

**Revisión de metodologías utilizadas en la medición y simulación de lluvia
oculta a nivel mundial**

Gina Lizzeth Moreno Cordero

Monografía presentada como requisito para optar al título de:

INGENIERA AMBIENTAL

Semillero Ecohidrología

Director:

Denisse Viviana Cortés Castillo

Dra. Ciencias Biológicas

Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiental

Bogotá D.C, Colombia

2021

Agradecimientos

Dedico este trabajo de investigación a Dios, primeramente, a mis padres por darme la vida, por su esfuerzo y dedicación a lo largo del camino, a María Eugenia González Sosa, por la primera oportunidad laboral, que fue la base para cumplir uno de los más grandes sueños de mi vida, convertirme en Ingeniera Ambiental. Mis hermanos y sobrina, por ser el motor de todos mis días. CGF, por ser el ánimo en los momentos difíciles, por ayudarme a no perder el camino. Maribel Patiño García por ser una inspiración en el campo laboral, a Dennise Viviana Cortes Castillo, por acompañarme en mi carrera y convertirse en mi directora de proyecto de grado, a la vida misma, por darme la fortaleza de enfrentarla y hacerme mejor en este camino.

Resumen

El proceso mediante el cual, pequeñas gotas de vapor de agua en movimiento horizontal entran en contacto con el follaje y se precipitan al suelo del ecosistema por acción de la interacción entre la neblina y la vegetación, se define como “*precipitación horizontal (PH)*”. La investigación para la identificación de modelos se basó en la búsqueda de artículos y selección a partir de la información relevante para el contexto estudiado. A nivel mundial se han estudiado metodologías, entre las que se encuentran: *Modelo de resistencia*, desarrollado por la Universidad de Cambridge en 1965, el *modelo analítico* desarrollado inicialmente en el año 1982 (Richland, EE. UU.) y *Modelo sofisticado*, desarrollado en el año 1990 en la Universidad de Bonn. Estos modelos buscan determinar el porcentaje de participación de la precipitación horizontal (PH) en la precipitación total y por tanto en el balance hídrico de los ecosistemas. Dentro de los principales resultados se determinó una ganancia de agua de niebla sobre la precipitación total, en vegetación de estratos altos (> 30 m), cercana al 13% sobre el total cuantificado. Por otra parte, la extensión, altura y la relación entre los porcentajes de captación y las velocidades del viento, generan afectaciones directas sobre el fenómeno y precipitación por impacto.

Palabras claves: *deposición, ecosistemas de alta montaña, precipitación horizontal, bosques, paramos, LWC, DSD*

Abstract

The process by which small droplets of water vapor in horizontal movement meet the foliage and precipitate to the ecosystem soil by the action of the interaction between the mist and the vegetation is defined as "horizontal precipitation (PH)". The research for the identification of models was based on the search of articles and selection based on the information relevant to the context studied. Methodologies have been studied worldwide, among which are: Resilience model, developed in 1965 (University of Cambridge). Analytical model, initially developed in 1982 (Richland, USA) and Sophisticated model, developed in 1990 (University of Bonn), which seek to determine the percentage of participation of PH in total precipitation and therefore in the water balance of ecosystems. Among the main results, the gain of fog water over total precipitation was determined, in vegetation of high extracts (> 30 m), this is positioned at 13% of the total quantified, on the other hand, extension, height and the relationship between the percentages of uptake and wind speeds, generate direct effects on the phenomenon and precipitation by impact.

Keywords: *deposition, high mountain ecosystems, horizontal precipitation, forests, paramos, LWC, DSD*

Tabla de Contenido

Agradecimientos	2
Resumen	3
Abstract	4
Introducción.....	9
Planteamiento del problema.....	11
Justificación.....	13
Objetivos	16
<i>Objetivo general</i>	16
<i>Objetivos específicos</i>	16
Marco teórico	17
Precipitación horizontal y ecosistemas	17
Los páramos	21
Los páramos en Colombia	23
Resultados: CAPITULO I: Caracterización de las metodologías de medición en campo y modelación de la lluvia oculta empleadas a nivel mundial.....	25
Modelo de resistencia	25
Modelo analítico.....	34
Modelo sofisticado de atmosfera – suelo – vegetación.....	36
Metodologías para medición en campo	38
Bosques nubosos	38
Páramos.....	41
CAPITULO II: Comparación de las metodologías caracterizadas con base en su alcance (limitaciones) y ecosistemas de referencia.....	48

Cuantificación de la precipitación horizontal en el bosque latifoliado maduro del Cerro Uyuca.....	48
Fog interception by non-vascular epiphytes in tropical montane cloud forest: dependences on gauge type and meteorological conditions	50
Cuantificación de la interceptación del agua de las nubes en la vegetación del dosel a partir de las mediciones del medidor de niebla	53
Modelación hidrológica de cuencas de paramo andino empleando información satelital: caso de estudio cuenca Río Vetas.....	55
Comparación de modelos	56
Aplicación de modelos en Colombia	57
Conclusiones.....	62
Referencias	64

Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Intercepción de precipitación horizontal por parcela en mm	43
Ilustración 2. Delimitación área de estudio.....	49

Lista de tablas

Tabla 1: Comparación deposición neta con flujo de tallo estacionario	29
Tabla 2. Muestras recolectadas en el desarrollo de la medición en campo.	42
Tabla 3. Resumen general capítulo I.....	47
Tabla 4. Módulos para la estimación de precipitación horizontal	55
Tabla 5. Resultados obtenidos en el modelo	56
Tabla 6. Comparación de modelos revisados.	59

Introducción

La niebla corresponde a un recurso natural, que se relaciona con el balance hídrico de los ecosistemas de alta montaña, teniendo gran incidencia en el recurso disponible, a nivel mundial se han venido estudiando diferentes modelos para la cuantificación de la precipitación horizontal (*fenómeno desencadenado a partir de la neblina*), cuyo comportamiento se ha estudiado desde el siglo XX. Este, se asocia principalmente a los bosques, sin embargo, aplica para ecosistemas de alta montaña, donde se presenta el fenómeno de la neblina, en estos últimos, se cuenta con una cantidad limitada de estudios en campo. Las metodologías comúnmente utilizadas para la cuantificación consideran, variables meteorológicas, así como la totalidad de las variables del balance hídrico, teniendo como principal referente a la evapotranspiración y la condensación.

En el presente documento se evalúan tres modelos mediante los cuales se han realizado diferentes estudios a nivel mundial: modelo de resistencia, modelo analítico y modelo sofisticado de atmosfera – suelo y vegetación, los cuales han evaluado diferentes variables para la interacción entre nubes, vegetación y niebla, a partir de estos es posible identificar el papel que tiene el fenómeno en la cuantificación del balance y la regulación del ciclo hídrico, lo cual implica en la estabilización del clima y la captación del dióxido de carbono en la atmosfera.

De acuerdo con lo anterior, se realiza la comparación entre metodologías, a fines de establecer los modelos que estiman de manera real el aporte de la precipitación horizontal al recurso hídrico del ecosistema estudiado. Dentro de los principales hallazgos encontrados se establece la importancia de la velocidad del

viento y los fenómenos meteorológicos en el comportamiento del fenómeno estudiado, así como el papel predominante que juega la altura de la vegetación en las zonas estudiadas en cuanto a los porcentajes de participación de la precipitación horizontal sobre la precipitación total, sin embargo, durante la investigación bibliográfica, fue posible determinar, que la información relacionada a la lluvia oculta es limitada, por lo cual el presente documento se convierte en una base de gran importancia para las investigaciones metodológicas y aplicadas a este tema de gran relevancia para el recurso hídrico a nivel mundial.

Planteamiento del problema

Actualmente a nivel mundial existen diversos modelos usados para la estimación de la oferta hídrica. Los modelos involucran cambios en la vegetación de la cuenca, usos del suelo, la formación de embalses, reducción de pérdidas en los sistemas de conducción, entre otros. De acuerdo con Zuluaga, L. (2011) los modelos de simulación dinámica de los sistemas contribuyen a que el modelador represente los sistemas complejos del recurso, y genere la predicción correspondiente del sistema, así como el impacto de la vegetación en el balance hídrico, las cuales, dependiendo de su característica al momento de la medición, tienen relación estrecha con el cambio de la evapotranspiración y por ende en la distribución de lluvia neta que alcanza el suelo (Serrato, F. B., & Díaz, A. R. 2006).

La cuantificación de la oferta hídrica, especialmente en ecosistemas de alta montaña, donde es posible que se presente un aporte significativo de agua proveniente de la lluvia horizontal, presentan subestimación. De acuerdo con Hofstede, R. (1997), se presentan dificultades para la medición de este tipo de precipitación, pese a que, específicamente para el caso de los páramos, su aporte equivale a aproximadamente el 18% de la precipitación total. Esto se estableció en ecosistemas similares en Costa Rica, a partir de la recolección por medio de colectores de niebla ubicados a una altura de 3500 m. Sin embargo, no se cuantificó en el estudio el aporte correspondiente a las gotas de rocío que se generan por las diferencias de temperaturas entre el día y la noche. Por su parte Katata, G. (2014), realizó una comparación entre tres diferentes metodologías usadas para la cuantificación de la precipitación horizontal, considerando la importancia de esta en las relaciones que se

llevan a cabo de manera natural entre las especies en los ecosistemas. Aunque existen una serie de investigaciones, acerca de los modelos de deposición del agua de niebla, pero no existe un acuerdo sobre una metodología única, sus alcances y limitaciones.

Por esta razón, en esta monografía se pretende hacer una revisión de las diferentes metodologías propuestas con el objetivo de documentar los diferentes modelos y simulaciones usados para la cuantificación de la lluvia oculta, con el fin de poder analizar y determinar aquellas metodologías mediante las cuales es posible tener una aproximación más real del aporte de la lluvia oculta en los diferentes ecosistemas estudiados y su posible aplicación en ecosistemas del territorio nacional, especialmente aquellos de la alta montaña.

Aunque se encuentran estudios específicos donde se relacionan diferentes metodologías para la simulación en tiempo real de las interacciones que se dan en la formación de neblina, su evaporación y finalmente su papel como parte fundamental del ciclo hidrológico alrededor del mundo, la información relacionada con este fenómeno natural es limitada, por lo que el análisis de estas metodologías y su posible uso en ecosistemas neotropicales es de gran importancia para futuras investigaciones que se den en este tema. Por esta razón, la presente propuesta propone determinar ¿Cuáles son los modelos y metodologías empleadas a nivel mundial que permiten estimar la lluvia oculta en el balance hídrico de los ecosistemas?

Justificación

La vegetación constituye un elemento de gran relevancia para la captación de agua proveniente de la lluvia oculta, pues la presencia de diferentes tipos de vegetación como bosques de pino, bosques mixtos, entre otros, contribuye a la captación de interceptación del agua de niebla (Pérard, S. 2011). Como es de amplio conocimiento, la vegetación influye en el ciclo de agua, desde la captación de lluvia por parte de los árboles para su posterior evapotranspiración a la atmosfera, hasta la relevancia en el factor ecológico que condiciona procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en las superficies foliares (Santiago, H. L. 2007). De acuerdo con Hofstede, R. (1997), en alturas superiores a 3200 msnm, donde se presentan ecosistemas de bosque andino y páramos, se evidencia un equilibrio morfodinámico de tipo frágil, el cual se altera por las condiciones de la agricultura, las cuales exponen al suelo a un contacto con el aire, aumentando así la evaporación en la superficie del suelo, lo que genera pérdidas de nutrientes, afectando la capa de vegetación natural que tiende a desaparecer y con ella los colectores vegetales de lluvia oculta. Esto se produce mediante la interrupción del efecto que se tiene entre el agua y la materia orgánica, generando consigo una reducción en la humedad, y un aumento en la descomposición lo que conlleva a una reducción en la cantidad de materia orgánica en el suelo y genera una menor capacidad de retención de agua en la zona. En la investigación realizada por Gómez Elorza, Á. (2016), se evaluó el comportamiento de la precipitación horizontal en la cuenca hidrográfica de alta montaña de la Quebrada Calostros (13.1 km² de extensión total) en la Calera Cundinamarca, sector que cuenta con presencia de ecosistemas de tipo páramo, en los cuales se presentan periodos de

exposición a la neblina considerables. Dentro de los principales resultados obtenidos fue posible inferir que, en el caso de la cuenca estudiada, en términos de entradas al balance hídrico, el porcentaje de participación de la precipitación horizontal corresponde al 60%. Por otra parte, dicha investigación permitió definir la importancia del fenómeno en cuanto al aporte que se presenta en las cuencas y ecosistemas del PNN Chingaza, los cuales se representan así: PH promedio diario de 5,6 mm/día, que equivale al 67% de las entradas al sistema en forma de lluvia en un bosque intervenido y de 4 mm/día, lo cual representa el 63% en lo que respecta al PNN en general. Por otra parte, durante el año 2020, se realizaron estudios y modelaciones correspondientes al comportamiento de la precipitación horizontal que ingresa a la Quebrada Calostros, y se concluyó que el mayor porcentaje de ingreso a la cuenca continúa presentándose a través de la PH, resaltando además la importancia de incluir el parámetro en las modelaciones futuras de ecosistemas de alta montaña como los páramos (Rojas Garzón, L. 2020)

En los sistemas de alta montaña la captación de agua de niebla se considera un aporte significativo al balance hídrico de este tipo de ecosistemas, los cuales tiene una gran importancia por los servicios ambientales que prestan y dentro de los que se destacan el aprovisionamiento de recursos naturales como el agua, regulación del ciclo hídrico, provisión de materias primas, medicinas y energía. A esto se suma su papel en la regulación del clima, captura de carbono, purificación del agua y el aire, adicionalmente nos prestan servicios culturales y de apoyo (Egan, P., & Price, M. (2014). Dentro de los ecosistemas de alta montaña se encuentran los páramos, los cuales son fundamentales para la regulación hídrica, siendo este su principal servicio

ecosistémico (Rincón, L. N. G. 2015) y del cual depende muchas comunidades a lo largo y ancho de los territorios.

Por esta razón, resulta importante estudiar las metodologías, ensayos de tipo científico y académico para la cuantificación de la lluvia oculta o precipitación horizontal en diferentes tipos de ecosistemas incluyendo los de alta montaña, en los cuales se da el proceso de interceptación del agua de niebla a través de las hojas de la vegetación que los componen. Con el análisis de estas metodologías se puede tener una línea base para poder definir cual o cuales son más apropiadas para su aplicación en los ecosistemas del territorio nacional y establecer los alcances y limitaciones de estas a la hora de generar modelos de balance hídrico que incluyan esta variable (precipitación horizontal).

Las metodologías utilizadas para la determinación de precipitación horizontal resultan una herramienta de gran importancia para la cuantificación de los niveles de agua, que se obtienen a través de este fenómeno natural, el cual contribuye al balance hídrico de los ecosistemas, en especial los de alta montaña. Investigar el comportamiento de la lluvia oculta a nivel mundial, es pertinente dentro de la formación en Ingeniería Ambiental ya que permite tener una visión más amplia de los procesos naturales de los ecosistemas de alta montaña, así como la cuantificación de nuevas fuentes de agua, que son la base del sostenimiento del planeta.

Objetivos

Objetivo general

Analizar las metodologías utilizadas en la medición y simulación de lluvia oculta a nivel mundial

Objetivos específicos

Caracterizar las metodologías de medición en campo y modelación de la lluvia oculta empleadas a nivel mundial.

Comparar las metodologías caracterizadas con base en su alcance (limitaciones) y ecosistemas de referencia.

Marco teórico

Precipitación horizontal y ecosistemas

La *“precipitación horizontal y/o lluvia oculta”*, se define como el proceso mediante el cual pequeñas gotas de vapor de agua en movimiento horizontal (presentes en la neblina) entran en contacto con el follaje de la cobertura forestal y se precipitan al suelo del ecosistema por acción de la interacción entre la neblina y la vegetación. Se diferencia de la precipitación vertical, en cuanto esta última no se encuentra influenciada por la vegetación (Pérard, S. 2011).

Desde 1900 se han venido realizando estudios sobre la cuantificación de la *“precipitación horizontal y/o lluvia oculta”*, estudios que se han centrado en las regiones templadas de Europa, Estados Unidos y Japón. Pese a los pocos estudios relacionados con la lluvia oculta, los realizados son útiles para analizar la relación entre el agua de niebla y la interacción entre la atmósfera y la tierra en los ecosistemas terrestres. Al producirse la deposición de este tipo de agua, se retiene en las hojas de la vegetación como agua superficial, al superar su capacidad de almacenamiento la hoja inicia su proceso de goteo hasta el suelo, generando infiltración, lo cual desencadena un importante y constante estado de humedad en las capas del suelo, la cual constituye una parte importante para la absorción de agua por las raíces de las plantas (Katata, G. 2014).

Los mecanismos que presentan interrelación para que el fenómeno de lluvia oculta pueda desarrollarse en los ecosistemas, corresponden a las relaciones entre la atmósfera y la tierra, el aporte de agua, el presupuesto de energía, evapotranspiración, crecimiento de plantas y las relaciones de los ecosistemas dentro

de los bosques nublados. La influencia de los intercambios de agua que se presentan en las interacciones atmosfera – vegetación, produce la deposición de agua de niebla que se retiene por las hojas de las plantas, bajo el modelo de superficialidad, hasta que finalmente empieza a caer al suelo en forma de gotas (Katata, G. 2014).

El estudio desarrollado por Hildebrandt, A., & Eltahir, E. A. (2007), sugiere que se genera una infiltración del suelo un poco más profunda cuando se presenta niebla, la cual se relaciona con bajas demandas de evaporación, favoreciendo el almacenamiento de las capas profundas y fuera de las capas poco profundas, lo que le atribuye una importancia adicional al fenómeno de lluvia horizontal, dentro del balance hídrico de un ecosistema. Este fenómeno es más notorio en las plantas cuyas raíces son profundas, como en el caso de los árboles ubicados en los bosques de niebla. De acuerdo con la investigación realizada por Pérard, S. (2011), la concentración de neblina es posible encontrarla en los bosques nublados, los cuales se distribuyen en los trópicos y subtrópicos de América y en el sureste de Asia. Estos ecosistemas también se consideran importantes en la producción y regulación de agua, debido a la importancia relacionada con los bosques como “cinturones de condensación del vapor de agua atmosférico”.

Aunque la lluvia oculta, se asocia a los bosques nublados, en ecosistemas de páramo este fenómeno natural también se produce, aunque ha sido poco estudiado. Uno de los estudios destacados fue desarrollado por Schemenauer et al. (1994), donde se especifica que es relevante considerar entradas por niebla para la realización del balance hídrico.

Existen diversas metodologías para cuantificar las entradas de lluvia oculta,

una de estas considera la medición de todas las variables del balance hídrico con una gran exactitud, sin embargo, los cálculos referentes a la evapotranspiración y la interceptación dificultan este método (Tobón, C., & Morales, E. G. G. 2007). También se han realizado diversas modelaciones para la deposición de agua de niebla, entre los que se encuentra el documento publicado por Katata, G. (2014), que se centra en tres modelos específicos:

Modelo de resistencia: se basa en la analogía de la resistencia eléctrica en un circuito de corriente continua. En 1965 se evaluó por primera vez, a fin de establecer la relación entre los tamaños y la distribución de las estomas, en conjunto con la velocidad del viento, encontrando especial relación entre los parámetros aerodinámicos de las plantas. Este modelo que fue desarrollado por Monteith en la Universidad de Cambridge (1965), identifico los hallazgos con respecto a los efectos de advección sobre la tasa de evaporación (E) y la turgencia relativa (RT). Posteriormente en 1977 se dan las primeras bases para los modelos posteriores de atmosfera/vegetación, donde se establecen los procesos de intercambio que se dan entre la vegetación y la atmosfera, presentando adaptaciones en cuanto a las estimaciones de estructura vertical de los bosques a partir de la inclusión de dos módulos de análisis (Shuttleworth, 1977). De acuerdo con Lovett (1986) fue posible establecer los rangos de precipitación horizontal en los puntos críticos entre 5- 6m², apuntando que el fenómeno estudiado tiene lugar sobre los 3 metros superiores del dosel, siendo está la base del desarrollo del modelo hasta la actualidad.

Modelo analítico: estudia la deposición seca de partículas, en el dosel vegetado, este usa ecuaciones analíticas aproximadas de la velocidad con la que caen

las gotas de neblina. Desarrollado inicialmente en el año 1982 (Richland, EE. UU.) El modelo se inició con la investigación de Slinn, WGN (1982) donde se realizó la modelación de la deposición seca de partículas en un dosel con vegetación a partir de los análisis obtenidos de los resultados encontrados en la solución de ecuaciones de tipo analítico. El modelo se aplicó en estudios de 1991 (Beswick et al, 1991) y en el año 2008, donde fue posible determinar la relación que existe entre las coberturas naturales, las condiciones meteorológicas y las condiciones generales de los ecosistemas, lo cual incide directamente en los porcentajes de captación (Hildebrandt, A. y Eltahir, EA 2008).

Modelo sofisticado de atmosfera – suelo – vegetación: dentro de este es posible encontrar dos modelos, los cuales buscan investigar las interacciones entre la atmosfera y la tierra bajo las condiciones de neblina, estos son: MIF microfical y Solveg. El modelo se desarrolló por Bott, A., Sievers, U. y Zdunkowski, W (1990) en la Universidad de Bonn, este especifica que los procesos de recolección de las hojas son posibles de evaluar a partir de datos de recolección experimental, teniendo como base la cuantificación en campo, mientras que los datos relacionados con la sedimentación se determinan de la misma forma que estableció Lovett (1986) previamente. Adicionalmente el modelo presenta comparaciones directas con los modelos de resistencia más relevantes, determinando que el Solveg, permite el calculo explícito de la relación de resistencia de estomas y la asimilación de CO₂ en las capas de la vegetación, lo cual influye de manera directa en la evapotranspiración de las copas de los árboles, adicionalmente el modelo se

considero más completo para los datos experimentales precisas en la deposición de agua de niebla en los bosques. (Katata, G., Nagai, H., Wrzesinsky, T., Klemm, O., Eugster, W. y Burkard, R.2008)

Por otra parte, existen otras modelaciones estudiadas para la “*precipitación horizontal y/o lluvia oculta*”, donde se tienen en cuenta los mecanismos de interacción entre las nubes, la vegetación y la hierba, con el fin de determinar la cantidad de precipitación horizontal en una zona específica, en donde se establece una relación entre la cobertura vegetal de una zona específica y la capacidad de captar agua de niebla y dejarla disponible en la superficie para la infiltración (Hildebrandt, A. y Eltahir, EA 2008).

Los páramos

Los páramos son ecosistemas de alta montaña, se encuentran ubicados principalmente en las zonas montañosas del centro y Suramérica, entre los 3000 y 4500 msnm (metros sobre el nivel del mar), la presencia de flora endémica, así como su capacidad de regulación hídrica natural, la cual incide directamente en el abastecimiento de agua a las ciudades aledañas y un soporte para las actividades antrópicas que allí se desarrollan, los constituyen como parte de los ecosistemas más importantes para la ecología a nivel mundial (Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., & Suárez López, T. 2005). Un punto clave para la importancia de estos, radica en los aportes hídricos en la zona de Suramérica, pues de estos nacen los principales Ríos: *Coca, Cauca, Magdalena, Napo y Orinoco*, los cuales se convierten en la principal fuente de agua para las principales ciudades (Bogotá, Lima, Quito, entre otras). Los ecosistemas de paramo presentan tres pisos altitudinales, el

subpáramo se caracteriza por contar con vegetación de porte bajo (*2 a 10 m de altura*), paramo, donde es posible encontrar gramíneas, con una altura hasta los 3 metros, por último, encontramos el super páramo, el cual se encuentra prácticamente desértico, donde habita vegetación con un promedio de altura máximo de 0.5 m, esta zona se encuentra debajo de la nieve permanente. En la zona de páramo el promedio anual de precipitación se encuentra entre 500 – 3000 mm (milímetros de agua), en esta zona la evaporación resulta baja y la saturación de vapor alta, lo cual incide directamente en el rendimiento hídrico de la zona, la cual mejora su porcentaje con la precipitación vertical que representa un ingreso considerable adicional de agua en el ecosistema. (Tobón, C., & Morales, E. G. G. 2007).

De acuerdo con Gómez, S., Salazar, C., & Longo, M. (2016). Los páramos presentan condiciones ambientales específicas las cuales contribuyen a su comportamiento a nivel general, los porcentajes de húmedas ascienden hasta el 85%, presentan suelos ácidos con pH entre 3,9 – 5.4, la presión atmosférica es baja, y un comportamiento en la temperatura entre menor a cero °C, hasta los 20°C. Gran parte de los ecosistemas de alta montaña, se encuentran amenazados, por las transformaciones que se han venido implementando en cuanto al uso del suelo, donde prima la ganadería, la cual altera las condiciones naturales, por otra parte el cambio climático que atraviesa el planeta, representa una amenaza potencial para este tipo de ecosistemas, ya que en los últimos cien años la temperatura media de la tierra a presentando tendencias a incrementar, lo cual inevitablemente amenaza con afectar de manera irreversible las condiciones de precipitación en las regiones y por tanto se presentaran alteraciones a los ciclos biogeoquímicos y en la distribución de las

especies. (Salinas, C., Fuentes, L. S., & Hernández, L. 2020).

Los páramos en Colombia

La biodiversidad del ecosistema se relaciona de manera directa con los servicios ecosistémicos, pues estos no serían posibles si no hubiera disponibilidad de actores en el ecosistema que garanticen recursos para el beneficio de las comunidades humanas. De acuerdo con el gran libro de los páramos, (Instituto Humboldt, 2012), en el caso de los páramos es posible obtener de ellos múltiples beneficios como el abastecimiento de agua a las grandes metrópolis, ejemplo de esto se da en el complejo del páramo Sumapaz, que es capaz de enviar un promedio de 16 m³/s, cantidad suficiente para abastecer el 70% de la demanda de la ciudad capital, Bogotá. Dentro de la problemática global actual, el principal enemigo del mantenimiento de la retención de agua que se genera en los páramos a través de las plantas resulta la minería, que es la principal responsable del daño de las superficies del suelo, generando deforestación de las especies con el fin de instalar mecanismos para la extracción de material. Por otra parte la fertilidad natural de los suelos, se ve afectada principalmente por la ganadería que genera pérdida de nutrientes y por ende ausencia en cosechas sembradas, además de este problema se observa que actualmente se busca que los grandes polinizadores de los ecosistemas, las abejas, sean criadas exclusivamente para la producción de miel, lo que altera de forma directa la polinización de los cultivos y por ende la producción eficiente de productos masivos de consumo humano (El gran libro de los páramos, Instituto Humboldt, 2012)

El conjunto del clima de paramo y las características de vegetación, así como los suelos que se encuentran en esta zona, los convierte en reguladores naturales de

escorrentía, son considerados por algunos como fábricas de agua, por su parte otros los asocian con el efecto de esponja, en Colombia, por ejemplo, los páramos regulan el 80% de los ríos y constituyen el 4% de la oferta hídrica superficial (Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., & Suárez López, T. 2005). De acuerdo con Vanegas Villegas, T., & Estrada Walker, J. A. (2015), la valoración de los ecosistemas es indispensable con el fin de estudiar sus características e identificar los servicios naturales que presentan a la población general, en el caso específico de los páramos, estos ecosistemas de alta montaña presentan clima frío y relieve que se encuentra formado por un movimiento glacial. Estos ecosistemas cuentan con vegetación como pajonales, frailejones, matorrales, cáscales y otras formaciones de característica bosque altoandino, que repercuten en la regulación del ciclo hídrico, así como la estabilización del clima regional y la captación de dióxido de carbono de la atmósfera.

Resultados: CAPITULO I: Caracterización de las metodologías de medición en campo y modelación de la lluvia oculta empleadas a nivel mundial.

Con el fin de reconocer las metodologías usadas para la medición y modelación en campo, de la lluvia oculta, se evaluaron diferentes modelos, por medio de los cuales se establecieron los respectivos alcances, análisis y resultados con los que se cuenta actualmente para establecer el comportamiento de este fenómeno en los ecosistemas de alta trabajados a nivel mundial.

Modelo de resistencia

La mayoría de los modelos de deposición de agua de niebla, estiman este parámetro como la suma de dos (2) procesos independientes: primero la **intercepción** de las gotas de agua por los elementos forestales debido a la turbulencia del aire que las transporta; segundo, unos procesos de sedimentación gravitacional de las gotas más grandes.

Los modelos están influenciados por diferentes factores como el **contenido de agua líquida o contenido de agua líquida de la niebla**, la distribución de tamaños de las gotas, los perfiles de velocidad del viento encima y dentro del dosel, los perfiles verticales de áreas de hojas, tallos y ramas en el dosel y la heterogeneidad de la estructura forestal (Katata, G.2014).

Dentro de los primeros trabajos se encuentra el de Monteith 1965, quien evaluó un circuito de corriente continua mediante el cual, buscaba establecer la relación que existe entre el tamaño y la distribución de las estomas y la velocidad del viento, parámetros que se relacionan directamente con las propiedades aerodinámicas de las plantas. Las mediciones de las resistencias para las hojas individuales y

comunidades de plantas se midieron, mediante análisis en laboratorio y campo con el fin de establecer las tasas relativas de evaporación, dependencia de la tasa de transpiración con respecto a la velocidad del viento y la rugosidad de la superficie, así como las tasas máximas de transpiración para diferentes cultivos y clima. El desarrollo del modelo de Monteith permitió identificar nuevos hallazgos con respecto a la teoría de 1964, que se basó en los efectos de advección local sobre la tasa de evaporación (E) y la turgencia relativa (RT) del trébol ladino (*Trifolium repens*). Para el caso específico de 1965, se evidencia que estos hallazgos corresponden básicamente a la velocidad de transpiración, con respecto a la humedad, ejemplo de esto, corresponde al comportamiento del suelo con 1 atm, la resistencia superficial de la hoja y el tallo comienzan a aumentar cuando la tasa de transpiración supera los 4 mm diarios. Por otra parte, especifica la correlación que existe entre la tasa de transpiración y la turgencia de la hoja, sin embargo, es posible inferir que se requiere una técnica para medir la resistencia directamente y la necesidad de realizar una modificación a la teoría de 1964, a fines de incluir la resistencia de la superficie que cambia con la velocidad de transporte respectivamente.

De acuerdo con Shuttleworth (1977), el intercambio de agua entre la niebla que es impulsada por el viento y la vegetación natural, permite de manera unilateral la captura de las gotas de niebla y los procesos de evaporación/condensación, generando un mecanismo de “captura directa”, que permite inferir un modelo similar a los procesos de intercambio atmosfera/vegetación, mediante los cuales es posible establecer la magnitud y variación de resistencias superficiales para procesos de vegetación “achaparrada”, como para “estratos altos”. A partir de este modelo, se

inician una serie de investigaciones para determinar el potencial y la captura de la información, con un modelo computacional 1-D, estacionario que permite establecer deposición y evaporación de la niebla con doseles de vegetación uniforme.

El modelo de Shuttleworth fue adaptado entre 1982-1984, este incorporo la estructura vertical de las copas en los bosques, mediante la aplicación de un modelo que contenía dos módulos. El primero realizaba la simulación de la estructura del bosque y las tasas de crecimientos de los árboles y el segundo presentaba el cálculo de la tasa de evaporación y deposición del agua de niebla que resultaba de la caída y sedimentación de esta, este módulo presenta una subdivisión correspondiente a la simulación de la difusión turbulenta de las gotas y la deposición del agua niebla en las superficies foliares y las ramas debido a la caída y sedimentación.

Adicionalmente, se realizó la simulación de procesos de condensación y evaporación en el proceso de caída de niebla en las capas de los árboles. A fines de realizar la totalización de lluvia horizontal en el proceso, se realizó la suma de flujos en todas las capas y componentes para determinar el porcentaje de precipitación en el dosel (Lovett, GM y Reiners, WA, 1986). Mediante este modelo fue posible inferir que los rangos de precipitación horizontal pueden variar hasta alcanzar el valor crítico en el rango de 5-6 m², es decir, el fenómeno tiene lugar sobre los 3 metros superiores del dosel.

En años posteriores, Lovett (1984), estableció un modelo de resistencia que consistía en la deposición en el dosel de un bosque de abetos balsámicos (*Abies balsamea*), teniendo en cuenta el impacto y la sedimentación de la precipitación y considerando además la evaporación y condensación en las superficies del dosel, a

través del análisis en diferentes estratos y clases de tamaños de gotas. Este modelo se estudió en campo, con resultados que consideran velocidades de deposición entre 1 y 80 cm.s⁻¹, teniendo mayor tasa de deposición de agua en los 3 metros superiores del dosel. La impactación inercial se considera un mecanismo de deposición dominante, sin embargo, la sedimentación, toma relevancia en el fenómeno, cuanto se presentan bajas velocidades del viento y en el interior del dosel estudiado, contrario a esto, aumentos en la velocidad del viento, incentivan la deposición por impacto y disminuyen los rangos de precipitación horizontal, por sedimentación. Para llevar el modelo a campo fue necesario usar instrumentos meteorológicos que permitieran evaluar parámetros como la velocidad del viento y la evaporación, para lo cual se usaron anemómetros de copa, previamente calibrado. Por otra parte, se construyeron evaporímetros pequeños usando papel de filtro Whatman, a fin de medir la pérdida de agua, a través del uso de una pipeta plástica. Los elementos descritos se ubicaron a cuatro alturas dentro del dosel, con periodos de evaluación entre 30 y 130 minutos. Para el análisis del modelo descrito, se tuvo en cuenta la resistencia de capa límite, la cual se ajustó en 9cm, altura a partir de la cual, fue posible estimar las tasas de evaporación y la observación en campo, siguiendo el modelo establecido por Monteith (1965), Para la evaluación del modelo, se estudió el comportamiento, durante la noche del 14-15 de julio de 1981, encontrando valores de condensación de tipo negativo, que, para el caso del sistema hidrológico y el balance de agua, se considera pérdida, debido a la evaporación por efecto del viento, y temperatura, atribuyéndose a la entrada total de agua, mientras que, para el 12 de septiembre, el comportamiento de la evaporación excede lo estimado en la teoría.

En el modelo se estudia el flujo de tallo en estado estable (ST) y el termino más caída (TF), a fin de cuantificar los milímetros/hora que se podían presentar en la observación del comportamiento de la precipitación, sin embargo, el autor considero que las mediciones realizadas pueden presentar desviaciones por la falta de datos meteorológicos simultáneos. En la tabla 1, se describen los resultados previamente mencionados:

Tabla 1: *Comparación deposición neta con flujo de tallo estacionario*

Fecha	Predicciones del modelo (mm h ⁻¹)			Observado
	Deposición de nubes	Evaporación	Neto	SF+TF (mm h ⁻¹)
15.07.1981	0.10	-0.03	0.13	0.11
27.07.1981	0.36	0.06	0.30	0.32
09.09.1981	0.13	0	0.13	0.12
12.09.1981	0.07	0.17	<0	0

Adaptado de: Lovett. "Tasas y mecanismos de deposición del agua de las nubes en un bosque de abetos balsámicos subalpinos". *Ambiente atmosférico* (1967) 18.2 (1984): 361-371.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la observación, es posible inferir, que las predicciones del modelo presentan desviaciones mínimas, en cuanto al comportamiento de la precipitación. El autor consideró que se presentan errores a la hora de cuantificar a causa de errores en la predicción, medición en campo y en la parametrización de los datos de entrada del modelo a la hora de estructurarlo. El modelo presenta una estructura que permite identificar a grandes rangos la comprensión de los datos relevantes a la hora de estudiar un modelo de estas características y realizar las respectivas aproximaciones teóricas.

En los años 1988-1991 se realizó la modificación del modelo de Lovett, con el fin de establecer la eficiencia de un recolector a granel (hojas), en lugar de la

estructura completa (tallos, ramas, hojas, entre otros), observando a partir de esto la distribución de número y tamaño de las gotas en un bosque de Estados Unidos. Por su parte Mueller (1991) modificó el modelo para establecer de manera específica la entrada de Contenido de Agua Líquida (LWC) en la distribución por tamaño.

El modelo desarrollado por Klemm, O., Chang, SC y Hsia, YJ (2006), se llevó a cabo a través de comparaciones directas, que se basaban en los cambios de flujo temporales de la lluvia oculta, para esto se tomaron en cuenta los datos teóricos versus la medición en campo, los cuales se desarrollaron por un total de 13 meses entre 2005 – 2006. A fines de estimar el comportamiento del dosel, las comparaciones directas en cambios de flujo temporales de la lluvia oculta sobre el dosel entre el modelo y la medición en campo se llevaron a cabo entre 2005 - 2006, por un total de 13 meses. En la determinación del comportamiento del dosel, se aplicó el modelo de covarianza Eddy, que consiste en el uso de un anemómetro y un analizador $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, a través de la medición las concentraciones de los dos gases (dióxido de carbono y agua). Para la recolección de datos se ubicaron los equipos en una torre de altura, en la cual se realizaba la medición con frecuencia alta (generalmente 20 Hz). Los cálculos para la covarianza se realizaron a través de la relación entre el viento vertical, concentración de CO_2 y vapor de agua respectivamente, a partir de lo cual fue posible iniciar con el análisis del comportamiento de los parámetros, a través de las circunstancias experimentales (INTA, 2012).

Además de lo anterior, se realizó la revisión de estudios previos de la física de la niebla del lugar de estudio, intercambio de niebla, entre otros, donde se había evaluado previamente el modelo de Eddy, a fin de realizar comparaciones entre el

modelo de deposición y las medidas de intercambio directas (Wrzesinsky, T. y Klemm, O. 2000). Para el desarrollo del modelo se tuvieron en cuenta, el contenido de agua líquida (LWC), la distribución del tamaño de las gotas y la velocidad del viento, los cuales fueron comparados durante el desarrollo, para cuantificar los resultados y determinar el área de agua de niebla entre la vegetación y la atmosfera del lugar durante la evaluación. Por otra parte, la sedimentación de las gotas de niebla permitió la cuantificación en el modelo unidimensional como en la medición directa a través de la ley de Stokes y de acuerdo con Beléndez, A. (1992), resistencia al movimiento (f_r), de cuerpos esféricos en un fluido viscoso en régimen laminar, directamente proporcional al radio del cuerpo r , a su velocidad “ v ” y al coeficiente de viscosidad del medio “ n ”, es decir, la fuerza de impacto que se genera al presentarse la caída de un cuerpo esférico de radio r y densidad ρ .

Dentro de los resultados obtenidos fue posible definir que el modelo presentaba dificultades como enfoque experimental, ya que los flujos por encima del dosel pueden generar influencia en el equilibrio de la masa en cuanto a la atmosfera. El balance de masas se ve afectado al evaluar la entrada de LWC , al no producirse evaporación o condensación. En el caso de los datos basados en la covarianza de Eddy, se recopilaron a 32 metros del suelo, mientras que los parámetros de entrada para el modelo de Lovett se hicieron a 21 metros. De acuerdo con la naturaleza del modelo, es posible determinar el orden de magnitud de la deposición de la niebla, a partir de la cuantificación de la deposición a largo plazo, tanto en el modelo, como en la medición en campo, incluyendo en ambos casos el flujo de sedimentación.

En cuanto a la comparación de los modelos estudiados, se establece que

mediante el uso de la distribución medida del tamaño de la gota (*DSD*) la deposición de niebla que se predice es mayor. En el modelo el intervalo de confianza se mantuvo en 95% cuantificando las incertidumbres de las variaciones en cuanto a los parámetros de entrada medidos, lo cual permite inferir una desviación significativa de más o menos 37%, entre lo teórico y lo reportado en la medición en campo (*con DSD*) en la deposición de agua de niebla. Por otra parte la medición en campo, presento un panorama completamente distinto a las estimaciones teóricas, sin embargo siguiendo estas, fue posible caracterizar de manera correcta el comportamiento de las precipitaciones en el tiempo de estudio en la zona, por lo cual los autores recomiendan realizar mayores estudios de este tipo en diferentes ecosistemas a nivel mundial, aplicando diferentes modelos, a fines de esclarecer el comportamiento del fenómeno, como parte fundamental del balance hídrico (Klemm, O., Wrzesinsky, T. y Scheer, C. 2005)

Los estudios de campo se continúan realizando por diferentes autores, usando modelos y técnicas que se aplican a partir de los datos bases que fueron posibles de obtener a partir de las primeras estimaciones realizadas en el siglo XX. Dentro de las metodologías evaluadas es posible determinar la importancia de los medidores de niebla, los cuales constituyen un papel fundamental en el desarrollo de los estudios de campo enfocados en el seguimiento al fenómeno de la precipitación horizontal, por medio de estos es posible cuantificar la eficiencia de recolección de niebla en diferentes ecosistemas. Ejemplo de esto, se considera el estudio llevado a cabo en el año 2008 en el Parque Nacional Garajonay ubicado en las Islas Canarias (1090 -1300 msnm), donde validaron las características relevantes para la determinación de la

participación en el balance hídrico de la PH, para este, se tuvieron en cuenta: *tasa de evaporación del dosel húmedo, corrección de medidas de lluvia, aplicaciones del modelo de impactación*. A partir del comportamiento que presentaron los medidores, para el caso de las especies de árboles (*E.arborease*) presentes en la zona, se determinó que la precipitación correspondió a 250 mm/año, cuyo valor se distribuye a lo largo periodo evaluado. El estudio permitió además identificar efectos indirectos que proporciona la niebla sobre la evapotranspiración, ya que esta puede limitar la evaporación del dosel humano y la transpiración de las plantas. (Ritter, A., Regalado, C. M., & Aschan, G. 2008)

El comportamiento del fenómeno depende de las características de lluvia, condiciones meteorológicas y de las características de las coberturas vegetales, las cuales son posibles de evaluar mediante diferentes metodologías, en las cuales se concluye que esta variable presenta dificultades de medición, ya que depende del parámetro de capacidad de almacenamiento del follaje, la cual debe medirse a través de equipos estándares como los neblinómetros, para establecer a partir de registros cuantificables la cantidad de agua que se genera en los eventos de niebla y su posibilidad de interceptación por estructuras vegetales. (Méndez Monroy, J. F. 2013)

De acuerdo con Domínguez, CG, García Vera, MF, Chaumont, C., Tournebize, J., Villacís, M., d'Ozouville, N., y Violette, S. (2017), mediante el uso de estaciones meteorológicas ubicadas en las áreas abiertas, usadas para cuantificar las variables de lluvia e interceptación de niebla (entradas del modelo), mientras que las condiciones de radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento (calcula evaporación). Los estudios en bosques se encuentran ampliamente documentados, en

el caso del Archipiélago de las Galápagos, se realizó en dos periodos del año diferentes a fines de identificar diferencias correspondientes a las variables meteorológicas. En el primer caso se realizó el análisis entre el periodo enero – mayo, en el cual predominan las altas temperaturas y la precipitación convectiva de alta intensidad, en el segundo periodo (junio – diciembre), se presentan bajas temperaturas, precipitaciones y presencia estacionar de niebla. Para la estimación específica se uso un colector de neblina, donde se determinó que se presenta un mayor porcentaje de captación en la estación fría, la cual se combino con los datos recolectados de velocidad del viento, lo cual conduce a una mayor interceptación de lluvia oculta en la zona, adicionalmente, el autor sugiere que la interceptación medida en medidores de niebla y la capturada por la vegetación se encuentra ampliamente relacionada.

El uso de medidores de niebla para la interceptación de precipitación horizontal permite inferir su importancia en el desarrollo científico del modelo, sin embargo, se cuentan con pocas investigaciones que permitan definir la relación cuantitativa que presentan estos en el rendimiento hídrico, los cuales se pueden interpretar a partir de la recogida y el transporte de la neblina. Dichos rendimientos se estiman un 25 % por debajo de lo reportado teóricamente (Regalado, CM y Ritter, A. 2017)

Modelo analítico.

El modelo analítico es aquel en el que se utilizan ecuaciones analíticas que permiten identificar de manera aproximada la velocidad de las deposiciones, presentando además parámetros estadísticos y de control más sencillos que el modelo

de Lovett, sin embargo, para la obtención de datos experimentales del fenómeno, es necesario contar con datos adicionales, como el tamaño de las gotas de niebla (Hildebrandt, A., & Eltahir, E. A. 2007). Los modelos analíticos y de resistencia, son ampliamente utilizados para determinar la deposición seca de partículas, sin embargo, el porcentaje de aplicaciones de este modelo para la estimación de la deposición de agua de niebla es relativamente baja.

De acuerdo con Van Dijk, AIJM y Bruijnzeel, (2001), el aspecto relevante para la interceptación se encuentra ampliamente relacionado con el efecto del sitio y los equilibrios correspondientes al área de captación. Es importante tener claro, que la tasa de evaporación de un dosel húmedo será mucho mayor que uno que se encuentre seco, para este caso específico, se realiza la comparación con el modelo Gash, mediante el cual se establecían tres fases que conducían a determinar los sistemas de captación de lluvia. Los cuales corresponden a la humedad del dosel, saturación y secado, teniendo en cuenta que el proceso de evaporación se afecta por diferentes factores, dentro de los que se tienen: saturación y tasa de evaporación, tiempo en que se seca el dosel tras la precipitación. (Arellano, R. P., Pérez, M. M., & Cañas, J. R. 2016)

Teniendo en cuenta, el estudio de Katata, G. (2014), se realizó una modelación a través de ecuaciones analíticas para determinar la velocidad de deposición, donde, el flujo de deposición de niebla se representa como el producto de la velocidad de deposición por el contenido de agua líquida en kg/m³. La velocidad de deposición (V_d) del agua de niebla, se calculó de acuerdo con la teoría de intercambio turbulento y una relación lineal entre la velocidad lateral del viento y el $V_d = A * U$ donde A es un factor

adimensional que representa la eficiencia de remoción de las gotas de niebla por parte del dosel dependiendo de las características de la vegetación.

El modelo analítico, se desarrolló al mismo tiempo que el modelo de Lovett, sin embargo, este se emplea para la estimación de deposición seca, por lo tanto, las aplicaciones de este modelo en la deposición de precipitación horizontal son limitadas. Aun así, Beswick y Col (1991) mencionan que este modelo se puede considerar más simple que el modelo con el que se comparaba inicialmente (Lovett), ya que no se requiere modificar los parámetros y puede presentar resultados más prácticos en su uso, para la estudiar la precipitación horizontal, en comparación con modelos multicapa; además de considerar el beneficio económico en el desarrollo del modelo.

Modelo sofisticado de atmosfera – suelo – vegetación

Teniendo en cuenta las características definidas para el desarrollo del modelo, es posible identificar dos modelos para la revisión de las interacciones complejas que se dan entre la atmosfera y la tierra en condiciones de niebla. Dichos estudios se revisarán a continuación:

Modelo micro físico FOG para vegetación (MIFOG-V): este modelo 1D estudia la simulación de radiación y niebla en vegetación alta. El modelo usa una estructura multicapa con módulos para la atmósfera, el suelo, la vegetación microfísica y radiación solar. De esta manera, considera de forma detallada las interacciones entre el calor, la humedad la activación de aerosol y las gotas de niebla. Los procesos de deposición de niebla se modelan con la eficiencia de recolección experimental y la sedimentación se

explica de forma similar al modelo de Lovett (Bott, A., Sievers, U. y Zdunkowski, W., 1990).

Dentro de los estudios realizados al modelo descrito, es posible evidenciar que los procesos de deposición se dan por la superficie de las hojas, mediante las cuales se modela la eficiencia de recolección por la impactación proporcionada de acuerdo con Thorne *et al* (1982), el crecimiento de partículas depende de la humedad relativa y la solubilidad de las partículas, lo cual se calcula explícitamente.

SOLVEG: de acuerdo con Katata, G. (2014), este modelo se considera de tipo unidimensional de multicapa. Consiste en cuatro (4) módulos, uno para la atmósfera cerca de la superficie, el suelo, la vegetación y la radiación dentro del dosel. El módulo de atmósfera calcula las variables para cada capa resolviendo ecuaciones 1D de difusión para componentes de velocidad del viento horizontal, temperatura potencial, humedad específica, LWC, energía cinética y concentraciones de gas y aerosol con un modelo de turbulencia.

El módulo de vegetación calcula la temperatura de las hojas, el agua en la superficie de las hojas para cada capa de dosel y el flujo vertical de líquido. También incorpora la fotosíntesis para calcular la tasa de asimilación de CO₂. El módulo de radiación calcula separadamente los flujos directos y difusos hacia abajo y arriba de los rayos solares de onda larga, esto para calcular la cantidad de calor en la superficie del suelo y en el centro de las capas del dosel (Nagai, H. 2005). Finalmente, el módulo de suelo calcula la temperatura del suelo, el contenido volumétrico de agua en el suelo y la humedad específica del aire en los poros del suelo usando ecuaciones de conducción

de calor, balance de masa y difusión de vapor de agua. En las comparaciones realizadas, el modelo SOLVEG, considero los procesos de impactación y sedimentación para calcular la deposición de lluvia oculta y resulto más preciso con respecto al modelo Lovett, ya que este (SOLVEG), permite realizar cálculos de velocidad de deposición a partir de los flujos de precipitación horizontal. Por otra parte, estableció que, los árboles de hoja ancha presentan velocidades de deposición más bajas en comparación con los árboles coníferos con la misma estructura de copa (teniendo en cuenta que la hoja es más grande, produciendo una menor eficiencia de captura). (Katata, G., Nagai, H., Ueda, H., Agam, N. y Berliner, PR.2007). Por lo anterior es posible inferir que el uso adecuado del modelo permite el análisis completo del comportamiento del fenómeno estudiado en el presente documento y que en el pasado se evaluó en bosques de montaña en Arabia Saudita, donde se estimó la distribución espacial de la deposición acumulativa de la precipitación horizontal de la zona.

Metodologías para medición en campo

Mediante la revisión bibliográfica, se identificó la aplicación en campo de modelos para la cuantificación y análisis del comportamiento de la precipitación horizontal. En el presente capítulo se consolidará información relevante para el análisis de la estimación del fenómeno, mediante la revisión de estudios aplicados que se han llevado a cabo a nivel mundial en diferentes ecosistemas de alta montaña.

Bosques nubosos

El estudio de Hildebrandt, A., & Eltahir, E. A. (2008). Se llevó a cabo en un bosque nuboso estacional en Dhofar, Omán, dicha área corresponde a un ecosistema

ubicado dentro de una cadena montañosa costera de Yemen. La investigación se desarrolló entre los meses de junio a septiembre, bajo un clima semiárido. Las corrientes del viento terrestre en la zona son provenientes del mar arábigo, que empujan el aire húmedo sobre una zona de turgencia fría frente a la costa. Esta situación conduce a la formación de nubes orográficas y llovizna, lo cual repercute en la conducción de densa niebla que se prolonga en la zona durante tres meses al año (Miller y Morris, 1988). En la zona de estudio, el sector montañoso se encuentra cubierto de bosques.

El modelo tomó como base la investigación realizada por el mismo autor en 2007. La estación de investigación se ubicó a unos 450 msnm y a 20 km de la costa, en el caso específico del estudio se evaluó la precipitación en dos componentes principales (1) lluvia y (2) precipitación horizontal. Se consideró únicamente el transporte de las gotas desde la parte superior del dosel a partir de turbulencias y no se estimaron efectos secundarios como el efecto de borde.

El modelo de Hildebrandt, A., & Eltahir, E. A., se centró en la aplicación del modelo de vegetación dinámica, cuyas siglas en inglés corresponden a IBIS (Integrated Biosphere Simulator), el cual combina el modelo de ecosistema dinámico con un esquema de transferencia de atmósfera de vegetación de superficie (SVAT), mediante modelos unidimensionales para organizar verticalmente las capas, incluyendo las capas de vegetación. En este se diferencian los tipos funcionales de plantas (PFT), diferenciando las capas de dosel superior como los árboles e inferior (arbustos, hierbas), así como la forma, hábito y vía fotosintética de las hojas.

Este modelo permite el cálculo de flujos verticales de agua, energía y carbono hora a hora. Además, realiza un balance de carbono, que integra la asimilación neta por las plantas, es decir, suma fotosíntesis, respiración y índice de área foliar (LAI).

El modelo de precipitación horizontal aborda dos de los factores más limitantes que tienen que ver con la predicción de este fenómeno. Como primera medida, evalúa el transporte de las gotas de las nubes desde la atmosfera a la superficie, y la capacidad de la superficie de capturar e interceptar las gotas de la atmosfera.

El flujo de las gotas de nubes desde arriba del dosel (P_{hz}), se describe mediante la ecuación (Beswick Et Al.1991):

$$P_{hz} = LWC * V_d$$

Donde V_d es la velocidad de sedimentación de las gotas de las nubes.

En el estudio, el modelo se integró junto con el IBIS; para los datos de entrada se tuvieron en cuenta las condiciones meteorológicas (a excepción de la nubosidad y las propiedades de las nubes), derivación de las propiedades de las nubes, las cuales no se midieron en campo, sino que al contrario se asumió un rango de propiedades constantes en el tiempo. Dentro de los experimentos realizados se aplicó el modelo, fuera de la línea de los doseles idealizados (pasto, bosque y grupo forestal), mediante lo cual fue posible identificar el comportamiento de la precipitación horizontal bajo propiedades diferentes de vegetación y nubes. Todos los experimentos se realizaron para 6 entradas, donde se tomaron como referencia las propiedades de las nubes. Dentro de los principales hallazgos del modelo, es posible identificar lo siguiente:

El comportamiento de la precipitación sobre el pasto se reduce hasta un 28%, en comparación con un dosel cerrado y un 28-33% en comparación con un dosel agrupado, lo que implica pérdidas significativas para el agua disponible en las plantas, mientras que la deposición turbulenta sobre un bosque agrupado es mayor que un dosel cerrado. Por ejemplo, para un grupo de plantas de 30 m, con copas hasta los 6,5 metros (sitio de estudio), la ganancia de agua de niebla, sobre la precipitación total es de 13% aproximadamente del total cuantificado en la zona, lo que nos indica que la altura y la extensión del ecosistema pueden generar afectación directa sobre el fenómeno, sea de forma positiva (como en este caso), o negativamente, cuando se trata de ecosistemas con porcentajes de vegetación más bajos.

Páramos.

El modelo se llevó a cabo en el Páramo de Guerrero, ubicado en el departamento de Cundinamarca (Colombia), el cual se extiende por varios municipios, incluyendo una fracción de 14 hectáreas pertenecientes al departamento de Boyacá. Como sistema natural de abastecimiento de agua, resulta de gran importancia, puesto que el mayor porcentaje de drenaje termina en los ríos Bogotá y el Suarez entre otros.

Pese a los bajos porcentajes de investigación, para la estimación de la lluvia horizontal en los ecosistemas de alta montaña (páramos), se sugiere en la mayoría de los estudios de campo, cuantificar las entradas de este fenómeno e incluirlas en el cálculo del balance hídrico general, teniendo en cuenta que la medición se vuelve compleja ya que los dos tipos de precipitaciones se mezclan (Stadtmüller, 1987, Vonget al, 1991).

En el desarrollo del estudio de campo en el páramo Guerrero, realizado por Tobón, C., & Morales, E. G. G. (2007) se recolectaron 48 muestras de ramas, de cada una de las coberturas del ecosistema: Frailejones, bosque natural y pasto, las cuales corresponden a las especies *Espeletia grandiflora*, *Weinmannia* spp, *Gaiadendron punctatum* y *Holcus lanatus*. Estas muestras se expusieron a eventos de niebla. Al finalizar, se realizó un registro de ganancia o pérdida de peso (se registró el peso inicial por cada muestra) usando el método “Termogravimétrico”

El estudio se llevó a cabo, en el último cuatrimestre del 2005, época del año, donde la presenta la mayor presencia de niebla. En la franja donde se recolectaron las muestras, se realizó la instalación de tres estaciones para la medición de precipitación horizontal y vertical, con el uso de pluviómetros, arpas y cilindros. Las mediciones se llevaron a cabo de manera automática cada 10 minutos y manual una vez al día. La recolección de ramas se realizó un día antes a la exposición, el día del evento se colgaron perpendicularmente al frente al flujo de niebla (dirección predominante del viento) en perchas de madera de 1.8 metros de altura y 2 de longitud, en total se ubicaron 3, una por cada estación, éstas se distribuyeron así, para un total de 12 eventos en total:

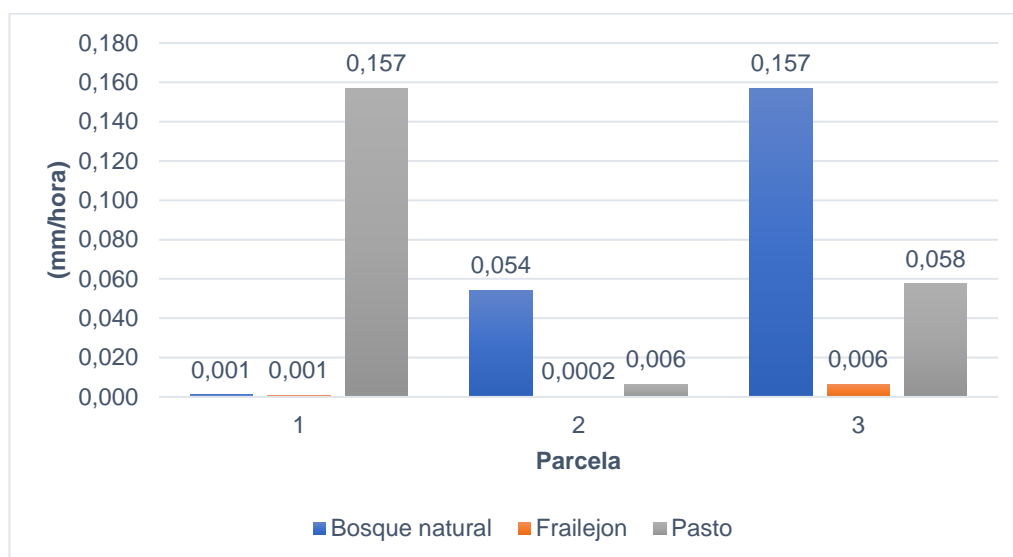
Tabla 2. Muestras recolectadas en el desarrollo de la medición en campo.

Exposición de muestras		
Percha #1	Percha #2	Percha #3
Pasto	Encenillo	frailejón
Encenillo	frailejón	Pasto
frailejón	Pasto	Tagua

Fuente: autor

De acuerdo con los resultados obtenidos, se evaluaron los factores de cobertura y densidad de los eventos de niebla, ya que la revisión de ambos eventos por separado no es significativa, de manera que, en eventos con baja densidad, los promedios de captura por parte de las muestras son relativamente bajos. Por otra parte, durante el desarrollo de las pruebas, se evidencian registros de peso negativos, que pueden deberse a pérdidas de agua de tipo estructural, lo cual se atribuye a la cantidad de agua líquida en la niebla de dichos eventos y a los valores reportados en la saturación de vapor de agua. Esto incidió directamente en la condición reportada, para el caso del bosque natural, la ganancia de niebla se mantiene dependiendo de la intensidad de los eventos y la superficie expuesta, mientras que las muestras recolectadas de pasto presentan las mayores tasas de interceptación hora, y el frailejón presento porcentajes muy por debajo de las otras dos coberturas, de acuerdo con los resultados que se obtuvieron los cuales se exponen en la ilustración No.1:

Ilustración 1. *Intercepción de precipitación horizontal por parcela en mm*



Adaptado de: (Tobón et al, 2006)

Los resultados generales difieren entre los tipos de cobertura analizados, sin embargo, la comparación de medidas directas e indirectas mostró relación entre la cantidad de precipitación horizontal con respecto a las cantidades capturadas por evento. Por su parte, los instrumentos usados para la medición presentaron mejor eficiencia para la medición de la interceptación de precipitación horizontal que las coberturas, de acuerdo con los resultados obtenidos, en los cuales se infirió que las entradas netas de agua en el suelo, durante los eventos fue poco significativo lo cual se relaciona con la baja interceptación de coberturas y la baja densidad presentada en los eventos de niebla.

Los modelos aplicados al desarrollo de la investigación correspondiente al fenómeno de precipitación horizontal se han venido realizado por diferentes autores, los cuales adaptaron modelos previos para la puesta en marcha de sus respectivos estudios de campo, incluyendo sistemas de modelación que estiman una cantidad considerable de variables a tener en cuenta en el marco del estudio del fenómeno, dentro de las cuales fue posible identificar: cartografía, series de datos climáticas e hidrológicas, registros históricos de precipitación, temperatura, velocidad de viento y caudales, Capacidad máxima de almacenamiento, capacidad de infiltración entre otras. Para el caso de Gómez Elorza, Á. (2016), la investigación se basó en el modelo Tetis, el cual se encuentra distribuido por diferentes adaptaciones a múltiples escalas espaciales y temporales, de acuerdo con la información disponible para la simulación. Está compuesto por dos submodelos, uno corresponde a la producción de escorrentía (calcula el agua que llega hasta la red de drenaje), mientras el otro transita la

escorrentía dentro de la red de drenaje. En el modelo los procesos hidrológicos que ocurren en las áreas Inter surcos y en los surcos se tratan de manera conjunta, de modo que no es necesaria la caracterización geomorfológica de estos elementos. El modelo estudiado permite cuantificar diferentes características del ecosistema estudiado dentro de las cuales se integra la precipitación horizontal, cuyos resultados en el análisis llevado a cabo por el autor, se presenta en función de la velocidad del viento y en la densidad de la niebla, así como en los tipos de cobertura vegetal que se presentan en las áreas de estudio, el fenómeno además presenta mayor adaptabilidad a las coberturas de porte alto, las cuales se encuentran principalmente en los bosques, lo anterior de acuerdo a conclusiones obtenidas en estudios anteriores (Hildebrandt, A. y Eltahir, EA 2008).

De acuerdo con Rojas Garzón, L. (2020), la precipitación horizontal no es uniforme, depende de la velocidad del viento, densidad y coberturas, condiciones a partir de las cuales es posible interceptar la niebla, condensarla para permitir el ingreso de la lámina de agua al ecosistema evaluado, dentro de los análisis recolectados por los diferentes autores este fenómeno depende de las estaciones climáticas en las que se encuentre la zona de estudio y los porcentajes de neblina que se pueden presentar, en el caso del departamento de Cundinamarca, se presentan mayores volúmenes en el segundo semestre del año (174 mm – 210 mm), mientras que los primeros meses, presentan valores que varían entre el 19.5 mm y 21.9 mm, lo cual se infiere a partir del modelo TETIS, llevado por Gómez Elorza, Á. (2016), representa bases significativas para el análisis futuro del comportamiento del fenómeno a partir de las variables climáticas que se pueden proyectar bajo los escenarios de cambio climático.

Dentro de la metodología establecida para el desarrollo del presente documento se tuvo como base la búsqueda de artículos y selección de los que contenían información de interés para el desarrollo de la investigación correspondiente al fenómeno, dentro de esta se tuvo en cuenta, lo referente a: *estudios de campo, aplicación en ecosistemas de interés, aportes al descubrimiento de alternativas aplicables al modelo entre otros*, a partir de lo cual fue posible consolidar información de gran relevancia como resultado de lo estudiado en el presente capítulo, la cual se relaciona de manera puntual en la tabla No. 3, a continuación:

Tabla 3. Resumen general capítulo I

Estudios de modelación		Medición en campo		
Modelo de resistencia	Modelo analítico	Modelo atmosfera	Bosques nubosos	Paramos
Especifica la importancia del contenido de agua líquida	Usa ecuaciones analíticas para la identificación de la velocidad de las deposiciones	A partir del a relación de este modelo con el de resistencia en 1977 se establecen las primeras bases para los modelos posteriores de atmosfera/vegetación y los procesos de intercambio	El comportamiento de la precipitación sobre el pasto puede reducirse hasta en un 28% en comparación con un dosel cerrado	En cuanto a los bosques naturales, la ganancia de niebla depende específicamente de la intensidad de los eventos y las superficies vegetales expuestas
Establece la relación entre el tamaño y la distribución de las estomas y la velocidad del viento	Los efectos correspondientes a la interceptación se encuentran ampliamente relacionados con el sitio de estudio y sus condiciones climáticas	Los procesos de deposición se encuentran ampliamente relacionados con la superficie de las hojas, mediante las cuales es posible determinar la humedad relativa y la solubilidad de las partículas, ya que estas últimas dependen del crecimiento de partículas	La ganancia de agua de niebla se encuentra ampliamente relacionada con las alturas de las coberturas vegetales estudiadas	Los estudios aplicados demuestran que la precipitación horizontal se presenta en función de la velocidad del viento y la densidad de la niebla
Relación de parámetros aerodinámicos de plantas	El modelo de Gash establece tres fases para la determinación de los sistemas de captación (Humedad del dosel, saturación y secado)			
Se establecen los rangos de puntos críticos del fenómeno	La relación lineal entre la velocidad lateral del viento y la velocidad de deposición se considera un factor adimensional que puede verse involucrado en la eficiencia de remoción de las gotas de niebla por parte del dosel, de acuerdo con las características de la vegetación estudiada			La precipitación horizontal no es uniforme y depende de variables específicas del a zona de estudio

Fuente: Autor

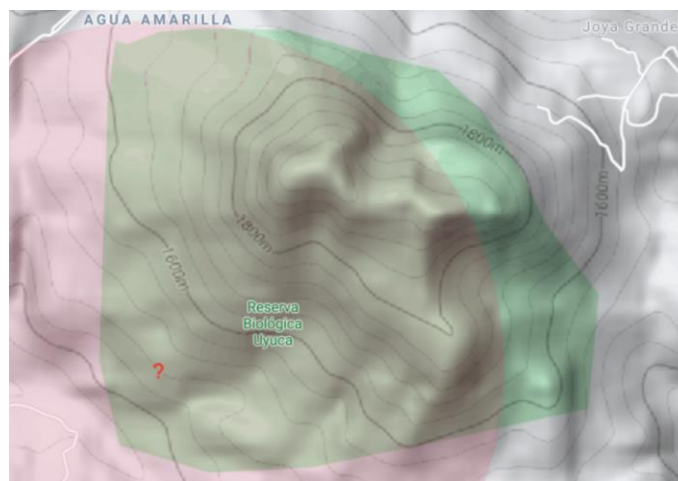
CAPITULO II: Comparación de las metodologías caracterizadas con base en su alcance (limitaciones) y ecosistemas de referencia.

Durante la revisión de estudios referentes a la precipitación horizontal en los diferentes ecosistemas de alta montaña a nivel mundial, se identificaron diferentes metodologías y aplicaciones en campo de los modelos estudiados por diferentes autores desde finales del siglo XX. El presente capítulo, desarrolla un análisis a partir de comparaciones directas de lo anteriormente descrito, para dar un contexto acerca del comportamiento del fenómeno en diferentes escenarios.

Cuantificación de la precipitación horizontal en el bosque latifoliado maduro del Cerro Uyuca

Pérard, S. (2011), desarrollo un estudio en la Reserva Biológica del Cerro Uyuca (Departamento de Francisco Morazán, Honduras), en una zona que se encuentra entre los 1700 y 2000 msnm (metros sobre el nivel del mar). Para el análisis porcentual de la precipitación total (precipitación vertical + precipitación horizontal). En el desarrollo del modelo, se tuvo en cuenta la aplicación del concepto año hidrológico (el cual en Honduras se aplica entre el primero de mayo y el 30 de junio del siguiente año), para la estimación matemática del modelo, el cual tuvo una duración de 5 años, respectivamente. Con el fin de determinar la precipitación dentro del bosque se aplicó el método de los polígonos de Thiessen, a partir del cual se determinó el área de influencia para la instalación de los respectivos pluviómetros (12 en total), para capturar la información de relevancia para la zona de estudio (ver Ilustración No.2)

Ilustración 2. Delimitación área de estudio



Obtenido de: Google maps. área delimitación proyecto de Pérard, S. (2011).

Cuantificación de la precipitación horizontal en el bosque latifoliado maduro del Cerro Uyuca.

Resultados obtenidos

A partir del seguimiento durante los cinco años de estudio, se realizó la cuantificación de la lluvia oculta a través de la diferencia entre la precipitación que cayó en el bosque y la que se depositó en el campo abierto. A partir de los datos de precipitación en el bosque con un promedio de 2360.2 mm y en campo abierto de 951 mm, la precipitación horizontal neta se estimó en 1409.2 mm. Estos datos permitieron relacionar el aporte de la precipitación horizontal sobre la precipitación total en un 148% para la zona del Cerro Uyuca. En este sentido, el bosque presenta una producción continua y sostenible para el mantenimiento del balance hídrico total del ecosistema estudiado, la cual se vería modificada drásticamente si se presentara una modificación en la cobertura boscosa o se diera un cambio en el uso del suelo.

Fog interception by non-vascular epiphytes in tropical montane cloud forest: dependences on gauge type and meteorological conditions

Metodología y enfoque de investigación: el estudio de Villegas, J. C., Tobón, C., & Breshears, D. D. (2008), se llevó a cabo en la cordillera central colombiana, específicamente, en el bosque montañoso tropical (en adelante TMCFs), de la Aguada ubicado en la ciudad de Medellín. El ecosistema presentaba una cobertura total de 100 hectáreas (en el momento del estudio), con altitudes entre 2200 y 2500 msnm, el tipo de vegetación dominante estaba constituido por arboles de hasta 25 metros, dentro de los que se destacan las familias Meliaceae, Moraceae y Proteaceae, siendo las más representativas, junto con las especies de las familias familia Rubiaceae, Asteraceae y Arecaceae.

Para el desarrollo del estudio, se llevaron a cabo dos métodos, uno de laboratorio y uno en campo. Estos métodos se explican a continuación:

Fase de laboratorio: Durante el análisis se realizó la instalación de una cámara antiniebla, donde se simuló la velocidad del viento, LWC y tiempo estimado por evento. En total se realizaron 21 ensayos, teniendo en cuenta que en campo las condiciones como velocidad del viento, humedad relativa, radiación y evapotranspiración varían de manera significativa en condiciones reales.

Fase en campo: la interceptación de niebla se midió a través de dos colectores, uno multidimensional y otro unidimensional, y las muestras de epifitos. Se evaluaron 6 eventos entre noviembre y diciembre de 2005. La ubicación de las muestras se colocó de manera adyacente y perpendicular a la dirección del viento predominante en la

zona, que se situaba en el noroeste. Se instaló un monitor portátil a 2 metros de altura para la verificación de las variables meteorológicas: temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento (las cuales se revisaron cada 5 minutos), para la verificación del comportamiento de las variables en alturas mayores a 15 metros, se instaló un medidor adicional, mediante el cual fue posible estimar que el dosel se mantuvo constante en 10% con respecto al medidor de 2 m, lo que permitió realizar comparaciones entre los calibres y la interceptación presentada en las muestras. La medición de LWC no fue posible en campo, por lo que se realizaron modificaciones a la propuesta de cuantificación de Tobón et al. (2006), así:

$$LWC = \frac{FI}{\mu \times IE \times A}$$

Donde:

FI: interceptación de niebla – u: producto de la velocidad del viento durante los eventos de niebla – IE: interceptación de la eficiencia de los dispositivos de medición y A: área expuesta.

En cuanto a la medición de niebla recolectada por las respectivas muestras, se realizó por la diferencia de peso en estas antes y después de los eventos.

Resultados obtenidos

La determinación de eficiencia por cada tipo de medidor se llevó a cabo a través de una serie de comparaciones generadas matemáticamente, donde fue posible evidenciar que la eficiencia de interceptación se encuentra ampliamente relacionada con los flujos de agua de las nubes, para ambos medidores, mientras que las

mediciones directas de las epifitas presentaron diferencias significativas con respecto al medidor unidireccional. El medidor multidireccional presenta diferencias en el calibre registrado, así como una sobre estimación con respecto a la interceptación de las epifitas por los medidores de niebla, la cual se centra en el caso del multidireccional, se evidenciaron diferencias en el calibre registrado en este, al realizar el análisis de correlación para estimar la eficiencia de interceptación, lo que infiere una sobreestimación con respecto a la interceptación de las epifitas por los medidores de niebla, hasta en un orden de magnitud de acuerdo con los datos reportados por Bruijnzeel et al. (2005).

En cuanto al LWC, la estimación se desprende directamente de la velocidad del viento reportada, para los resultados de estudios en campo, se presentó una oscilación entre 10- 69.5 mg/m³ (LWC) y demostró una relación significativa con respecto a la interceptación cuantificada por el medidor de niebla multidireccional, sin embargo, con respecto a las mediciones en laboratorio, los valores en campo presentan rangos muy por debajo de lo simulado en la cámara de niebla. Mientras que la velocidad del viento se mantuvo bajo el mismo rango en ambos estudios, con la coincidencia que el valor más alto reportado en campo, correspondió al valor más bajo registrado en la cámara de niebla.

Con respecto a la interceptación de las epifitas, el porcentaje de interceptación sugiere, que la captación por parte de estas puede presentar flujos constantes que influyen directamente en el balance hídrico del ecosistema, esto en concordancia con lo encontrado por autores en investigaciones anteriores (Veneklaas et al., 1990; Holscher et al., 2004).

Cuantificación de la interceptación del agua de las nubes en la vegetación del dosel a partir de las mediciones del medidor de niebla

La investigación de Domínguez, C. G., García Vera, M. F., Chaumont, C., Tournebize, J., Villacís, M., d'Ozouville, N., & Violette, S. (2017), se centró en la metodología de Rutter, para la cuantificación de la precipitación horizontal, a través del monitoreo de las variables climáticas. Dicho estudio se llevó a cabo en un bosque endémico de la isla San Cristóbal (Archipiélago de las Galápagos)

La estimación de la evaporación del dosel, precipitación neta en la interceptación de agua en las nubes, se llevó a cabo siguiendo el modelo anteriormente mencionado, el cual se centra, en el balance de agua común, que establece dentro de sus parámetros de entrada, estructura, drenaje y capacidad de interceptación del dosel, dicho modelo considera los cambios en el agua almacenados dentro del compartimiento del dosel, para un área de una parcela así:

$$\Delta C / \Delta t = (1 - p) \times RF - D - E$$

Donde:

$\Delta C / \Delta t$: es la variación en el almacenamiento de agua del dosel

$(1 - p)$: Caida libre coeficiente

RF : tasa de lluvia

D : tasa del drenaje del dosel

E : Tasa de evaporación

En el modelo, estudiado se realizó un seguimiento a las diferentes variables, para determinar la cuantificación del fenómeno estudiado así: instalación de estación meteorológica (área abierta). Para el modelo se toman como datos de entrada la lluvia y la interceptación de niebla, la radiación solar, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, correspondieron a variables para calcular la evaporación potencial.

En la zona de estudio se contaba con dos estaciones climáticas diferentes, una de junio a diciembre, la cual presentaba, bajas temperaturas, baja precipitación y una capa de niebla casi constante que cubre las partes más altas de las islas principales, por otra parte, la temporada calurosa, que se presenta de enero a mayo, en esta es posible evidenciar altas temperaturas, precipitaciones de alta intensidad. Para el estudio se tuvo en cuenta una parcela dentro del bosque de *Miconia* (600 msnm)

Resultados obtenidos

El estudio se llevó a cabo durante los años 2013 -2015, en los cuales se obtuvieron resultados para la precipitación horizontal de 480 mm (en el periodo 2013-2014) y 276 mm (2014-2015), el autor sugiere que la interceptación de niebla medida en los medidores de niebla y la capturada por la vegetación se encuentra ampliamente relacionada, de acuerdo con los resultados obtenidos en la medición en campo, los cuales se estimaron teóricamente, el error relativo que se predijo correspondió al 36%, mientras que el nivel de confianza se posiciono en 68%, dichos resultados permitieron

inferir que la interceptación de niebla por la vegetación, no es posible de estimar completamente a través de medidores.

Modelación hidrológica de cuencas de paramo andino empleando información satelital: caso de estudio cuenca Río Vetas

Se realizó la cuantificación de la precipitación horizontal aplicando parte del modelo atmosférico; este estudio incluyó una fase de campo que se llevó a cabo en la microcuenca el Río Vetas (Departamento de Santander, municipios: Vetas, California y Surata). En este estudio se empleó una modelación matemática determinada por el autor, para la cuantificación del comportamiento de la cobertura vegetal, donde se evaluó la precipitación total de la zona de estudio.

Para el desarrollo del modelo, Preciado, D. E. G. (2017), llevo a cabo 9 módulos, donde se realizaron una serie de cálculos para la estimación del fenómeno, los cuales se relacionan en la tabla 4.

Tabla 4. *Módulos para la estimación de precipitación horizontal*

Modulo	Descripción
1	Interceptación
2	Infiltración
3	Almacenamiento superficial
4	Recarga de acuíferos
5	Redistribución de la escorrentía subsuperficial
6	Escorrentía subsuperficial
7	Evapotranspiración desde la cobertura vegetal
8	Almacenamiento superficial del intervalo
9	Balance hídrico final

Fuente: Autor

Resultados obtenidos

En el estudio del fenómeno, se evaluaron tres modelos diferentes de distribución espacial de la lluvia, para estimar la precipitación total de la zona de estudio. Estos modelos se relacionan en la tabla 5. Junto con sus respectivos resultados.

Tabla 5. Resultados obtenidos en el modelo

Modelo de distribución	PMV (mm/año)	PMH (mm/año)	PH/PH+PV	PH/PV
Vecinos naturales	1142	318	21.8%	27.8%
Distancia inversa ponderados	1211	318	20.8%	26.3%
Polígonos de Thiessen	1095	318	22.5%	29%

Adaptado de: Preciado, D. E. G. (2017). PV: precipitación vertical– PH: precipitación horizontal

En la tabla se evidencia que los valores de precipitación vertical (PH) son muy similares a los reportados en la precipitación horizontal (PV), los rangos de variación se mantienen constantes, y fue posible inferir que la precipitación horizontal se posiciona en el 22% de la precipitación total de la cuenca estudiada. Este valor reportado, representa un aporte significativo al balance hídrico del ecosistema, de acuerdo con la precipitación constante de niebla, que se distribuye a lo largo del año, a comparación de la precipitación vertical que se presenta por estaciones.

Comparación de modelos

Los estudios revisados, se basan en adaptaciones de los modelos principales para la cuantificación de la precipitación horizontal, de acuerdo con la bibliografía estudiada, los cuales corresponden, al modelo analítico, de resistencia y de atmosfera

– suelo – vegetación. Dentro de los modelos evaluados, es posible inferir, que estos pueden aplicarse a ecosistemas de alta montaña colombianos, ya que los datos de entrada de la mayoría corresponden a variables meteorológicas que se pueden calibrar en sitio y que presentan resultados considerables para la cuantificación de la precipitación horizontal.

Aplicación de modelos en Colombia: dentro de los modelos evaluados, es posible inferir, que estos pueden aplicarse a ecosistemas de alta montaña colombianos, ya que los datos de entrada de la mayoría corresponden a variables meteorológicas que se pueden calibrar en sitio y que presentan resultados considerables para la cuantificación de la precipitación horizontal. En Colombia, por ejemplo, los páramos regulan el 80% de los ríos (Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., & Suárez López, T. 2005), lo anterior significa que, al valorizar el fenómeno en los ecosistemas con tendencia a la neblina, se puede incrementar el porcentaje de disponibilidad de agua en el balance hídrico de las zonas de estudio y por ende garantizar la disponibilidad del recurso a largo plazo. De acuerdo con los resultados obtenidos, en el proceso de investigación es posible realizar estudios uniendo variables de distintos modelos para la estimación de la precipitación horizontal y ampliar la información al respecto de los ecosistemas de alta montaña (especialmente los páramos) y su comportamiento en la captación de agua lluvia sobre el dosel, ya que se cuenta con muy pocos estudios al respecto.

El estudio del comportamiento de la precipitación horizontal en los ecosistemas de alta montaña debe incluir las variables meteorológicas aplicables a la zona de estudio, para garantizar la trazabilidad en los resultados, puesto que en la mayoría de

los modelos evaluados es posible inferir que los datos teóricos presentan desviaciones considerablemente altas con respecto a las mediciones en campo.

En la tabla No. 6, se realiza una comparación de los modelos revisados a lo largo del presente documento, análisis mediante el cual, es posible inferir como principales hallazgos, la relevancia que juega la velocidad del viento, para la determinación de la interceptación de dispositivos en las mediciones en campo (Villegas, J. C., Tobón, C., & Breshears, D. D. 2008). Estudios evaluados, determinan la importancia de la calibración de los parámetros iniciales para la cuantificación de precipitación horizontal, en los cuales se deben tomar como referencia las condiciones meteorológicas y climáticas de la zona de estudio y basarse en las mismas para llevar a cabo los procedimientos previos a la captura de datos. Por su parte el modelo de Lovett presenta sobrestimaciones del 25% con respecto a la velocidad del viento, lo cual implica que el LWC puede generar una sobreestimación mayor a un factor de 2 en el cálculo de deposición de agua de niebla.

Tabla 6. Comparación de modelos revisados.

Modelo	Alcance	Análisis del comportamiento del modelo	Limitaciones	Tipo de ecosistema	Nombre y año del estudio realizado
Modelo de resistencia	La deposición de niebla se estima a través de la suma de dos parámetros independientes, interceptación de gotas y procesos de precipitación gravitacional. Se ha encontrado que para gotas de diámetro inferior a 10 μm el 90% de la deposición del agua de niebla se debe a la impactación y solo el 10% se debe a la sedimentación. Sin embargo, para gotas de 30 μm es bastante más importante la sedimentación. Según Lovett el método de balance hídrico en la cobertura es el más simple para medir.	De acuerdo con comparación con observaciones el modelo de Lovett tiende a sobreestimar la deposición de agua de niebla, se encontró que puede estar relacionado con la incertidumbre en los datos de entrada de la distribución de tamaños de las gotas, el área foliar y la dirección del viento. Una sobreestimación del 25% de la velocidad del viento, el LWC puede generar una sobreestimación mayor a un factor de 2 en el cálculo de deposición de agua de niebla. Esto también se atribuye a que el modelo no incluye el proceso de transporte vertical con difusión turbulenta dentro del dosel del bosque. El modelo SOLVEG dio mejor resultados comparados con los datos observados.	El modelo sobreestima la deposición de agua de niebla, lo cual se relaciona directamente con la incertidumbre de los datos de entrada correspondiente a la distribución del tamaño de las gotas, área foliar y dirección del viento	Bosques nubosos, específicamente en el trébol ladino en 1964	Fog interception by non-vascular epiphytes in tropical montane cloud forest: dependences on gauge type and meteorological conditions

Modelo analítico

Se modela con ecuaciones analíticas de velocidad de deposición, el flujo de deposición de niebla se representa como el producto de la velocidad de deposición por el LWC (Liquid Water Content) (kg/m³).

Para la cuantificación del fenómeno en condiciones controladas, se realizó la instalación de los medidores siguiendo un parámetro de velocidad del viento constante, lo cual puede variar durante los eventos de niebla reales, lo cual impacta significativamente el resultado de eficiencia de interceptación de dichos dispositivos, ya que este parámetro incide de manera general en los resultados de los estudios de campo aplicados a la precipitación horizontal.

El modelo analítico, se desarrolló al mismo tiempo que el modelo de Lovett, sin embargo, este se emplea para la estimación de deposición seca, por lo tanto, las aplicaciones de este modelo en la deposición de precipitación horizontal son limitadas. En el desarrollo del modelo fue posible establecer que las tasas de evaporación del dosel se ven afectadas por el porcentaje de humedad de la zona de estudio, evidenciando además que el dosel no se comporta igual bajo condiciones secas que con porcentajes de humedad más elevados, por otra parte, se establece que el proceso de evaporación se ve afectado por la saturación, tasa de evaporación y tiempos de secado, el modelo se considera de aplicación más económica que el correspondiente a Lovett.

Bosques y especie *Pinis pinea*: donde fue posible evidenciar el bajo porcentaje de interceptación de precipitación horizontal que presenta la especie.

Ecohydrology of a seasonal cloud forest in Dhofar: 2. Role of clouds, soil type, and rooting depth in tree-grass competition. Water Resources Research, 43(11) - 2007.

Using a horizontal precipitation model to investigate the role of turbulent cloud deposition in survival of a seasonal cloud forest in Dhofar. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 113(G4) - 2008

Modelo sofisticado de interacción atmosfera - suelo vegetación

El modelo se evalúa a través de dos enfoques, el primero corresponde entonces a microphysical FOG model, (modelo FOG microfísico) el cual permite realizar la simulación de la radiación solar y la niebla en la vegetación alta a través de la modelación 1D. SOLVEG corresponde a un modelo multidimensional de multicapa donde se contabilizan cuatro módulos correspondientes a la medición de la atmosfera cerca de la superficie.

Los autores infieren que los resultados de los modelos evaluados dependen de la calibración de los parámetros del dosel, los cuales se encuentran limitados por los valores iniciales, los cuales pueden variar en el desarrollo del proceso en campo, para este caso, la calibración de la evaporación en campo presenta desviaciones considerables, por lo que se sugiere realizar revisiones en campo sin presencia de niebla, para la estandarización del modelo de seguimiento, lo cual permitiría establecer tasas constantes de evaporación sin fluctuaciones. El modelo SOLVEG es más sensible ante el perfil de velocidad del viento y la eficiencia de recolección de las gotas que a la distribución de tamaños de las gotas. La heterogeneidad horizontal de la estructura del bosque tiene una alta influencia en el flujo deposición de agua de niebla.

El modelo no evalúa el total de las condiciones meteorológicas, ya que se centra en las que se consideran constantes en la zona de estudio.

Paramos: toma de muestras de coberturas, mediante las cuales se simularon los respectivos porcentajes correspondientes a la recolección de niebla y se estimaron capacidades teóricas de las diferentes especies de la zona

Fog water deposition modeling for terrestrial ecosystems: A review of developments and measurements - 2014

Fuente: Autor

Conclusiones

De acuerdo con la pregunta de investigación *¿cuáles son los modelos y metodologías empleados a nivel mundial que permiten estimar la lluvia oculta en el balance hídrico de los ecosistemas?*, es posible inferir que en los últimos cuarenta años se han evaluado tres modelos principalmente: resistencia, analítico y de atmosfera, los cuales han permitido evidenciar relación entre los porcentajes de captación y las velocidades del viento, siendo estos dos factores directamente proporcionales, como resultado de la deposición por impacto y los procesos de evaporación que inciden directamente en la interceptación, lo cual se ve ampliamente relacionado con las condiciones meteorológicas de las zonas evaluadas en el desarrollo de los ejercicios de investigación. A través análisis reportado por los autores de los artículos revisados, fue posible inferir que en bosques de estratos altos (superiores a 30m), la ganancia de agua de niebla, sobre la precipitación presento porcentajes de 13% del total cuantificado, lo anterior indica que la extensión y altura de los ecosistemas, generan afectaciones directas sobre el fenómeno, sea de forma positiva como lo presentado en los ecosistemas con tendencia a vegetaciones de tamaños superiores y negativa cuando se presentan tamaños de menor impacto, que dificultan la colección de precipitación horizontal en el ecosistema.

Las metodologías empleadas para la lluvia oculta en los ecosistemas de alta montaña nos permiten inferir una serie de datos para tener en cuenta para la

estimación precisa del fenómeno, la cual dependerá de la calibración en campo y la captura de datos, así como las condiciones climáticas de la zona de estudio. Los modelos y metodologías empleadas a nivel mundial presentan bases considerables que permiten determinar el papel fundamental de la lluvia oculta para el balance hídrico en los ecosistemas de alta montaña donde se han considerado, sin embargo, las limitantes principales en el desempeño de los ejercicios en campo, se dan específicamente en la cuantificación de la velocidad del viento, la evaporación y las variables meteorológicas, las cuales representan datos de entrada relevantes para los resultados esperados. Los trabajos de Lovett demostraron que el flujo de deposición de niebla cerca de un borde o brecha forestal puede aumentar en un factor de 5. Se ha encontrado que para gotas de diámetro inferior a $10 \mu m$ el 90% de la deposición del agua de niebla se debe a la impactación y solo el 10% se debe a la sedimentación. Sin embargo, para gotas de $30 \mu m$ es bastante más importante la sedimentación, ya que según Lovett el método de balance hídrico en la cobertura es el más simple para medir.

Referencias

- Arellano, R. P., Pérez, M. M., & Cañas, J. R. (2016). Comparación de modelos de interceptación de agua de lluvia en individuos aislados de *Pinus pinea* y *Cistus ladanifer*. *Ingeniería del agua*, 20(3), 153-168. Recuperado de:
<http://www.ingenieriadelaagua.com/2004/JIA/Jia2015/b/b014.pdf>
- Beléndez, A. (1992). Acústica, fluidos y termodinámica. *Fundamentos Físicos de la Ingeniería*. Recuperado de:
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/11348/1/Dinamica%20de%20fluidos%20y%20fluidos%20reales.pdf>
- Beswick, KM, Hargreaves, KJ, Gallagher, MW, Choularton, TW y Fowler, D. (1991). Mediciones de tamaño resuelto de la velocidad de deposición de gotitas de nubes en el dosel de un bosque utilizando una técnica de correlación de remolinos. *Revista trimestral de la Royal Meteorological Society*, 117 (499), 623-645. Recuperado de:
<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49711749910>
- Bott, A., Sievers, U. y Zdunkowski, W. (1990). Un modelo de niebla de radiación con un tratamiento detallado de la interacción entre la transferencia radiactiva y la microfísica de niebla. *Revista de Ciencias Atmosféricas*, 47 (18), 2153-2166. Recuperado de:
https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/47/18/15200469_1990_047_2153_arfmwa_2_0_co_2.xml
- Bruijnzeel, L. A., Eugster, W., & Burkard, R. (2005). Encyclopedia of hydrological sciences. Recuperado de:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470848944.hsa041>
- Díaz-Granados Ortiz, M. A., Navarrete González, J. D., & Suárez López, T. (2005). Páramos: Sensitive Hydrosystems. *Revista de Ingeniería*, (22), 64-75. Recuperado de:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012149932005000200008&script=sci_arttext&lng=pt
- Domínguez, CG, García Vera, MF, Chaumont, C., Tournebize, J., Villacís, M., d'Ozouville, N., y Violette, S. (2017). Cuantificación de la interceptación del agua de las nubes en la vegetación del dosel a partir de las mediciones del medidor de niebla. *Procesos hidrológicos*, 31 (18), 3191-3205. Recuperado de:
<https://sci-hub.se/https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.11228>

- Egan, P., & Price, M. (2014). Las montañas como torres de agua del mundo: Protegiendo el agua y los servicios ecosistémicos de montaña ante el cambio climático. Recuperado de:
<https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2014-050-Es.pdf>
- Gómez, S., Salazar, C., & Longo, M. (2016). Diversidad y biomasa de macroinvertebrados asociados a cuatro tipos de sustratos en la laguna La Virginia, páramo Sumapaz, Colombia. *Biota Colombiana*, 17. Recuperado de:
<http://revistas.humboldt.org.co/index.php/biota/article/view/415>
- Gómez Elorza, Á. (2016-08-05.). Herramientas de modelación y monitoreo para la hidrología de Alta Montaña Colombiana - Cuenca de la Quebrada Calostros – PNN Chingaza. Recuperado de:
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/57348>
- Hildebrandt, A., & Eltahir, E. A. (2007). Ecohydrology of a seasonal cloud forest in Dhofar: 2. Role of clouds, soil type, and rooting depth in tree-grass competition. *Water Resources Research*, 43(11). Recuperado de:
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2006WR005262>
- Hildebrandt, A., & Eltahir, E. A. (2008). Using a horizontal precipitation model to investigate the role of turbulent cloud deposition in survival of a seasonal cloud forest in Dhofar. *Journal of Geophysical Research: Bio geosciences*, 113(G4). Recuperado de:
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2008JG000727>
- Hölscher, D., Köhler, L., van Dijk, Al y Bruijnzeel, LS (2004). La importancia de las epífitas para la intercepción total de lluvia por un bosque lluvioso montano tropical en Costa Rica. *Revista de hidrología* , 292 (1-4), 308-322. Recuperado de: <https://sci-hub.se/https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.6844>
- Hofstede, R. (1997). La importancia hídrica del páramo y aspectos de su manejo. *EcoPar*, agosto. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/48035476.pdf>
- Instituto Alexander Von Humboldt,(2012).El gran libro de los páramos. Recuperado de:<http://www.humboldt.org.co/en/boletines-y-comunicados/item/427-el-gran-libro-de-los-paramos-de-colombia>
- Instituto nacional de tecnología agropecuaria (INTA), Centro nacional de investigaciones agropecuarias (CNIA) (2012). Procesamiento de datos medidos con sistema Eddy Covarianza. Recuperado de: http://sepa.inta.gob.ar/gei/carbono/MANUAL_EVEDDY_V15.pdf
- Katata, G., Nagai, H., Ueda, H., Agam, N. y Berliner, PR (2007). Desarrollo de un modelo de superficie terrestre que incluya procesos de evaporación y adsorción en el suelo para el intercambio tierra-aire en regiones áridas. *Revista de hidrometeorológica* , 8 (6), 1307-1324. Recuperado de:
https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/8/6/2007jhm829_1.xml

Katata, G., Nagai, H., Wrzesinsky, T., Klemm, O., Eugster, W. y Burkard, R. (2008). Desarrollo de un modelo de superficie terrestre que incluya la deposición de agua de las nubes sobre la vegetación. *Revista de meteorología aplicada y climatología* , 47 (8), 2129-2146. Recuperado de:

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/47/8/2008jamc1758.1.xml>

Katata, G. (2014). Fog water deposition modeling for terrestrial ecosystems: A review of developments and measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(13), 8137-8159. Recuperado de: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/2014JD021669>

Klemm, O., Wrzesinsky, T. y Scheer, C. (2005). Flujo de agua de niebla en la parte superior de un dosel: medición directa versus modelo unidimensional. *Ambiente atmosférico* , 39 (29), 5375-5386. Recuperado de:

<https://scihub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231005004681>

Klemm, O., Chang, SC y Hsia, YJ (2006). Flujos de energía en un bosque nuboso de montaña subtropical. *Manejo y ecología forestal* , 224 (1-2), 5-10. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112705007334>

Lovett, GM (1984), Tasas y mecanismos de deposición del agua de las nubes en un bosque de abetos balsámicos subalpinos , *Atmos. Reinar.* , 18 , 361 – 371. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0004698184901100?via%3Dihub>

Lovett, GM (1986). Tasas y mecanismos de deposición del agua de las nubes en un bosque de abetos balsámicos subalpinos. *Ambiente atmosférico (1967)* , 18 (2), 361-371. Recuperado de: <https://scihub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0004698184901100>

Méndez Monroy, J. F. (2013). Metodología para la medición de variables hidrometeorológicas que faciliten la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia en el contexto colombiano. *Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola*. Recuperado de: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/12065/JavierfernandoMendezmonroy.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Miller, AG y Morris, M. (1988). *Plantas de Dhofar, la región sur de Omán: usos tradicionales, económicos y medicinales* . Preparado y publicado por la Oficina del Asesor para la Conservación del Medio Ambiente, Diwan de la Corte Real, Sultanato de Omán.

Monteith, JL (1965). Evaporación y medio ambiente. En Simposios de la sociedad de biología experimental (Vol. 19, pp. 205-234). Cambridge University Press (CUP) Cambridge. Recuperado de:

<https://repository.rothamsted.ac.uk/item/8v5v7/evaporation-and-environment>

- Nagai, H. (2005). Incorporación de procesos de intercambio de CO₂ en un modelo atmósfera-suelo-vegetación multicapa. *Revista de meteorología aplicada y climatología*, 44 (10), 1574-1592. Recuperado de:
https://journals.ametsoc.org/view/journals/apme/44/10/jam2293.1.xml?tab_body=pdf
- Mueller, SF, Joslin Jr, JD y Wolfe, MH (1991). Estimación de la deposición de agua de las nubes en los bosques subalpinos de abetos y abetos — II. Prueba de modelos. *Ambiente atmosférico. Parte A. Temas generales*, 25 (5-6), 1105-1122. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/096016869190151V>
- Preciado, D. E. G. (2017). *Modelación hidrológica de cuencas de páramo andino empleando información satelital: caso de estudio cuenca Río Vetás* (Doctoral dissertation, Uniandes). Recuperado de:
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/11458/u470758.pdf?sequence=1>
- Pérard, S. (2011). *Cuantificación de la precipitación horizontal en el bosque latifoliado maduro del Cerro Uyuca* (Bachelor's thesis, Zamorano: Escuela Agrícola Panamericana, 2012.). Recuperado de: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/439/1/IAD-2011-T020.pdf>
- Rincón, L. N. G. (2015). Los páramos en Colombia, un ecosistema en riesgo. *Revista Ingeniare*, (19), 127-136. Recuperado de:
<http://ojsinvestigacion.unilibrebaq.edu.co/ojsinvestigacion/index.php/ingeniare/article/view/704/638>
- Ritter, A., Regalado, C. M., & Aschan, G. (2008). Fog water collection in a subtropical elfin laurel forest of the Garajonay National Park (Canary Islands): a combined approach using artificial fog catchers and a physically based impaction model. *Journal of Hydrometeorology*, 9(5), 920-935. Recuperado de:
https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/9/5/2008jhm992_1.xml
- Regalado, CM y Ritter, A. (2017). El comportamiento de tres medidores de niebla en condiciones de campo y su relación con variables meteorológicas en un sitio expuesto en Tenerife (Islas Canarias). *Meteorología agrícola y forestal*, 233, 80-91. Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016819231630435X>
- Rojas Garzón, L. (2020-12-08.). Herramientas para la modelación hidrológica de series a resolución sub-diaria bajo escenarios de cambio climático en páramos andinos, Cuenca de la Quebrada Calostros, Parque Natural Nacional Chingaza, Colombia. Bogotá - Ingeniería - Maestría en Ingeniería - Recursos Hidráulicos. Recuperado de:
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/78689>

Salinas, C., Fuentes, L. S., & Hernández, L. (2020). Caracterización de los lepidópteros fitófagos asociados a la herbívora de frailejones en la microcuenca de la quebrada Calostros del Parque Nacional Natural Chingaza Recuperado de:

<https://expeditiorepositorio.utadeo.edu.co/bitstream/handle/20.500.12010/9441/1416.pdf?sequence=1&isAllowed=yLos>

Santiago, H. L. (2007). *Medición y análisis de la intercepción de lluvia en un bosque de encino: Aplicación a la microcuenca La Barreta* (Doctoral dissertation, Tesis de grado de Maestría en Líneas terminal recursos hídricos y ambiental, Universidad Autónoma de Querétaro, Fac. de Ingeniería, Santiago de Querétaro, Querétaro). Recuperado de:

<http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/intercepcion-lluvia-bosque-encino-microcuenca/intercepcion-lluvia-bosque-encino-microcuenca.pdf>

Slinn, WGN (1982). Predicciones para la deposición de partículas en las copas de los árboles. *Ambiente atmosférico (1967)*, 16 (7), 1785-1794. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0004698182902712>

Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994). A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11), 1313-1322. Recuperado de:

[https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/15200450\(1994\)033%3C1313:APSFCE%3E2.0.CO;2](https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/15200450(1994)033%3C1313:APSFCE%3E2.0.CO;2)

Shuttleworth, W. J. (1977). The exchange of wind-driven fog and mist between vegetation and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorology*, 12(4), 463-489. Recuperado de:

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00123193>

Serrato, F. B., & Díaz, A. R. (2006). Medida de la evapotranspiración real en coberturas vegetales semiáridas (Cuenca de Mula, Murcia), según las variaciones de humedad del suelo medidas mediante el procedimiento (TDR). *Papeles de Geografía*, (43), 5-17. Recuperado de:

<https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/2911/1/1medidas.pdf>

Stadtmüller, T. (1987). Cloud forests in the humid tropics. United Nations University. *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica*.

Tobón, C., Köhler, L., Bruijnzeel, L. A., Burkard, R., Frumau, K. F. A., & Schmid, S. (2006, August). Dynamics of epiphytic vegetation in a lower montane cloud forest: Fog interception, storage, and evaporation. In *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* (Vol. 27). Recuperado de:

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=N6FkwMnSX8EC&oi=fnd&pg=PA261&dq=Tob%C3%B3n,+C.%CD%BE+L.+K%C3%B6hler%CD%BE+Bruijnzeel,+L.A.%CD%BE+Reto+>

Burkard, K. F. A., Frumau, S., & Schmid, S. (2006). Dynamics of epiphytic vegetation in a lower montane cloud forest: Fog interception, storage and evaporation. Proceedings of the Second international symposium on Fog interception, storage and evaporation. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169401003924>

Tobón, C., & Morales, E. G. G. (2007). Capacidad de interceptación de la niebla por la vegetación de los páramos andinos. *Avances en recursos Hidráulicos*, (15). Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/14929/1/9324-15891-1-PB.pdf>

Van Dijk, AIJM y Bruijnzeel, LA (2001). Modelización de la interceptación de lluvias por vegetación de densidad variable mediante un modelo analítico adaptado. Parte 1. Descripción del modelo. *Revista de hidrología*, 247 (3-4), 230-238. Recuperado de:

<https://scihub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169401003924>

Vanegas Villegas, T., & Estrada Walker, J. A. (2015). *Valoración económica de los páramos: Parque Nacional Natural Los Nevados* (Doctoral dissertation, Universidad EIA). Recuperado de: https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/1946/1/VanegasTomas_2015_ValoracionEconomicaParamos.pdf

Veneklaas, E. J., Zagt, R. J., Van Leerdam, A., Van Ek, R., Broekhoven, A. J., & Van Genderen, M. (1990). Hydrological properties of the epiphyte mass of a montane tropical rain forest, Colombia. *Vegetatio*, 89(2), 183-192. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00032170>

Villegas, J. C., Tobón, C., & Breshears, D. D. (2008). Fog interception by non-vascular epiphytes in tropical montane cloud forests: Dependencies on gauge type and meteorological conditions. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(14), 2484-2492. Recuperado de: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.6844>

Wrzesinsky, T. y Klemm, O. (2000). Química de la niebla de verano en un sitio montañoso en Europa central. *Ambiente atmosférico*, 34 (9), 1487-1496. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231099003489>