

CAPACIDAD DE INTERCEPTACIÓN DE LA NIEBLA POR LA VEGETACIÓN DE LOS PÁRAMOS ANDINOS

Conrado Tobón & Eydith Girleza Gil Morales

Departamento de Ciencias Forestales,

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

ctobonm@unalmed.edu.co, ctobonm@unal.edu.co

Recibido para evaluación: 6 de Abril de 2007/ Aceptación: 11 de Mayo de 2007 / Versión final: 17 de Mayo de 2007

RESUMEN

Con el objetivo de caracterizar la capacidad que tiene la vegetación del Páramo de Guerrero, para interceptar el agua de la niebla, se llevó a cabo un estudio en el cual se expusieron muestras de vegetación a eventos de niebla y se cuantificó la cantidad de agua capturada por cada muestra durante el evento. Igualmente se llevaron a cabo mediciones de captura de niebla por los neblinómetros, comparando los resultados obtenidos con los de la vegetación. Para esto se determinaron las características del evento y la cantidad de niebla que se incorpora al suelo, por goteo desde la vegetación, mediante la medición del cambio de humedad en la superficie del suelo. Las ganancias o pérdidas de agua desde las muestras de vegetación fueron convertidas a lámina de agua, utilizando el Índice de área foliar (IAF), el peso seco y el contenido de humedad de cada muestra. En general, se encontró que las coberturas vegetales estudiadas presentaron un comportamiento diferencial para capturar el agua de la niebla, lo que estuvo asociado con las características de la vegetación, la duración, la densidad y la intensidad de los eventos de niebla. En algunos eventos, los suelos presentaron un ligero aumento en su contenido de humedad lo que indica que durante estos eventos se presentó goteo desde el dosel, debido a la interceptación de la niebla. Finalmente se compararon las mediciones directas de interceptación de la niebla (muestras de vegetación), con mediciones indirectas (arpas y cilindros), donde se encontró que existen diferencias significativas en las cantidades de agua interceptadas por estos dos tipos de medición, siendo mayores aquellas capturadas por los instrumentos.

PALABRAS CLAVES: Interceptación; Captación de Agua; Niebla; Hidrología Forestal; Páramos; Bosques; Cobertura Vegetal

ABSTRACT

This study, carried out in the Páramo de Guerrero (Cundinamarca, Colombia) aimed at quantifying the fog interception capacity by the páramo vegetation (*Weinmannia* spp, *Gaiadendron punctatum*, *Espeletia grandiflora* and *Holcus lanatus*); and to make a continuous monitoring of the soil surface water content, in order to determine the net inputs to the ecosystem, as the amount of fog water that is incorporated to the system. For this we exposed to fog events branches of main vegetation types in this páramo, registering the gain or loss of water, by measuring the differences in weight before and after the fog event. Fog inputs were also measured through fog gauges (harps and cylinders). Measurements of fog interception (ml) were translated in water depth, using the LAI, the dry biomass and the volumetric water content. In general, the vegetation types used in this experiment showed a differential behavior to capture fog water, which was associated to the intensity of the event, except for the pasture that was more efficient to capture water from the fog events, but this was not related to the density of the fog event. Soil water content slightly increased during some fog events, implying a net input of fog water to the ecosystem. Comparisons of direct measurements of the amount of water captured by the vegetation types, with that intercepted by fog gauges (harps and cylinders), showed significantly differences, being larger the amounts captured by fog gauges.

KEY WORDS: Interception; Water Moist; Fog; Forest Hydrology; Paramo; Forests; Vegetal Cover

1. INTRODUCCIÓN

En términos ecológicos, la acepción de páramo hace referencia a aquellas zonas neotropicales (11° latitud N y 8° latitud S) del bioma pantropical alpino-subalpino húmedo; cuya formación vegetal es de tipo alto-andina, heterogénea, psicrofítica, muy vellosa, herbácea y generalmente desarbolada o cubierta con árboles de bajo porte (Kappelle, 2005). Estos ecosistemas cordilleranos están ubicados entre los 2.800 m.s.n.m o límite superior del bosque montano alto y 4.800 m.s.n.m o límite inferior de las nieves perpetuas (Volkmarvareschi, 1970), donde tuvo lugar una serie de glaciaciones consecutivas que no solamente incidieron sobre la topografía y el paisaje del páramo; sino también, sobre la composición y abundancia de especies restringida únicamente a esta región. Parte de la importancia de estos ecosistemas radica en su aporte hídrico, dado que algunos de los ríos de mayor importancia en Suramérica (Cauca, Magdalena, Napo, Coca y Orinoco) nacen allí, y son la principal fuente de agua que abastece poblaciones de grandes ciudades como Bogotá, Lima, Quito, etc.

El ecosistema de páramo se caracteriza por presentar tres pisos altitudinales: el subpáramo transicional, con vegetación de porte bajo, generalmente entre 2 a 10 m de altura; páramo propiamente dicho, donde son muy comunes las gramíneas, que no superan los 3 m de altura y el superpáramo, generalmente desértico, con vegetación que no excede alturas de 0,5 m, ubicado debajo del límite de la nieve permanente (Kappelle, 2005). Los suelos, generalmente derivados de ceniza volcánica, presentan un alto contenido de materia orgánica, un pH bajo, una densidad aparente baja, una alta capacidad de retención de humedad y conductividad hidráulica alta. Los principales órdenes (Soil Survey Staff, 2003) son los Histosoles y Andisoles, pero debido a las bajas temperaturas y en algunos casos las bajas precipitaciones, la descomposición de la materia orgánica es lenta, lo que a su vez genera una productividad baja (Bruijnzeel y Veneklaas, 1998). En los páramos, la temperatura promedio anual es baja (inferior a los 10°C) y la humedad relativa atmosférica es mayor al 70%. La radiación difusa es alta y la ultravioleta es muy intensa, además es común la desecación por los vientos. Sin embargo, el frío y la alta nubosidad a esta altura, crean una condición ambiental, en donde la radiación se reduce en una proporción que varía entre el 10 y el 50% (Bruijnzeel y Veneklaas, 1998). El promedio anual de precipitación varía entre 500 y 3.000 mm; con un

promedio general alrededor de los 1000 mm; la evaporación es muy baja y la saturación de vapor es alta, lo cual explica en parte, el alto rendimiento hídrico de la zona (precipitación - evaporación). Además de la precipitación vertical, suele presentarse un ingreso adicional de agua a estos ecosistemas, por interceptación del agua de la niebla. Esta cantidad es muy difícil de medir y debido a las dificultades que presenta su cuantificación y las condiciones fisiográficas de alta montaña, existe poca información para bosques nubosos (Bruijnzeel y Proctor, 1995, Hofstede, 1997) y casi nada para páramos (Tobón y Arroyave, 2007).

Aunque la interceptación de la precipitación horizontal ha sido poco investigada en los ecosistemas de páramo, existen algunos estudios realizados en bosques de niebla, en los cuales se describen las metodologías utilizadas para monitorear y cuantificar las entradas por niebla a estos ecosistemas (Bruijnzeel y Veneklaas, 1998, González, 2000, Ortega *et al.*, 2000, Bruijnzeel, 2001, Holscher, 2004, Frumau *et al.*, 2006). Schemenauer *et al.* (1994), señalan que en los ecosistemas de alta montaña es fundamental considerar las entradas por niebla como integrantes del balance hídrico. Este autor señala que aunque los métodos directos e indirectos han sido utilizados en diferentes experimentos (Stadtmüller, 1987, Vong *et al.*, 1991), la comparación entre las tasas de deposición son casi imposibles, dados los diferentes tipos de instrumentos utilizados y porque la precipitación vertical se mezcla con la horizontal.

Entre las metodologías más destacadas para cuantificar las entradas por precipitación horizontal, se tiene la de la medición de todas las variables del balance hídrico con una gran exactitud (Bruijnzeel, *et al.*, 2006); sin embargo existen variables difíciles de cuantificar como la evapotranspiración y la interceptación, que dificultan la aplicación de este método. Por otro lado mediciones de la precipitación por fuera y al interior de los bosques dan una idea sobre el aporte de la precipitación horizontal, expresando la eficiencia del dosel para interceptar la niebla y dan cuenta de la cantidad neta de agua que puede entrar al sistema, las cuales al ser realizadas durante períodos de ausencia de lluvias, pero con la presencia de niebla, generan una medición directa de precipitación horizontal (Bruijnzeel *et al.*, 2006).

Por otra parte se han utilizado ampliamente interceptores artificiales de niebla o neblinómetros, tales como los “cilindros” que consisten en una malla metálica de 0.5 m de perímetro y dos aros de soporte de la malla y las

“arpas” las cuales consisten en un marco de 1 m x 1 m (o 05x0.5 m) en cuyo interior se instalan en sentido vertical y paralelos a los lados del cuadro 48 hilos de nylon de 1 mm de espesor, espaciados de 2 a 3 mm, el uno del otro. Estos instrumentos pueden ser protegidos de la precipitación vertical mediante un techo mediano dispuesto en la parte superior de cada colector. El uso de interceptores artificiales como éstos, tiene la limitación de que cada bosque, presenta una estructura y composición única, lo que hace difícil hacer comparaciones directas o aún más, crear una relación entre la eficiencia del instrumento y el bosque para interceptar el agua de la niebla. A pesar de ello, estos interceptores, dan una buena idea de la cantidad de agua de niebla depositada en cada evento.

Pese a los problemas de los diseños de los colectores artificiales, la baja representatividad respecto a la vegetación, la eficiencia de la captura y almacenamiento de agua de niebla por parte de la malla y la entrada de precipitación vertical a éstos, los colectores cilíndricos, han sido utilizados con mayor éxito en algunos lugares del mundo y han mostrado buenas correlaciones con el dosel artificial y natural de las coníferas (Joslin et al., 1990) y en Bosques Nubosos (Bruijnzeel et al., 2006, Frumau et al., 2006).

Aunque la dinámica de la interceptación del agua de la niebla por la vegetación aún no es muy clara y el monitoreo de ésta debería ser el primer paso para mejorar el entendimiento del proceso (Bruijnzeel y Proctor, 1995, Cavelier et al., 1996, Schemenauer et al., 1994), ésta es entendida como un proceso físico donde la vegetación actúa como una barrera física que captura las pequeñas gotas de niebla y las incorpora de manera efectiva al suelo por goteo desde el dosel. La idea intuitiva de diferentes autores (Kerfoot, 1968, Weaver, 1972, Merriam, 1973, Bruijnzeel y Proctor, 1995), sugiere una relación de eficiencia diferente para la captura del agua de niebla, según el tipo de vegetación o factores biológicos y los factores climáticos (Bruijnzeel, et al., 2006):

* Características de la vegetación: altura, estructura y tamaño del dosel y del sotobosque; biomasa; índice de área foliar; tamaño de las hojas; densidad del bosque; posición de los árboles; orientación y características físicas de las hojas; abundancia y tipo de epifitas, bromelias y briofitas, entre otras (Tobón et al., 2006; González, 2000).

* Características climáticas y topográficas: humedad del aire; contenido líquido de agua en la niebla (LWC) o densidad; tamaño de las gotas de agua, velocidad y dirección del viento; altura de la niebla, frecuencia y distribución de las nubes bajas; posición topográfica; radiación solar, etc.

Dada la presencia continua de niebla en los páramos andinos, el papel que parecen desempeñar este tipo de ecosistemas (fuentes de recurso hídrico), y la falta de información sobre la contribución de la niebla al balance hídrico de estos ecosistemas, se hace importante cuantificar las entradas adicionales de agua a los mismos, mediante la interceptación del agua de la niebla por la vegetación. Por tanto el trabajo que se presenta tuvo como objetivo cuantificar las entradas de agua de niebla a una cuenca del páramo de Guerrero (Cundinamarca, Colombia), donde se evaluaron las capacidades de interceptación de la niebla por tres tipos principales de vegetación presentes en este páramo y se compraron los valores registrados con aquellos de los neblinómetros instalados dentro de la cuenca.

2. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio

El Páramo de Guerrero (Cundinamarca, Colombia) está ubicado al nororiente del municipio de Zipaquirá, en la Reserva Forestal Protectora de Pantano Redondo y Nacimiento del Río Susaguá (Figura 1), el cual hace parte del corredor de conservación entre Zipaquirá, Cogua y Tausa (‘16 °, 01’ N y 74° 02’13“ W). La cuenca en estudio tiene una extensión de 1361,2 hectáreas (4,1% de la superficie total del páramo), con un gradiente altitudinal entre 2.800 y 3.600 m.s.n.m. La precipitación promedia anual, con régimen bimodal, varía entre los 750 mm a 1100 mm; la temperatura media anual es de 9,9°C para los meses más fríos y una humedad relativa por encima del 75%. Según el sistema de zonas de vida propuesto por Holdridge (1982), el área se ubica dentro de la transición al bosque húmedo montano (bh-M). En la cuenca de estudio nacen gran cantidad de corrientes de agua que dan origen al río Susaguá, principal fuente abastecedora del acueducto de Zipaquirá (Conservación Internacional Colombia, 1999).

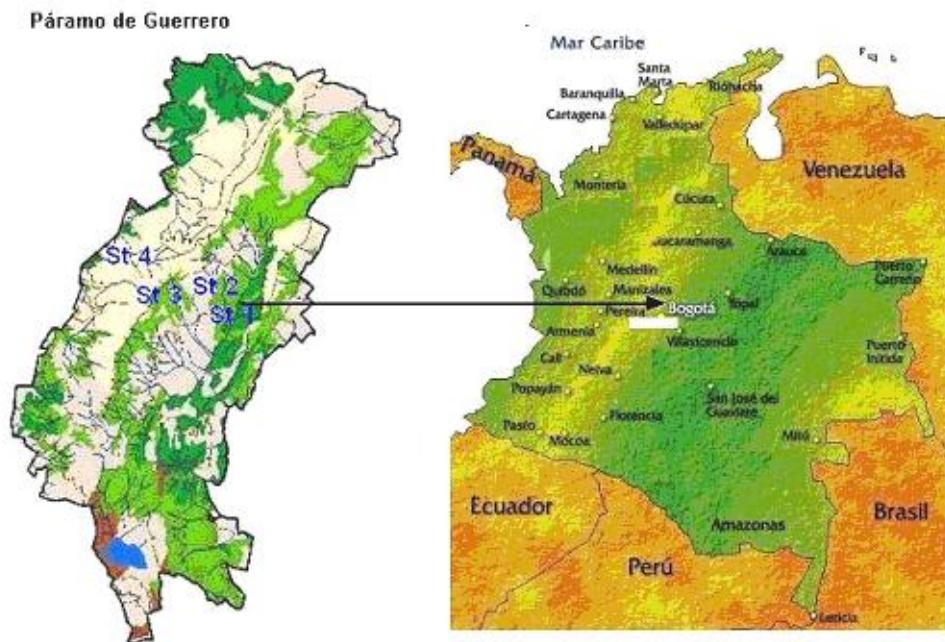


Figura 1. Localización del área de estudio. Se indica el sitio de exposición de las muestras y ubicación de neblinómetros (St 4).

2.2. Metodología

Para cuantificar la cantidad de agua de la niebla que es interceptada por la vegetación del páramo, se colectaron al azar 48 muestras vivas (ramas) de cada cobertura (frailejón, F; bosque natural, BN y pasto, P) representadas por las siguientes especies *Espeletia grandiflora*, *Weinmannia spp*, *Gaiadendron punctatum* y *Holcus lanatus*, las cuales fueron expuestas a los eventos de niebla, y se registró la ganancia o pérdida de peso, por el método termo-gravimétrico. Para ello, se registraron los pesos de cada muestra antes del evento de niebla e inmediatamente después de éste. El presente estudio se realizó en el 2005 durante el periodo septiembre - diciembre, época en la cual la presencia de niebla es generalmente mayor.

Para la exposición de las muestras, se acotó una franja en sentido Norte - Sur, localizada a una altura promedio de 3.475 m.s.n.m. (Figura 1), en la cual se presentaba una gran afluencia de niebla, dado los fuertes vientos del Este en la mayor parte del tiempo. Al lado de esta franja se instalaron 3 estaciones para medir la precipitación vertical y horizontal (pluviómetros, arpas y cilindros), las que fueron medidas de forma automática (cada 10 minutos) y manual (diaria). Muestras vegetales (4) de cada especie analizada, consistentes en ramas de aproximadamente 1 metro de largo, fueron colectadas

con un día de anterioridad a la exposición y guardadas cuidadosamente. En los días en que se presentaron eventos de niebla, las muestras fueron expuestas colgándolas de manera perpendicular al frente de flujo de la niebla, es decir a la dirección predominante del viento, en perchas de madera de 1,8 metros de altura y 2 metros de longitud (tres perchas en total, cada una localizada al lado de una estación pluviométrica cercana). En cada percha, se expusieron las muestras vegetales de acuerdo con la siguiente distribución: Percha 1: muestras de pasto, encenillo, frailejón y pasto; percha 2: con encenillo, frailejón, pasto y tagua; y en la percha 3: frailejón, pasto, tagua y frailejón. En total, para cada evento (12 eventos en total), se tuvieron tres tratamientos, con cuatro repeticiones por cada tipo de cobertura; con lo cual se obtuvo un diseño completamente al azar en donde la única fuente de variación eran la cobertura y las características del evento de niebla.

Adicionalmente, para cada evento de niebla, se llevó un registro de la duración del evento y su densidad, utilizando el criterio de distancia y visualización de los objetos, donde se tomó como referencia una distancia de 10 metros: alta densidad si el objeto no se observaba a ésta distancia; densidad media si el objeto se alcanzaba a ver, pero no era identificable y baja densidad si el objeto era visible e identificable.

Para determinar el agua ganada por cada muestra, antes de su exposición se constató que las muestras estuvieran totalmente secas en su parte superficial, es decir, libres de agua en la superficie de la rama y las hojas; posteriormente éstas fueron pesadas (peso seco), utilizando una balanza electrónica con una precisión de 0.1 gramo. Seguidamente las muestras fueron expuestas a los eventos de niebla. Inmediatamente después de los eventos de niebla, cada muestra fue introducida en una bolsa plástica y pesada cuidadosamente, para evitar la pérdida de agua de la muestra. La cantidad de agua de la niebla interceptada por la muestra fue determinada por la diferencia de peso antes y después del evento. Finalizado el evento y posteriormente a la determinación del peso húmedo, se determinó el peso de saturación o máxima capacidad de almacenamiento de agua de las muestras. Para ello cada muestra fue sumergida durante dos horas en un recipiente con agua. Una vez saturada, la muestra fue colocada en una malla encima del recipiente con agua donde se dejó drenar el agua en exceso durante 1 hora. Durante este tiempo las muestras fueron tapadas para evitar la pérdida de agua por evaporación. Escurrido el exceso de agua se pesaron las muestras (peso de saturación).

Con el objetivo de cuantificar la cantidad de agua de niebla que drena o gotea al suelo (entradas netas al ecosistema), en cada percha se tomaron dos muestras de suelo (en los primeros 5 cm) antes y después de cada evento. Estas muestras fueron tomadas con anillos metálicos de 100 cm³ de volumen y fueron pesadas inmediatamente después de su recolección, para determinar el contenido de humedad del suelo antes del evento (peso inicial). Posteriormente, estas muestras fueron secadas al horno a una temperatura de 105°C, durante 48 horas, para determinar el peso seco de la muestra cuyo contenido de humedad, en términos gravimétricos y volumétricos, se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

Donde,

$$\theta_g = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (1)$$

θ_g = Humedad gravimétrica (g/g); P_h = Peso húmedo (peso en gramos antes o después del evento, según el tipo de humedad a caracterizar: inicial (antes), final (después) y P_s = Peso seco (peso seco al horno).

La humedad volumétrica en cada muestra fue determinada a partir de la gravimétrica, de acuerdo con la ecuación:

$$\theta_v = \frac{(P_h - P_s)}{P_s} * \frac{\rho_b}{\rho_w} \quad (2)$$

donde,

θ_v = Humedad volumétrica (cm³/cm³); ρ_b = es la densidad aparente del suelo (peso seco de la muestra/volumen del anillo, g/cm³) y ρ_w = Es la densidad del agua a 25°C (1 g/cm³).

Los valores de humedad volumétrica durante los períodos de tiempo señalados, permitieron el cálculo del cambio de lámina de agua en el suelo durante los eventos de niebla, la cual está expresada en milímetros (ecuación 3), con el fin de caracterizar las ganancias netas o entradas de agua al suelo o las pérdidas por evaporación desde la superficie del suelo o drenaje.

$$L = \theta_v * Espesor \quad (3)$$

Donde, L es la lámina de agua y *Espesor* es la capa de suelo muestreada (5 cm en la superficie).

Con el fin de extraer los valores de la interceptación del agua de niebla por cada muestra al área real que cada cobertura ocupa en la cuenca y determinar el factor de conversión (gramos de agua ganada por cada muestra a lámina de agua), se determinó el Índice de Área Foliar (IAF) de las tres coberturas principales presentes en el páramo. Para esto, se siguió el método destructivo que consiste en cosechar todas las hojas presentes altitudinalmente en parcelas (3) de 1,0 m² de área, seleccionadas al azar en cada cobertura. Todas las hojas cosechadas en cada parcela fueron pesadas y escaneadas, determinando el área de cada hoja, mediante el programa Erdas Image, versión 8.3, de acuerdo con la ecuación 4. El área total de la muestra de 1 m² fue determinada mediante la sumatoria de las áreas individuales de cada hoja. Posteriormente, al total de hojas cosechadas por parcela, fueron llevadas al horno (65°C, durante 48 horas) para determinar su peso seco.

$$IAF = \frac{Area_de_todas_las_hojas}{Area_superficial_cosechada} \quad (4)$$

Donde,

$IAF = (m^2/m^2)$ y Área de hojas = área de las hojas de cada parcela (m^2).

Por su parte, a las muestras utilizadas para los experimentos se les calculó igualmente el IAF mediante la ecuación 5. A partir de este valor se puede inferir la cantidad de agua ganada en términos de unidad por índice de área foliar (muestras individuales); además de la extrapolación de dichos valores al área ocupada por la cobertura en la cuenca, lo que permite comparar entre tratamientos, al normalizar el volumen capturado por la respectiva área.

$$IAF_{muestras} = \frac{IAF_{parcela}}{Peso_sec_o_parcela} peso_sec_o_muestra \quad (5)$$

Siendo $IAF_{muestras}$ = representa el índice de área foliar de cada muestra utilizada en los experimentos (m^2/m^2); $Peso_seco_parcela$ = peso seco total (en gramos) para cada parcela y $Peso_seco_muestra$ = peso seco en gramos, de cada muestra expuesta.

Mediante la ecuación 6 se cuantificó la captura de agua de la niebla por cada una de las coberturas:

$$\text{Factor de conversión} = \frac{peso_despues - peso_antes}{IAF_{muestra}} \quad (6)$$

Donde, El IAF de cada muestra está dado por la ecuación 5.

La ganancia neta de agua por el suelo, fue calculada de acuerdo con:

$$LAS = Lámina_de_agua_{despues} - Lámina_de_agua_{antes} \quad (7)$$

Donde LAS es el cambio en la lámina de agua en el suelo.

2.2.1. Análisis estadístico

Para el análisis de los resultados se utilizó el programa Statgraphics Plus, versión 4.0; con el cual se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con el fin de explicar la variabilidad entre los tratamientos y entre las repeticiones de cada tratamiento; además de estar sustentada por la estadística descriptiva.

Para el planteamiento anterior, se establece una hipótesis de la siguiente forma:

Ho = Captura de niebla por el pasto = Captura de niebla por el bosque natural = Captura de niebla por el frailejón

Ha = Al menos una de las capturas de niebla entre las coberturas es diferente.

Con el fin de cuantificar la contribución relativa de cada cobertura al régimen hidrológico de la cuenca, en cada uno de los tratamientos se realizaron análisis de correlación simple, entre la cantidad de agua de la niebla interceptada por las muestras, como variable dependiente, y la duración de los eventos y densidad de la niebla como variables independientes.

$$LNC = f(\rho, D) \quad (8)$$

Donde,

LNC = Lámina de agua de niebla capturada (mm); D = Duración de los eventos (minutos) y ρ = Densidad de los eventos (variable cualitativa).

Asimismo, los resultados encontrados en los tratamientos fueron comparados con los valores de deposición de niebla registrados en las arpas y en los cilindros en cada estación. Esto permitió conocer la eficiencia de la vegetación en la captura del agua de niebla al comparar la cantidad de agua presente en cada evento de niebla y la interceptada por las muestras. De acuerdo con Frumau *et al.* (2006) se determinó la cantidad de agua presente en cada evento de niebla, a la cual fueron expuestas las muestras de vegetación, para lo cual se utilizaron los valores de eficiencia de captura encontrados en un experimento donde se midió el contenido de agua líquida en la niebla (LWC) y la cantidad de esta que fue interceptada por las arpas y los cilindros utilizados en este estudio,

Donde:

$$LWC_N = \text{Agua capturada por el cilindro (o el arpa) eficiencia de captura} \quad (9)$$

De acuerdo con los resultados del estudio mencionado anteriormente, la eficiencia de captura de los cilindros fue del 40%, mientras que la de las arpas fue del 32% (Frumau *et al.*, 2006). Por tanto, la eficiencia de captura de agua (EFC) por cada tipo de cobertura del páramo está dado por:

$$EFC_p = \frac{\overline{AC}_p}{LWC_N} \quad (11)$$

Donde p corresponde a una cobertura dada (frailejón, bosque natural o pastos) y AC es la captura promedio por la cobertura p .

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Capacidad de interceptación de agua de la niebla por las coberturas vegetales

El comportamiento de las coberturas vegetales con respecto a la captura de niebla, estuvo en función de la interacción de los factores evaluados en forma conjunta, como son coberturas y densidad del evento de niebla ($p < 0,0001$), pero esta relación no es significativa si se evalúa de manera independiente para cada variable. A continuación se presentan los resultados de la interceptación del agua de niebla por cada cobertura, de acuerdo con la densidad del evento (Figura 2a) y los promedios de captura de niebla de cada cobertura para el total de los eventos (Figura 2b).

De acuerdo con la Figura 2a es claro que en los eventos de baja densidad, no se evidencia una captura considerable de niebla por las coberturas analizadas, y

contrario a lo esperado, los registros de peso, en alguno de los eventos, dieron valores negativos, lo que implica que durante el tiempo de exposición de las mismas en este tipo de eventos de niebla, se presentaron pérdidas de agua (posiblemente agua estructural) en algunas de las muestras. Esta tendencia en la pérdida de agua por las muestras durante estos eventos, estuvo relacionada con la baja cantidad de agua líquida en la niebla de dichos eventos y por otro lado con el valor relativamente bajo de saturación de vapor de agua en el ambiente, lo que conjuntamente hace que la captura de agua por la vegetación sea muy baja o casi nula y que la demanda de agua del ambiente sea relativamente alta, lo que genera pérdidas del agua interceptada, por evaporación del agua libre.

En el BN la tendencia en la ganancia de niebla es proporcional a la intensidad de los eventos y con el área de captura de la misma (IAF = 3,14), en donde la ganancia de niebla está determinada en cierto grado, por la superficie de área foliar expuesta (Tobón et al, 2006). Las muestras de P, en promedio (Figura 2a) y en los eventos con densidad media (2), presentaron la mayor tasa de interceptación de agua de niebla, resultado que al parecer es inconsistente, si te tiene en cuenta que el IAF para el pasto (1,17) es mucho menor que el del BN. Sin embargo, estos resultados son similares a aquellos encontrados por Scatena *et al.* (2002) y Scatena et al.

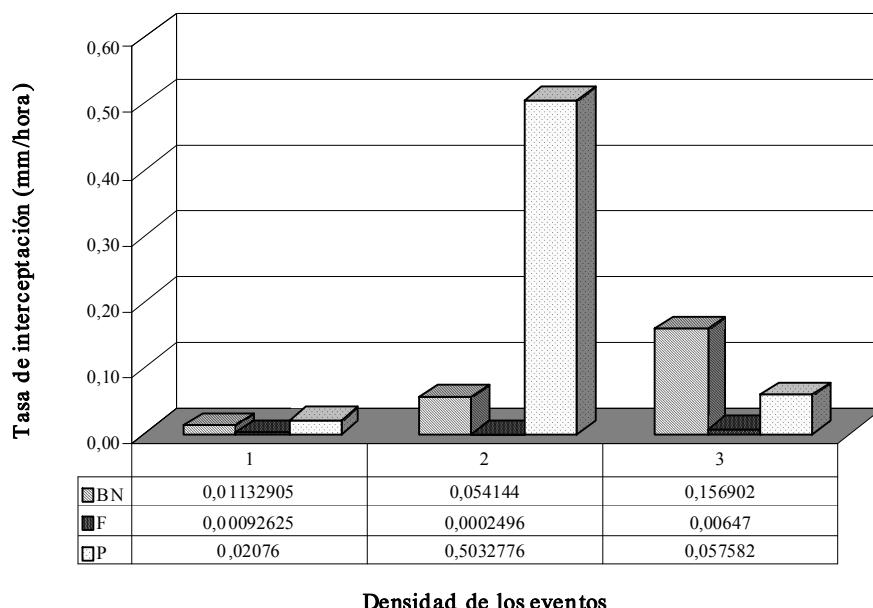


Figura 2a. Tasa de interceptación del agua de niebla por las coberturas del páramo de Guerrero, dada la densidad de los eventos de niebla. BN, bosque natural; F, frailejón; P, pasto; 1, densidad baja; 2, densidad media; 3, densidad alta.

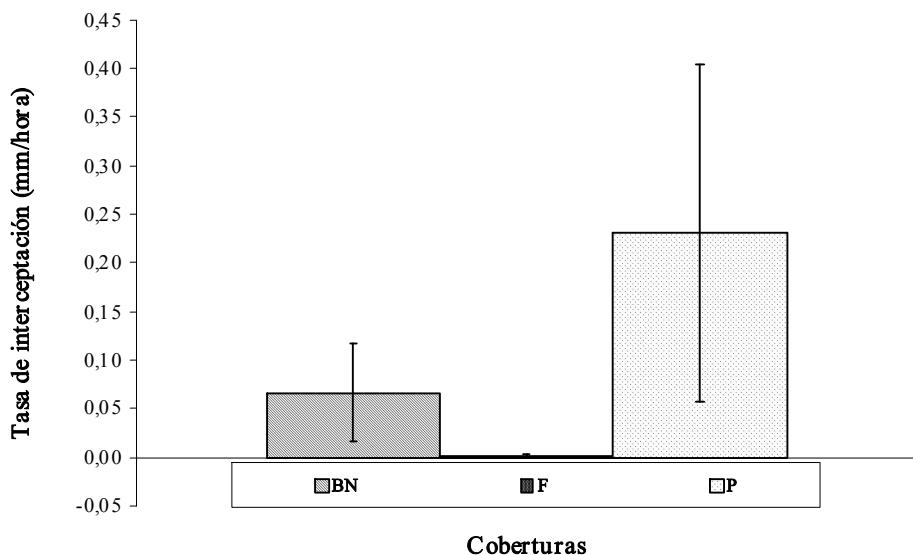


Figura 2b. Tasa promedia y variabilidad de la interceptación de agua de niebla (mm/hora) por cada una de las coberturas estudiadas (BN, bosque natural; F, frailejón; P, pasto).

(2003) en Puerto Rico, donde la exposición de muestras vegetales (acículas, hojas pequeñas y grandes) a diferentes eventos de niebla, mostraron una tendencia de mayor captura con la disminución del área foliar de las muestras, lo que parece estar relacionado con la física del impacto de las gotas de agua de la niebla, las cuales por efecto del viento bordean las superficies mayores (ej. Espeletia), sin impactarlas, pero impactan las superficies pequeñas expuestas.

En cuanto al F, presentó un comportamiento más estable, con valores por debajo de los del bosque y los pastos. Los registros igualmente indican que en 2 de los eventos analizados el F perdió peso y sólo ganó agua en los eventos de alta intensidad. No existe una explicación clara de la pérdida de peso por estas muestras de frailejón, dado que cada muestra fue sellada en su tallo para evitar pérdidas de agua estructural durante la exposición a los eventos. No obstante, es posible que algunas muestras, posteriormente a su separación de la planta continúen transpirando alguna cantidad de agua, lo que hace que pierdan peso al ser expuesta a eventos de niebla de baja densidad especialmente. Observaciones directas indican que las hojas pubescentes de la Espeletia son eficientes en capturar el agua de la niebla pero igualmente la pierden rápidamente por goteo hacia el suelo, dado que el agua no penetra la pubescencia y resbala en la superficie de esta pubescencia. En este proceso se puede esperar que solo una baja proporción del agua capturada quede expuesta, en la superficie de

la hoja, a los procesos de evaporación durante el evento de niebla o inmediatamente posterior a éste.

Dado que la cobertura de frailejón presenta una densidad relativamente baja en los páramos ($IAF = 0.124$), igualmente se puede esperar que en términos netos esta cobertura capture menos agua de la niebla que las demás coberturas analizadas y presentes en este páramo, las cuales presentan una mayor densidad de individuos por área.

Con respecto al BN, los valores de interceptación encontrados en este estudio son similares a los reportados para algunos bosques nubosos (Schemenauer et al, 1994, Bruijnzeel, 2001, 2006) y aquellos presentados por Walmsley et al (1996) en Canadá, donde los valores de deposición de niebla estaban por encima del rango de 0,69 mm/hora. Sin embargo, esta comparación no debe hacerse de manera directa, debido a que dichas investigaciones fueron realizadas en otro tipo de vegetación y otras condiciones climáticas.

3.2. Aporte neto de agua de niebla a la superficie del suelo

De acuerdo con la Figura 3, no existe una tendencia general en el cambio de humedad en el suelo con respecto a las características de los eventos de niebla analizados, es decir, no se evidencia una correlación entre la ganancia o pérdida del agua por el suelo durante los eventos de niebla y la densidad de los eventos, lo que indica que la ganancia neta

de agua por los ecosistemas de páramo durante los eventos de niebla, esta además controlada por otros factores como la duración de los eventos (Figura 4). A pesar de no presentarse una correlación entre las entradas de agua al suelo y la densidad de los eventos, si es claro que durante los eventos de densidad media (2) se presento una disminución de la humedad del suelo, lo que ratifica lo presentado anteriormente, en el sentido de que en algunos eventos la tasa de evaporación de agua desde la superficie fue mayor que la tasa de entrada de agua por interceptación.

Durante los eventos de alta densidad (3), se presento en general un aumento en la humedad del suelo (Figura 3), debido al goteo desde el dosel. Dado que las muestras de suelo fueron tomadas en el páramo propiamente dicho, este goteo fue generado por la vegetación de espeletia, lo que indica nuevamente que a pesar que este tipo de vegetación (F), no presento ganancias significativas de agua durante los eventos de niebla (Figura 2b), si se presento un goteo desde las hojas como se anoto anteriormente, lo que se evidencia por el incremento de la humedad del suelo durante los eventos de alta densidad. Lo anterior implica que sumados los valores de incrementos en la humedad del dosel del frailejón y las ganancias netas de agua en el suelo (0.78 mm/hora), este tipo de vegetación es altamente eficiente en capturar el agua de la niebla.

3.3. Relación entre la ganancia de peso (agua de niebla) y el peso seco de las muestras

Al comparar los incrementos en el peso de las muestras expuestas, debido a la interceptación del agua de la niebla, con el peso seco de cada muestra se encontró que la cobertura de frailejón, comparada con el bosque natural y los pastos, presentó una mayor capacidad para capturar el agua de niebla en relación con su contenido de materia seca. Esta mayor capacidad del F para capturar el agua de la niebla parece estar relacionada con la presencia de hojas suculentas y vellosas, en contraste con la estructura foliar del BN, donde éstas son cartáceas, pequeñas y esclerofíticas (Kapelle, 2005). Por su parte las perdidas rápidas del agua interceptada esta relacionada con las características físicas e hidrofobicas de esta pubescencia, las cuales impiden que el agua capturada sea retenida en las hojas y drene al suelo rápidamente. Sin embargo la baja densidad de individuos de F en el Páramo de Guerrero, lo cual es común en la mayoría de páramos andinos, con respecto a la del BN o aún los pastos, incide en una menor captura de agua de niebla por unidad de área ocupada, pese a que individualmente el F es más efectivo para interceptar la niebla, lo que muestra nuevamente que la interceptación de niebla es proporcional al área de captura y a las características morfológicas de las coberturas (p.e. pubescencia).

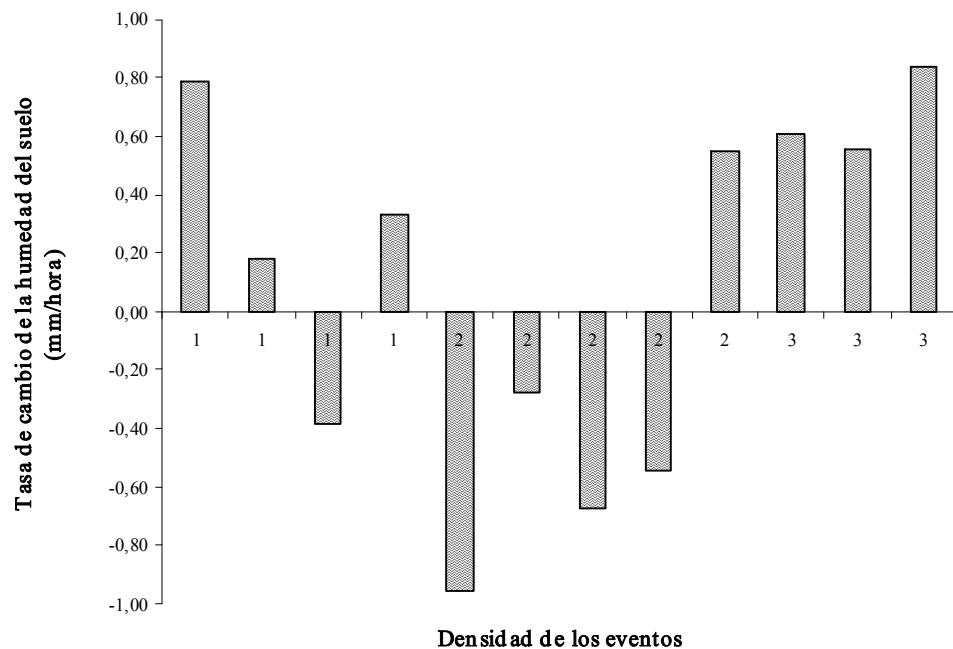


Figura 3. Dinámica de agua en la superficie del suelo (primeros 5 cm) durante los eventos de niebla en el páramo de Guerrero (Colombia), en función de la densidad de los eventos (1, 2 y 3).

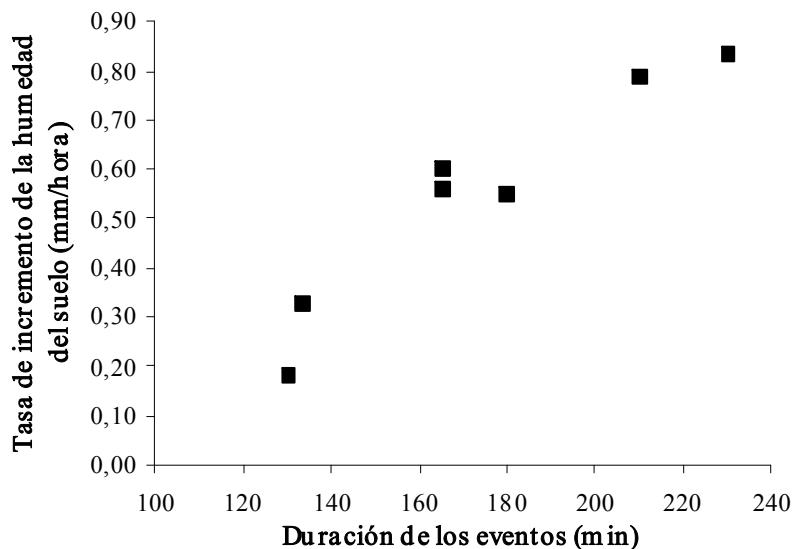


Figura 4. Incrementos en la humedad del suelo en el páramo de Guerrero (Colombia) en función de la duración de los eventos de niebla. Se presentan los valores promedios en los cuales las muestras aumentaron de peso.

3.4. Comparación entre medidas directas e indirectas para estimar la captura de niebla

La Tabla 1 muestra los valores (mm) de la interceptación del agua de la niebla por las coberturas estudiadas en cada uno de los eventos y por los neblinómetros (arpas y cilindros); en donde las cuatro primeras columnas, corresponden a los tratamientos evaluados en campo. La columna quinta y sexta, corresponden a mediciones indirectas para medir la captura de niebla, utilizando los neblinómetros.

De acuerdo con estos resultados (Tabla 1), es claro que los instrumentos son más eficientes para capturar el agua de niebla que los tres tipos de vegetación estudiados. Cabe anotar que aunque las mediciones son muy variables, estadísticamente no existen diferencias significativas entre las medias de los datos. Asimismo no se observaron tendencias claras de correlación entre medidas directas e indirectas; siendo menos preciso el P. Aunque las mediciones de las arpas y los cilindros están fuertemente relacionados por un modelo de tipo lineal ($R^2 = 0.92$), los valores de interceptación por parte de la vegetación, guardan mayor relación con las mediciones realizadas con el arpa, pese a que la mayoría de los estudios reportan mejores resultados con medidas hechas con los cilindros Juvik (Juvik y Ekern, 1978; Schemenauer y Cereceda, 1994; Jarvis, 2000; González, 2000; Frumau *et al.*, 2006).

De acuerdo con los valores de eficiencia de captura deducidos por Frumau *et al.* (2006) se calculó la cantidad

de LWC en cada evento de niebla, dando como resultado un valor promedio de 26.7 mg/m^3 , lo que implica que la eficiencia de la vegetación para capturar el agua presente en la niebla fue de 9.4% para el BN, para el F fue de 16,8% (sumados los incrementos de peso en las muestras y el incremento de la humedad del suelo) y para el P esta eficiencia fue de 14.5%.

Estos resultados son considerablemente menores a los encontrados por Schemenauer *et al.* (1994), utilizando arpas de $1,0 \text{ m}^2$ de área y levantadas 2,0 m con respecto al piso, muestran que el promedio de niebla capturado es $86 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, en contraste con lo capturado ($70 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) por la especie *Olea europaea*, de 9,2 m de altura. Esto indica que existe cierto grado de variabilidad entre valores encontrados para especies y condiciones ambientales diferentes, pues durante los eventos de niebla suelen presentarse pérdidas por evaporación del agua interceptada y/o goteo de agua desde las hojas y ramas, que no pueden ser detectados por el neblinómetro. Sin embargo, Schemenauer y Cereceda (1992c), reportaron que las tasas de depositación de niebla pueden variar entre los 6 a $70 \text{ L m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, dependiendo de las condiciones y la duración del evento.

4. CONCLUSIONES

La interceptación de niebla es un fenómeno físico, altamente variable, condicionado por muchas otras variables además de las analizadas en este estudio, que al

Tabla 1. Interceptación de agua de niebla (mm) por las coberturas vegetales (muestras expuestas) y por las arpas y los cilindros.

Eventos	BN	F	P	*Promedio vegetación	Arpa	Cilindro
1	0.624	0.039	-0.522	0.047	4.026	11.607
2	0.624	0.013	-0.924	-0.096	1.308	2.480
3	0.023	0.013	-3.116	-1.027	0.051	0.198
4	-0.196	-0.013	1.910	0.567	1.818	5.952
5	0.232	0.005	1.093	0.443	0.748	2.282
6	0.224	-0.004	1.303	0.508	0.238	0.694
7	0.045	-0.001	1.099	0.381	0.289	0.000
8	0.084	-0.004	-0.921	-0.280	0.000	0.000
9	-0.065	-0.009	0.194	0.040	0.000	0.000
10	-0.116	-0.005	-0.947	-0.356	0.629	0.198
11	0.079	0.002	0.806	0.296	1.019	0.099
12	0.000	-0.001	-1.713	-0.571	0.034	0.298

ser integradas al mismo, nos permitirían dilucidar patrones más concisos sobre la interceptación por coberturas vegetales y su aporte al balance hídrico de cuencas.

La capacidad de interceptación de niebla por las coberturas vegetales estudiadas en el Páramo de Guerrero, difiere considerablemente entre tipos de cobertura y está fuertemente controlada por la densidad de los eventos de niebla. Aunque el F presentó la mayor ganancia de niebla por kilogramo de biomasa, su bajo valor de IAF y la baja densidad de individuos, hace que las entradas netas por unidad de área por interceptación del agua de la niebla sean considerablemente menores.

La comparación entre medidas directas e indirectas de la interceptación del agua de la niebla muestra como la vegetación del Páramo de Guerrero guarda una mayor relación, con respecto a las cantidades capturadas en cada evento, con los valores registrados en las arpas. Asimismo, los instrumentos utilizados para medir la interceptación de agua de la niebla en la zona, son más eficientes para capturar el agua de la niebla que las coberturas. Las entradas netas de agua al suelo (aportes netos) durante los eventos analizados no son significativas, lo que puede estar relacionado con la baja capacidad de interceptación de las coberturas y la baja densidad de los eventos de niebla.

AGRADECIMIENTOS

El presente proyecto de investigación, llevado a cabo en la Reserva Forestal Protectora de Pantano Redondo y

Nacimiento del Río Susaguá (Páramo de Guerrero, Zipaquirá, Colombia) hace parte del proyecto denominado Hidrología de Ecosistemas de Alta Montaña, desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, donde Conrado Tobón es el director del proyecto y Eydith Girleza Gil Morales estuvo en calidad de tesista.

REFERENCIAS

- Bruijnzeel, L.A., 2001. Hydrology of tropical montane cloud forests: A Reassessment. En: Land Use and Water Resources Research. Vol.1, No.1; pp.1-18 <<http://www.luwrr.com>> (consultada: 20 agosto 2005).
- Bruijnzeel, L.A., Frumau, A., y Tobón, C., 2006. Final Technical Report DFID-FRP Project no. R7991. Cloud forest hydrology. DFID.FRP. 164 P.
- Bruijnzeel, L.A., y Proctor, J., 1995. Hydrology and biogeochemistry of tropical montane cloud forests: what do we really know? En: Tropical Montane Cloud Forests (L.S. Hamilton; J.O. Juvik y F.N. Scatena, eds.). Ecological Studies 110. May, 1991; San Juan, Puerto Rico. New York: Springer; pp.38-78 <<http://www.geo.vu.nl/users/trendy>> (consultada: 29 agosto 2005).
- Bruijnzeel, L.A., y Veneklaas, E.J., 1998. Climatic conditions and tropical montane forest productivity: The fog has not lifted yet. Ecological Society of America. Vol.79, No.1; pp.3-9
- Cavelier, J., Solis, D. y Jaramillo, M.A., 1996. Fog interception in montane forest across the Central Cordillera of Panamá. Journal of Tropical Ecology. Vol.12, pp.357-359

- Cereceda, P., Schemenauer, R.S., y Suit, M., 1992c. An alternative water supply for Chilean coastal desert villages. En: Water Resources Development. Vol 8, pp.53-59
- Conservación Internacional Colombia., 1999. Proyecto Piloto para La Conservación y Uso Sostenido del Páramo de Guerrero.
- Frumau, K. F. A., Bruijnzeel, L.A., y Tobón, C. 2006. Hydrological measurement protocol for montane cloud forest. Annex 2, Final Technical Report DFID-FRP Project R7991. Vrije Universiteit, Amsterdam, 105 P.
- Gonzales, J., 2000. Monitoring cloud interception in a tropical montane cloud forest of the South western Colombian Andes. En: Advances in Environmental Monitoring and Modelling. Vol.1, No.1; pp.97-117 <<http://www.kcl.ac.uk/advances>> (consultada: 29 agosto 2005).
- Hofstede, R., 1997. La importancia hídrica del páramo y aspectos de su manejo. En: <<http://www.condesan.org/e-foros/cdpp/cdpp31.htm> - 17k> (consultada: 20 agosto 2005).
- Holder, C.D., 2004. Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. En: Forest Ecology and Management. Vol. 190, pp.373-384 <<http://www.elsevier.com/locate/foreco>> (consultada: 29 agosto 2005).
- Holdridge, L., 1982. Ecología basada en zonas de vida. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José de Costa Rica.
- Jaramillo, O. Protocolo para el Desarrollo de actividades de Revegetalización con fines de Restauración en la Reserva Forestal de Pantano Redondo y Nacimiento del Río Susaguá. 64 P. En Prensa.
- Jarvis, A., 2000. Measuring and modelling the impact of Land-use change in tropical hillsides: the role of cloud interception to Epiphytes. Advances in Environmental Monitoring and modeling. Vol 1, No 1: pp.118-148
- Joslin, J.D., Mueller, S.F., y Wolfe, M.H., 1990. Tests of models of cloud water deposition to forest canopies using artificial and living collectors. Atmospheric Environmental. Vol 30, pp.1548-1561
- Juvik, J.O. y Ekern, P.C., 1978. A Climatology of mountain fog at Mauna Loa, Hawaii Island.
- Kapelle, M., y Horn, S.P., 2005. Hacia una breve descripción del concepto Páramo. En: Instituto Nacional de Biodiversidad (INBio) (eds.). Páramos de Costa Rica. pp.29-36
- Kerfoot, O., 1968. Mist precipitation on vegetation. Forestry Abstracts. Vol.29, No.1; pp.8-20
- Merriam, R.A., 1973. Fog drip from artificial leaves in a fog wind tunnel. Water Resources Research. Vol.9, No.6; pp.1591-1597
- Ortega, L.A., Mulligan, M., González, J., et al., 2000. Monitoreo Ambiental en los Bosques de Niebla: Cuantificación de la Precipitación Horizontal en Bosques Subandinos y Andinos. <<http://www.lablaa.org/blaavirtual/letra-c/congresoparamo/Indice.pdf>> (consultada: 29 agosto 2005).
- Scatena, F.N., Holwerda, F., Bruijnzeel, L.A., et al., 2002. Fogwater Inputs to a Cloud Forest in Puerto Rico. In: American Geophysical Union Scatena.
- Scatena, F.N., Holwerda, F., Bruijnzeel, L.A., et al., 2002. Fogwater Inputs to a Cloud Forest in Puerto Rico. In: American Geophysical Union.
- Schemenauer, R.S., y Cereceda, P., 1994. A proposed standard fog collector for use in high elevation regions. Journal of Applied Meteorology. Vol 33, pp.1313-1322.
- Stadmuller, T., 1987. Cloud Forests in the Humid Tropics. The United Nations University, 81 P.
- Tobón, C., y Arroyave, F., 2007. Inputs by fog and horizontal precipitation to the páramo ecosystems and their contribution to the water balance. Proceedings of the Fog Conference, La Serena, Chile, 2007.
- Tobón, C.; L. Köhler; Bruijnzeel, L.A.; Reto Burkard, K.F.A. Frumau y Schmid S, 2006. Dynamics of epiphytic vegetation in a lower montane cloud forest: Fog interception, storage and evaporation. Proceedings of the Second international symposium mountains in the mist: Science for conserving and managing tropical montane cloud forest. Hawaii preparatory academy (hpa), Waimea, Hawaii, July 27-august 2, 2004.
- Volkmarvareschi, 1970. Flora de los Páramos. Universidad de los Andes. Merida, Venezuela; 9 P.
- Vong, R.J.; Sigmon, J.T. y Mueller, S.F., 1991. Cloud water deposition to Appalachian forests. Environmental Science Technology. Vol 25, pp.1014-1021
- Walmsley, J.L.; Schemenauer, R.S. y Bridgman H.A., 1996. A Method for Estimating the Hydrologic Input from Fog in Mountainous Terrain. Journal of Applied Meteorology. Vol 35, pp.2237-2249
- Weaver, P.L., 1972. Cloud moisture interception in the Luquillo mountains of Puerto Rico. Caribbean Journal of Science. Vol.12, No. 3, 4; pp.129-144