agua que pueden llegar a suceder de las tres eficiencias nombradas por Jarimi *et al.* (2020): pérdidas de agua por el bajo contenido de agua líquida en la niebla (eficiencia aerodinámica), la alta velocidad del viento que reintroduce al flujo de aire las micro-gotas que chocan con la malla y no llegan a la canaleta (efectividad de captura) y el tamaño de la canaleta que lleva a la pérdida de agua antes de ser almacenada (efectividad de drenado).

El modelo geométrico utilizado para separar el agua de lluvia y de niebla interceptada por las mallas, fue usado por primera vez para sistemas de páramo en este estudio, por lo que se considera necesario mejorar y desarrollar su implementación en la medición de las eficiencias nombradas anteriormente, en sistemas de alta montaña

El clima en el páramo Pan de Azúcar no está claramente definido porque no se ha instalado una estación climática permanente, de

manera que los datos de este estudio contradicen todo lo publicado y muestran que se trataría de un páramo pluvial que puede estar afectado por el fenómeno de la niña, ocurrido en el periodo de mediciones climáticas de este estudio.

Agradecimientos. A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC, a la gobernación de Boyacá y MINCIENCIAS, por el apoyo económico, a través de la Convocatoria 794 para proyectos de I+D, a las entidades Empoduitama S.A. E.S.P, CORPOBOYACÁ y Corporación Tibaira por su acompañamiento y apoyo económico y logístico; al grupo de investigación UDESA de la UPTC, por su asesoría y acompañamiento en las salidas de campo.

Conflictos de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaramos que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados. **Contribución de autores:** Francisco Cortés Pérez participó en la conceptualización, metodología y la administración del proyecto. Oscar Roa Casas, contribuyó con la curaduría de los datos y la metodología. Felipe Moreno Mancilla colaboró con la realización del análisis formal de los datos. Carlos Andrés Villate colaboró con la obtención de los datos y supervisión

de la investigación. David Ricardo Hernández Velandia colaboró con la obtención de los datos. Laura L. Hernández Pineda colaboró con la obtención de los datos y la elaboración y edición del borrador del manuscrito. Todos los autores participaron en la redacción, revisión, edición del manuscrito y aprueban la versión final. **Financiación:** Este estudio fue financiado por la gobernación de Boyacá, además se contó con el financiamiento de las entidades aliadas Empoduitama S.A E.S.P., Corpoboyaca y Corporación Tibaira.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABDUL-WAHAB, S.A.; AL-HINAI, H.; AL-NAJAR, K.A.; AL-KALBANI, M.S. 2007. Feasibility of fog water collection: a case study from Oman. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*. 56(4):275-280. <https://doi.org/10.2166/aqua.2007.045>
2. ALCALDÍA MUNICIPAL DUITAMA. 2012. Análisis de la Situación de Salud del Municipio de Duitama 2012. Con modelos de determinantes sociales de salud. 131p. Disponible desde Internet en: https://www.boyaca.gov.co/secretariasalud/wp-content/uploads/sites/67/2014/05/images_Documentos_ASIS_2013_ASIS-DUITAMA-2013.pdf
3. ALCALDÍA MUNICIPAL DUITAMA. 2016. Acuerdo 013 de 2016 Plan De Desarrollo Duitama 2016-2019 ¡La Duitama que soñamos! 258p. Disponible desde Internet en: <https://transparencia.culturamaduitama.gov.co/docs/documents/PLAN%20DE%20DESARROLLO%20DUIITAMA%202016%20-%202019%20CULTURA%20PG%20143-149%20RESALTADO.pdf>
4. AZEEM, M.; NOMAN, M.T.; WIENER, J.; PETRU, M.; LOUDA, P. 2020. Structural design of efficient fog collectors: A review. *Environmental Technology & Innovation*. 20:101169. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101169>
5. CÁRDENAS-VARGAS, M.C.; GARCÍA-VALBUENA, C.A. 2019. Medición de la condensación de lluvia horizontal con tres estructuras: el caso del municipio de Zipacón (Cundinamarca, Colombia). *Revista producción + limpia*. 14(1):94-109. <https://doi.org/10.22507/pml.v14n1a9>
6. CARVAJAL, D.; SILVA-LLANCA, L.; LARRAGUIBEL, D.; GONZÁLEZ, B. 2020. On the aerodynamic fog collection efficiency of fog water collectors via three-dimensional numerical simulations. *Atmospheric Research*. 245:105-123. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105123>
7. CRESPO, P.; CÉLLERI, R.; BUYTAERT, W.; FEYEN, J.; IÑIGUEZ, V.; BORJA, P.; DE BIEVRE, B. 2010. Land use change impacts on the hydrology of wet Andean páramo ecosystems. *Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins*. 336:71-76.
8. DÍAZ-GRANADOS ORTIZ, M.A.; NAVARRETE, J.D.; SUÁREZ LÓPEZ, T. 2005. Páramos: hidrosistemas sensibles. *Revista de Ingeniería*. 22:64-75. <https://doi.org/10.16924/revinge.22.8>
9. DOMEN, J.K.; STRINGFELLOW, W.T.; CAMARILLO, M.K.; GULATI, S. 2014. Fog water as an alternative and sustainable water resource. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 16(2):235-249. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0645-z>
10. DOMÍNGUEZ, C.; ECHEVERRÍA, P.; VILLACÍS, M.; VIOLETTE, S. 2019. Evaluación de la cosecha de neblina como una fuente potencial para el aprovechamiento de agua. En: Inga Ortega, E. (Ed.). *Aplicaciones e innovación de la ingeniería en ciencia y tecnología*. Editorial Abya-Yala. p.97-142). <https://doi.org/10.7476/9789978104910.0005>
11. DOMÍNGUEZ, C.G.; GARCÍA VERA, M.F.; CHAUMONT, C.; TOURNEBIZE, J.; VILLACÍS, M.; D'OZOUVILLE, N.; VIOLETTE, S. 2017. Quantification of cloud water interception in the canopy vegetation from fog gauge measurements. *Hydrological Processes*. 31(18):3191-3205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.11228>
12. ECHEVERRÍA, P.; DOMÍNGUEZ, CH.; VILLACÍS, M.; VIOLETTE, S. 2020. Fog harvesting potential for domestic rural use and irrigation in San Cristobal Island, Galapagos, Ecuador. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 46(2):563-580. <http://doi.org/10.18172/cig.4382>
13. ESTRELA, M.; CORELL, D.; VALIENTE, J.A.; AZORIN-MOLINA, C.; CHEN, D. 2019. Spatio-temporal variability of fog-water collection in the eastern Iberian Peninsula: 2003-2012. *Atmospheric Research*. 226:87-101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.016>
14. FESSEHAYE, M.; ABDUL-WAHAB, S.A.; SAVAGE, M.J.; KOHLER, T.; GHEREZGHIHER, T.; HURNI, H. 2014. Fog-water collection for community use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 29:52-62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063>
15. FIGUEIRA, C.; MENEZES DE SEQUEIRA, M.M.; VASCONCELOS, R.; PRADA, S. 2013. Cloud water interception in the temperate laurel forest of Madeira Island. *Hydrological Sciences Journal*. 58(1):152-161. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.742952>
16. GANDHIDASAN, P.; ABUALHAMAYEL, H.I. 2012. Exploring fog water harvesting potential and quality in the Asir Region, Kingdom of Saudi Arabia. *Pure and Applied Geophysics*. 169(5):1019-1036. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0341-z>

17. GARCÍA-UBAQUE, C.A.; VACA-BOHÓRQUEZ, M.L.; GARCÍA-UBAQUE, J.C. 2013. Factibilidad técnica y de salud pública de la recolección de aguas nieblas: Estudio de caso. *Revista de Salud Pública*. 15(3):366-373.
18. HOLMES, R.; DE DIOS RIVERA, J.; DE LA JARA, E. 2015. Large fog collectors: New strategies for collection efficiency and structural response to wind pressure. *Atmospheric Research*. 151:236-249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.005>
19. IMTEAZ, M.A.; AL-HASSAN, G.; SHANABLEH, A.; NASER, J. 2011. Development of a mathematical model for the quantification of fog-collection. *Resources, Conservation and Recycling*. 57:10–14. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.09.014>
20. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. 2020. boletín de seguimiento fenómeno el niño y la niña. Disponible desde Internet en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/boletin-de-seguimiento-fenomeno-el-nino-y-la-nina>
21. INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES - IDEAM. 2021. Suministro de información hidrometeorológica. Disponible desde Internet en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion/>
22. INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE RECURSOS BIOLÓGICOS “ALEXANDER VON HUMBOLDT” - IAVH. 2017. Recomendación para la delimitación, por parte del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, del Complejo de Páramos Guantiva – La Rusia a escala 1:25.000. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt - Fondo Adaptación. Bogotá. 161p. Disponible desde Internet en: <http://hdl.handle.net/20.500.11761/9259>
23. JARIMI, H.; POWELL, R.; RIFFAT, S. 2020. Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. (United Kingdom). 15(2):253-276. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctz072>
24. MARTÍNEZ-O., M.F.; DÍAZ-PÉREZ, C.N.; MORALES-PUENTES, M.E. 2019. Los musgos en el complejo de páramos Guantiva-La Rusia en los departamentos de Boyacá y Santander, Colombia. *Boletín Científico Centro de Museos Museo de Historia Natural*. 23(1):15-30. <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.1.1>
25. MARZOL, M.V.; SÁNCHEZ-MEGÍA, J.L. 2008. Fog water harvesting in Ifni, Morocco. An assessment of potential and demand. *Die Erde*. 139(1-2):97-119.
26. METEOBLUE WEATHER CLOSE TO YOU. 2021. Rafaga de viento. Disponible desde Internet en: https://www.meteoblue.com/es/tiempo/maps/duitama_colombia_3685084#coords=15.91/5.894923/-73.045297&map=windAnimation~rainbow~auto~10%20m%20above%20gnd~none
27. MOLINA, JOSÉ M.; ESCOBAR, CONCEPCIÓN M. 2008. Fog collection variability in the Andean mountain range of Southern Colombia. *Die Erde*. 39(1-2):127-140.
28. MONTECINOS, S.; CARVAJAL, D.; CERECEDA, P.; CONCHA, M. 2018. Collection efficiency of fog events. *Atmospheric Research*. 209:163-169. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.004>
29. MORALES RIVAS, M.; OTERO GARCÍA, J.; VAN DER HAMMEN, T.; TORRES PERDIGÓN, A.; CADENA VARGAS, C.E.; PEDRAZA PEÑALOZA, C.A.; RODRÍGUEZ ERASO, N.; FRANCO AGUILERA, C.A.; BETANCOURTH SUÁREZ, J.C.; OLAYA OSPINA, É.; POSADA GILEDE, E.; CÁRDENAS VALENCIA, L. 2007. Atlas de páramos de Colombia. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Bogotá, D.C., Colombia. 208p.
30. PARQUES NACIONALES NATURALES DE COLOMBIA - PNN. 2021. Santuario de flora y fauna Guanentá Alto Río Fonce. Disponible desde Internet en: <https://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/santuario-de-flora-y-fauna-guanenta-alto-rio-fonce/>
31. PEDRONO, M.; LOCATELLI, B.; EZZINE-DE-BLAS, D.; PESCHE, D.; MORAND, S.; BINOT, A. 2016. Impact of climate change on ecosystem services. En: Torquebiau, E (eds). *Climate change and agriculture worldwide*. Springer. p.251-261. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7462-8_19
32. R CORE TEAM. 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponible desde Internet en: <https://www.R-project.org/>
33. REGALADO, C.M.; RITTER, A. 2016. The design of an optimal fog water collector: A theoretical analysis. *Atmospheric Research*. 178-179:45-54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.006>
34. REGALADO, C.M.; RITTER, A. 2019. On the estimation of potential fog water collection from meteorological variables. *Agricultural and Forest Meteorology*. 276-277:107645. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107645>

35. 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 Ecology & Diversity*. 12(6):573-591. <https://doi.org/10.1080/17550874.2019.1673494>
36. RUÍZ ORDOÑEZ, D.M.; CAMACHO DE ANGULO, Y.V.; PENCUE FIERRO, E.L.; FUGUEROA CASAS, A. 2023. Mapping ecosystem services in an andean water supply basin. *Sustainability*. 15(3):1793. <https://doi.org/10.3390/su15031793>
37. SAID, M.; KOMAKECH, H.C.; MUNISHI, L.K.; NYARUBAKULA MUZUKA, A.N. 2019. Evidence of climate change impacts on water, food and energy resources around Kilimanjaro, Tanzania. *Regional Environmental Change*. 19(8):2521-2534. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01568-7>
38. TAN, F.J.; ESTANISLAO, M.A.P.; GREGORIO, A.M.A.; NAVEA, I.J.D. 2019. The potential of fog harvesting in tropical highlands as an alternative water resource: the case of Atok, Benguet, Philippines. *E3S Web of Conferences*. (France).117:00007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911700007>
39. VALENCIA, J.; LASSALETTA, L.; VELÁZQUEZ, E.; NICOLAU, J.M.; GÓMEZ-SAL, A. 2013. Factors controlling compositional changes in a northern Andean Páramo (La Rusia, Colombia). *Biotropica*. 45(1):18-26. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2012.00895.x>
40. VÁSQUEZ CERÓN, A.; BUITRAGO CASTRO, A.C. 2011. El gran libro de los Páramos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. Proyecto Páramo Andino, Bogotá D.C., Colombia. 208p. Disponible desde Internet en: <http://hdl.handle.net/20.500.11761/31389>
41. WICKHAM, H. 2016. *Ggplot2: Elegant graphics for data analysis*. Springer-Verlag, New York. E.E.U.U. 213p. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-98141-3>
42. WICKHAM, H.; FRANÇOIS, R.; HENRY, L.; MÜLLER, K.; VAUGHAN, D. 2021. *Dplyr: A grammar of data manipulation*. R package version 1.0.7. Disponible desde Internet en: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>