

Medición de la condensación de lluvia horizontal con tres estructuras: el caso del municipio de Zipacón (Cundinamarca, Colombia)¹

Myriam Carolina Cárdenas Vargas², César Augusto García Valbuena³

Resumen

Introducción. La niebla es un recurso que se ha venido aprovechando para la obtención de agua a nivel mundial, pero ciertamente no se ha implementado una estructura que represente una mayor captura de este recurso.

Objetivo. Medir la eficiencia de captación de lluvia horizontal representada en l/m²-día de dos estructuras con formas naturales (árbol simulando la copa de un pino y un domo geodésico de frecuencia 4v); frente al modelo convencional (pantalla). **Materiales y métodos.** Se realizó el diseño y la construcción de los atrapanieblas acompañados por un pluviómetro, se efectuó la toma de mediciones diarias del agua recolectada por cada estructura durante 10 meses, posteriormente se restó, de la precipitación total, la directa para hallar únicamente el agua que proviene de la niebla. Con los datos obtenidos se realizó un análisis exploratorio y gráfico, además se aplicaron pruebas estadísticas confirmatorias mediante el uso del *software* R para

determinar cuál estructura presenta mayor eficiencia. **Resultados.** El domo geodésico 4v y el árbol recolectaron en promedio 1,94 l/m²-día y 1,64 l/m²-día respectivamente y la estructura convencional capturo 0,97 l/m²-día. **Conclusiones.** Las estructuras que presentan diseños basados en formas naturales poseen una mayor eficiencia de captación de la lluvia horizontal.

Palabras clave: captación de agua, ciclo hidrológico, precipitaciones, vapor de agua.

Measurement of horizontal rain condensation with three structures: the case of the municipality of Zipacón (Cundinamarca-Colombia)

Abstract

Introduction. Fog is a resource that has been used to obtain water worldwide, but

¹ Artículo original, derivado de la investigación titulada: Medición de la condensación de lluvia horizontal con tres estructuras en la finca La Libertad del municipio de Zipacón – Cundinamarca, Colombia. Realizado entre marzo del 2018 y enero del 2019. Financiado por los autores.

² Estudiante de último semestre del programa de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. email: carolinacardenasv18@gmail.com ORCID: 0000-0002-4659-628X

³ Ingeniero Forestal, Esp. en Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos, profesor asistente completo, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. email: cesargarcia77@hotmail.com ORCID: 0000-0002-5899-4955

Autor para correspondencia: Myriam Carolina Cárdenas Vargas, email: carolinacardenasv18@gmail.com Recibido: 12/07/2019 Aceptado: 22/08/2019

a structure that represents a greater capture of this resource has not been implemented. **Objective.** To measure the efficiency of horizontal rain collection represented in l / m²-day of two structures with natural forms (a tree simulating the crown of a pine and a geodesic dome of frequency 4v); compared to the conventional model (screen). **Materials and methods.** The design and construction of the trappers was carried out accompanied by a rain gauge, where daily measurements were taken of the water collected by each structure for 10 months, then the direct rainfall was subtracted from the total rainfall to find only the water that comes from the fog. With the data obtained, an exploratory and graphic analysis was performed. Confirmatory statistical tests were also applied through the use of the R software to determine which structure has the highest efficiency. **Results.** The 4v geodesic dome and the tree collected on average 1.94 l / m²-day and 1.64 l / m²-day respectively and the conventional structure captured 0.97 l / m²-day. **Conclusions.** The structures with designs based on natural forms have a greater efficiency of collecting horizontal rain.

Keywords: water collection, hydrological cycle, precipitation, water vapor.

Medição da condensação de chuva horizontal com três estruturas: o caso do município de Zipacón (Cundinamarca-Colômbia)

Resumo

Introdução. A neblina é um recurso que tem se aproveitado para a obter água no mundo, mas com certeza não tem se implementado uma estrutura que represente uma maior captura deste recurso. **Objetivo.** Medir a eficiência de captação de chuva horizontal representada em l/m²-dia de duas estruturas com formas naturais (Árvore simulando a copa de um pinheiro e uma cúpula geodésica de frequência 4v); frente o modelo convencional (tela). **Materiais emétodos.** Realizou-se o desenho e construção dos caçadores de neblinas acompanhados por um pluviômetro, efetuou-se a toma de medições diárias da água coletada por cada estrutura durante 10 meses, posteriormente restou-se, da precipitação total, a direta para encontrar somente a água que provem da neblina. Com os dados obtidos realizou-se uma análise exploratório e gráfico, além aplicaram-se provas estatísticas que conferem através do uso do *software* R para determinar qual estrutura apresenta maior eficiência. **Resultados.** A cúpula geodésica 4v e a árvore coletaram em média 1,94 l/m²-dia e 1,64 l/m²-dia respectivamente e a estrutura convencional capturou 0,97 l/m²-dia. **Conclusões.** As estruturas que apresentam desenhos baseados em formas naturais possuem uma maior eficiência de captação da chuva horizontal.

Palavras-chave: captação de água, ciclo hidrológico, precipitações, vapor de água.

Introducción

El territorio colombiano ha sido considerado por muchos años como una potencia hídrica, pues contamos con “seis nevados, 44 % de los páramos de Sudamérica, cinco vertientes hidrográficas, 30 grandes ríos, 1277 lagunas y más de 1000 ciénagas” (WWF Colombia, 2018), que abastecen de agua al territorio y a sus comunidades.

Pero este recurso ha sido afectado drásticamente en los últimos años por diversas causas y actividades de los sectores agropecuarios, mineros, industriales y domésticos. Cuencas como las de los ríos Magdalena, Cauca, Suárez, Catatumbo, Sumapaz entre otras importantes del país, han tenido una disminución entre el 26 % y 40 % de su caudal (García, Piñeros Botero, Bernal Quiroga & Ardila Robles, 2012).

Así mismo, los niveles de los lagos y lagunas del país y el abastecimiento de agua para las comunidades se ven claramente afectados. Por lo tanto, es necesaria la búsqueda y creación de nuevas tecnologías que permitan suplir la escasez de agua a partir de la explotación de recursos hídricos alternativos y no convencionales (Banco Mundial, 2017).

En este sentido “la atmósfera posee un potencial hídrico de 12,90 km³, lo que representa el 0,001 % del agua total y 0,04 % del agua dulce del planeta” (como se citó en Qadir, Jiménez, Farnum, Dodson & Smakhtin, 2018), reserva que bajo condiciones óptimas puede generar la formación de niebla.

Por consiguiente la niebla se convierte en una opción potencial para la obtención de agua en lugares donde el acceso al recurso hídrico es limitado (Baquero Palacios, Delvasto Reyes & Mejía Hoy, 2018), incluso su explotación

es considerada como una técnica pasiva y de bajo costo (como se citó en Schunk et al., 2018).

Pero ciertamente este capital hídrico que se halla presente en diversos municipios del país es una reserva de agua poco aprovechada y estudiada, debido a que constituye una forma de precipitación indirecta, la cual no es tomada en cuenta en la mayoría de cálculos de balance hídrico (Moratiel, Martínez-Cob, Tarquis & Snyder, 2016)

Sin embargo, a nivel mundial, se han venido desarrollando diversos proyectos que constituyen la construcción y formación de estructuras llamadas comúnmente como atrapanieblas para la captura de agua niebla.

Los atrapanieblas o trampas de niebla son instrumentos que permiten “cosechar la destilación natural que ocurre como parte del ciclo del agua, en el que la evaporación se traslada en forma de nubosidad y esta puede ser condensada y acumulada” (Arellano Escudero, 2017).

Como se mencionó anteriormente, su principio de funcionamiento se basa en la captación del agua que se encuentra en suspensión, para ello se coloca como obstáculo una pantalla constituida por malla *raschel*, la cual permite que la niebla, al chocar, se condense para formas gotas de agua (Harb, Salem, Makled & Abd El-Hay, 2016).

Las gotas de agua crecen por coalescencia hasta que posean un tamaño considerable que les permita precipitar por medio de la gravedad hasta una canaleta o sistema de recolección localizado debajo de la malla (Montecinos, Carvajal, Cereceda & Concha, 2018).

El primer atrapanieblas fue desarrollado en Chile en el año 1958 cuando el físico Carlos Espinosa Arancibia propuso una estructura poliédrica formada por tubos que se encontraban revestidos por malla *raschel* (Fuentes Ejzman, 2016). Desde entonces se han realizado modificaciones y adecuaciones estructurales dando fruto a modelos como el cilíndrico y las trampas bidimensionales.

Esta última estructura data del año 1987 cuando se creó en el pueblo de Chungungo (Chile) una pantalla mediante el uso de postes y malla *raschel* con el fin de abastecer con agua potable a los habitantes (Correggiari, Castelli, Bresci & Salbitano, 2017). Desde entonces, esta trampa ha sido catalogada como la más relevante y se ha replicado en diversas partes del territorio chileno y en varios lugares como Ecuador, Perú, México, Israel, Etiopía, España, Islas Canarias entre otros, que buscan una alternativa para garantizar el recurso hídrico en su región (Pascual Aguilar, Payano, Medrano Pérez & Naranjo, 2011).

Por otra parte, y haciendo énfasis en el territorio colombiano, esta tecnología ha sido poco estudiada y puesta en práctica, debido a que supone un desafío para su construcción y desarrollo, pues debe obedecer a las características propias de cada zona de estudio. No obstante, en lugares como Valle del Cauca, la zona rural de Bogotá, San Antonio-Chicaque, Boyacá entre otros se evidencia la construcción de atrapanieblas bidimensionales (García, Vaca & García, 2013) y específicamente el estudiante Alexander Umaña ha propuesto una estructura tridimensional conocida con el nombre de nebulón (Umaña, 2018).

A pesar de los avances e investigaciones sobre el tema, aún no existe un modelo defini-

do que represente la mayor eficiencia en la captación de niebla y que sea unificado a nivel global.

Por tal motivo, el presente estudio busca definir, a partir del desarrollo de tres estructuras diseñadas para la captura y aprovechamiento de la lluvia horizontal, cuál de ellas ofrece una mayor eficiencia de captación de acuerdo a su diseño y partiendo de la hipótesis de que las formas naturales realizan una captura más óptima de agua niebla representada en l/m²día.

Es pertinente aclarar que la primera estructura fue diseñada a partir del atrapanieblas bidimensional, el cual es pionero a nivel global, y las otras dos replican formas naturales y son de propiedad intelectual y exclusiva, además el estudio obedece a unas condiciones propias de la zona donde se localiza el experimento.

Materiales y Métodos

Localización del estudio

La investigación fue desarrollada en la finca La Libertad, ubicada en la vereda Laguna Verde, al sur del Municipio de Zipacón, Cundinamarca, perteneciente a la provincia de la Sabana de Occidente con una altitud de 1710 msnm (Gutiérrez Sarmiento & Cardona, 2014).

Este municipio cuenta con una temperatura promedio de 13 °C, una precipitación anual de 1507,78 mm y un promedio mensual multianual de la humedad relativa de 76 % (Cortés Molina & Romero Rodríguez, 2016).

Figura 1. Localización de la finca La Libertad y las estructuras atrapanieblas



Fuente: elaborado por los autores, 2019.

En la tabla 1 se evidencian las coordenadas del terreno despejado de aproximadamente 200 m² donde se ejecutó la construcción de las estructuras. Este se encuentra ubicado al noroeste de la finca La Libertad, hace parte de la cuenca alta del río Apulo y se halla bajo la inspección del Ocaso.

Tabla 1. Coordenadas de localización de los atrapanieblas

Número	Latitud	Altitud
1	4° 43' 18,12"	74° 24' 58,12"
2	4° 43' 18,23"	74° 24' 57,93"
3	4° 43' 17,48"	74° 24' 57,56"
4	4° 43' 17,39"	74° 24' 57,78"

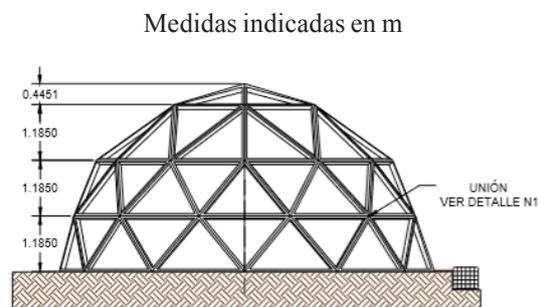
Fuente: elaborado por los autores, 2019.

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados en la investigación, se desarrolló una metodología que consta de tres etapas.

Elaboración de los diseños estructurales de los atrapanieblas

En la figura 2 se muestra el diseño del domo geodésico frecuencia 4v (en adelante DG4V). Este cuenta con un área de 49,44 m² en la base, 250 segmentos de bambú, 91 uniones que difieren en los ángulos, y una altura y radio de cuatro metros.

Figura 2. Vista frontal domo geodésico 4v

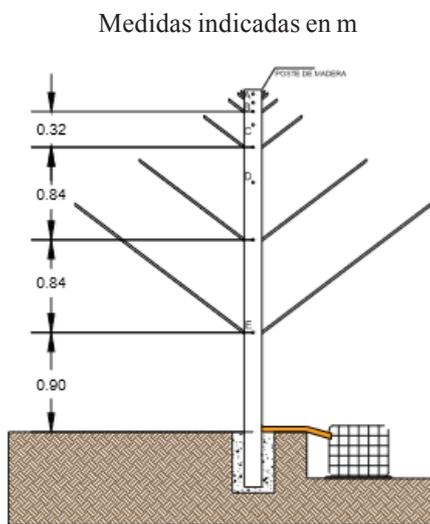


Fuente: elaborado por los autores, 2019.

El diseño de la trampa de árbol (en adelante AT) se construyó simulando la copa de un pino colombiano (*Retrophyllum rospigliosii*), para ello se desarrolló un estudio de la fisionomía de esta especie mediante la observación y medida de la altura total, el diámetro del fuste, la cobertura, altura comercial y la distribución de las ramas y hojas en la copa de árboles situados en diferentes partes de la ciudad (Universidad Distrital-facultad del medio ambiente; Parque central Bavaria y el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis).

Partiendo de lo anterior y como se evidencia en la figura 3. Este atrapanieblas presenta una altura total de 3,6 m, de los cuales 2,20 m fueron destinados para las ramificaciones del árbol donde se postrará la polisombra, 0,6 m son la base y los 0,9 m restantes constituyen el tronco. Estas medidas, fueron distribuidas siguiendo la serie de Fibonacci tomando como unidad 0,03 m para su realización.

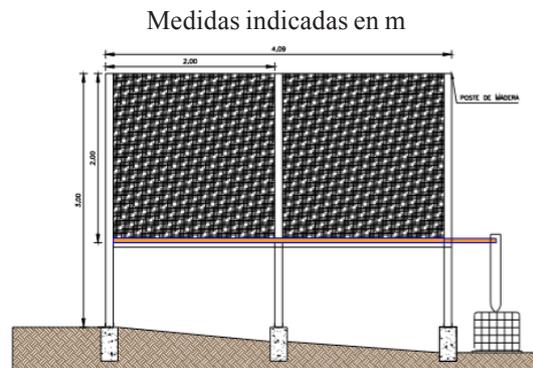
Figura 3. Vista frontal del atrapanieblas con forma de árbol



Fuente: elaborado por los autores, 2019.

Finalmente, la trampa convencional (en adelante TC) es una adaptación de las trampas planas bidimensionales. Esta consta de tres postes de madera que están separados entre sí a una distancia de 2 m y presentan una altura de 3 m, de los cuales 2 m están destinados para la colocación de la polisombra. Esta malla captura el agua proveniente de la niebla y por gravedad la deposita en la canaleta.

Figura 4. Vista frontal del atrapanieblas convencional



Fuente: elaborado por los autores, 2019.

Las canaletas para todas las estructuras provienen del empalme de cortes por mitad de tubos de PVC de 4"; y su unión con los tanques de almacenamiento está dada por el uso de botellas recicladas de 3 L o accesorios de tubos de 4".

Recolección de datos

Durante un periodo de 10 meses, cada día a las 8:00 am se tomó la lectura de la lámina de agua en cada una de las canecas de aforo dispuestas para el almacenamiento en las estructuras, como también en el pluviómetro. Estos datos fueron registrados en formatos diseñados para este fin.

Manejo de datos y análisis mediante el *software* R

La unidad de medida para el análisis de datos fue la de *litros por metro cuadrado por día* (L/m^2 -día), dado que las tres estructuras, por su diseño, no tienen las mismas dimensiones, ni tampoco las mismas formas.

Los datos recolectados diariamente fueron transformados a milímetros de precipitación (agua niebla, más precipitación directa). Para ello se tuvo en cuenta el área del círculo que posee cada caneca de almacenamiento. Posterior a este proceso, se calculó la equivalencia de 1 cm de altura a mm de precipitación.

Después de ello se despreció la precipitación directa marcada por el pluviómetro para hallar el volumen de agua proveniente de la condensación de la niebla mediante la siguiente ecuación:

$$V_t = V_r - P \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde:

V_t = volumen total de agua proveniente de la niebla

V_r = volumen de agua recolectado en los tanques de almacenamiento

P = precipitación directa

La investigación posee un enfoque cuantitativo con un alcance descriptivo-correlacional, por consiguiente, con los datos obtenidos se efectuó un análisis exploratorio y gráfico, además se aplicaron pruebas estadísticas confirmatorias mediante el uso del *software* estadístico R, allí se proyectaron únicamente las series de datos de los días donde se presentó la captura de agua niebla para determinar

cuál fue la estructura con mayor eficiencia en la captación de lluvia horizontal.

En este sentido, el análisis exploratorio consistió en la determinación y comparación de las medidas de tendencia central y algunos datos descriptivos de cada atrapanieblas para mirar el comportamiento de los datos y obtener los valores máximos y mínimos.

El análisis gráfico consistió en la realización de *boxplot*, histogramas, diagramas de torta y un diagrama de tendencia, para observar en qué periodo se capturó más agua, cuál estructura realizó la captura más alta, qué promedios de captura mensual presentaron las estructuras y, así mismo, complementar de una manera gráfica el comportamiento de los datos.

Después de estos análisis, se ejecutaron las pruebas conocidas con el nombre de *shapiro-wilk* y *smirnov-Kolmogorov* con el fin de determinar si las variables objeto de estudio presentan una distribución normal teórica, partiendo de ello se hace uso de pruebas no paramétricas como el coeficiente de correlación de Spearman, el test *Uman-Whitney* y la prueba de Kruskal-Wallis, para determinar la tendencia de los datos, la relación entre estos a través del tiempo y su estabilidad.

Resultados

La condensación de la niebla es el principio de funcionamiento de las estructuras propuestas, por consiguiente, se obtuvieron, como primer resultado, las tres estructuras que posibilitaron la toma de datos. Estas se evidencian en la figura 5.

Figura 5. Estructuras captadoras de niebla



Fuente: elaborado por los autores, 2019.

La primera de ellas es una trampa de doble propósito con forma de domo geodésico de frecuencia 4v. Esta cuenta con un área total de 98,63 m² de malla *raschel* para la captación de agua niebla y su interior está predestinado para un invernadero.

La segunda estructura obtenida es AT. Esta cuenta con un área total de 15,93 m² destinados para la captación de agua. La malla *raschel* se soporta sobre las ramas que van de 0,1 m hasta 1,92 m las cuales obedecen a la serie de Fibonacci formando un espiral logarítmico.

La tercera estructura presenta una forma bidimensional que cuenta con un área efectiva para la captación de agua niebla de 8 m². Además de un segmento que conecta la canaleta con la caneca de almacenamiento realizado mediante el uso de materiales reciclables.

Tras la ejecución del tratamiento brindado a los 307 datos cuantitativos, donde se hizo uso de la ecuación (1) para determinar únicamente el agua captada a partir de la niebla, los datos descriptivos y la realización de las

medidas de tendencia central, se pueden observar en la tabla 02, que durante el periodo de estudio la trampa que obtuvo el valor máximo de captura de agua representada en l/m²-día fue DG4V con un valor de 3,65 seguido por la TC con un valor de 2,57 y, en último lugar, se encuentra AT con un valor de 2,2.

Del mismo modo se evidencia que el valor mínimo obtenido por las tres estructuras es de 0 l/m²-día o valores cercanos a cero, esto se debe a que durante aproximadamente 144 días las estructuras no realizaron la captura de agua, por consiguiente las trampas que simulan las formas naturales y TC presentaron porcentajes de nula captación de 46,91 % y 47,57 % respectivamente.

Por otra parte se reporta que de los 307 días de estudio DG4V y AT captaron agua durante 163 días lo que equivale al 53,09 %, así mismo TC capturó durante 161 días un equivalente a 52,44 %, por lo tanto se afirma que hubo presencia de niebla durante 162 días aproximadamente

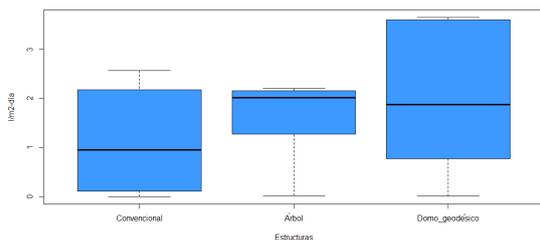
Tabla 2. Medidas de tendencia central

Trampa de niebla	Convencional	Árbol	Domo geodésico 4v
Días de registro	307	307	307
Meses de registro	marzo-enero	marzo-enero	marzo-enero
Días de captación	161	163	163
Min	0	0,02	0,01
Q1	0,11	1,27	0,77
Mediana	0,95	2,01	1,87
Media	1,11	1,64	2,12
Q3	2,17	2,15	3,6
Max	2,57	2,2	3,65

Trampa de niebla	Convencional	Árbol	Domo geodésico 4v
Desviación estándar	0,95	0,66	1,41
Varianza	0,91	0,44	1,99
Días de lluvia	163	163	163

Posteriormente se realizó un *boxplot* de los datos en los que se presentó captura de agua. Se puede evidenciar en la figura 6 que DG4V muestra los valores más dispersos y el 50 % de los datos poseen valores mayores o igual a 2 l/m²-día, de igual forma AT expresa valores menos dispersos y el 50 % de estos están representados entre 1 y 2 l/m²-día, mientras que la captura en TC fue menor debido a que el 50 % de sus datos son mayores o iguales a 1 l/m²-día.

Figura 6. *Boxplot* de la captura de agua niebla para cada estructura durante los momentos de niebla



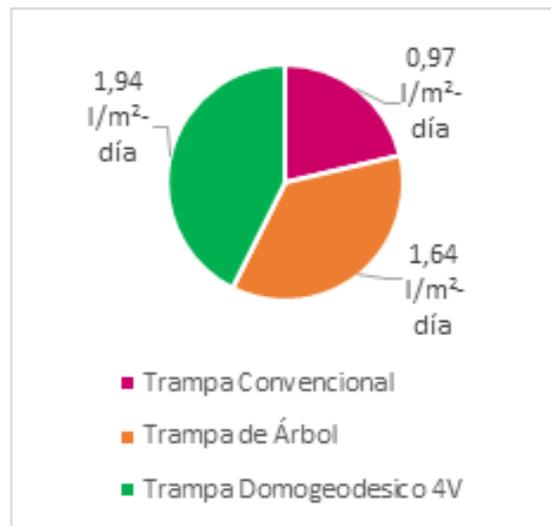
Fuente: elaborado por los autores, 2019.

También se observa que la estructura que posee los valores más altos de captación por día es DG4V, debido a que representa datos superiores a 3 l/m²-día, del mismo modo se evidencia que los datos de TC se hallan más cercanos a cero y por ende presentó menor captación de agua niebla durante el periodo de estudio, es decir los tres atrapanieblas durante los 307 días presentaron valores de captación por m² cercanos o iguales a cero,

pero en TC estos valores son más repetitivos y se relacionan aproximadamente con el 25 % de los datos de captación.

Un análisis gráfico más a fondo de los datos nos permite observar en la figura 7 que la estructura DG4V presentó el mayor promedio total de captación durante los diez meses de estudio con un valor de 1,94 l/m²-día, dato que representa el doble de TC y 0,3 l/m²-día de más con respecto a AT.

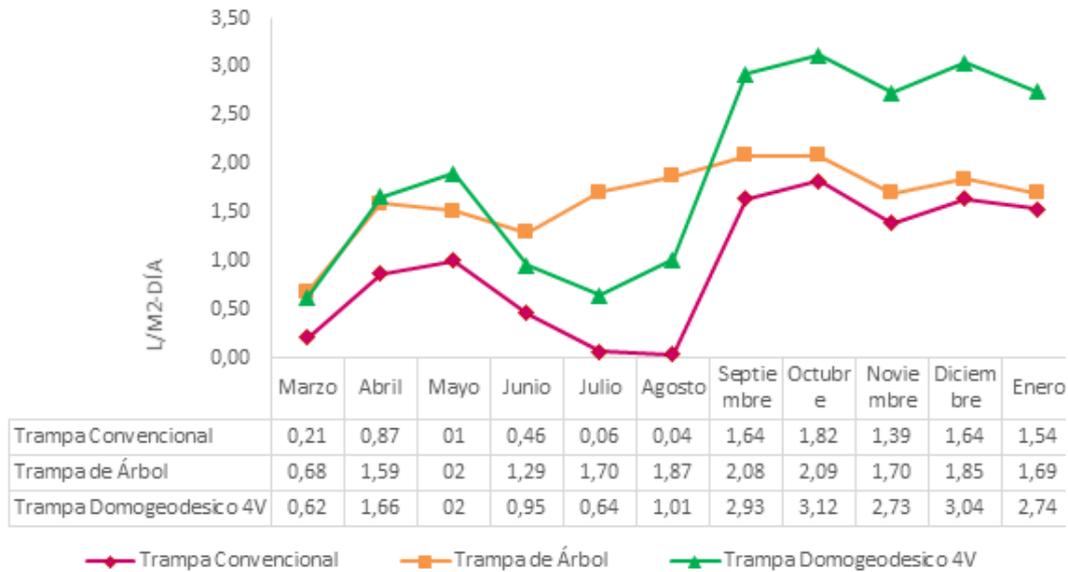
Figura 7. Promedio de captación de agua niebla (durante los días de captación)



Fuente: elaborado por los autores, 2019.

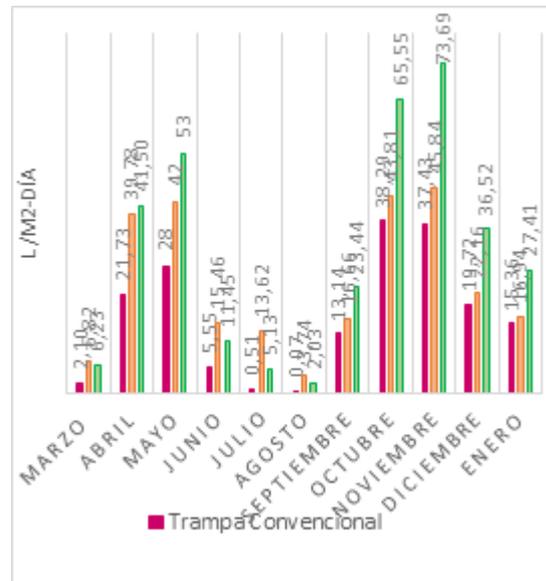
Con respecto a los promedios mensuales de captación en conjunto con los promedios de la precipitación directa, la figura 8 muestra que la estructura que tuvo la mayor productividad media para la captura de agua fue DG4V durante el periodo de estudio, no obstante, se exceptúan los meses de marzo, junio, julio y agosto en los que AT presentó valores de captación de agua en l/m²-día de 0,06, 0,34, 1,06 y 0,86 respectivamente superiores a DG4V.

Figura 8. Promedios de captura de agua niebla de las tres estructuras y de la precipitación directa



Fuente: elaborado por los autores, 2019.

Por otra parte en la figura 9 se representa el total mensual de agua niebla captada por cada una de las estructuras. A partir de estos datos se puede inferir que las dos estructuras con formas naturales presentaron mayor captación de agua durante todo el periodo de estudio, fueron octubre y noviembre los meses donde se dio la mayor captura de agua para las tres estructuras; pero ciertamente la estructura que realizó la mayor captación de lluvia horizontal durante los diez meses, fue DG4V con un total de 345,9 l/m², lo cual representa un 23 % más de captación referente a AT y un 47,4 % más respecto a TC.



Fuente: elaborado por los autores, 2019.

La tabla 3 indica los resultados de las pruebas que se ejecutaron para analizar el comportamiento que presentan las variables objeto de estudio en la investigación. Después de su desarrollo se puede evidenciar que los

datos obtenidos para los tres atrapanieblas no presentan una distribución normal, que es corroborado con los valores del *p-value*, los cuales son menores de 0,05 y por consiguiente se desarrolla el análisis de la estabilidad

de la varianza y de la media mediante el uso de pruebas no paramétricas

Tabla 3. Pruebas estadísticas confirmatorias (*R Project*)

Test	Atrapanieblas		
	Convencional	Árbol	Domo Geodésico 4v
Pruebas de normalidad (valores de <i>p-value</i>)			
Shapiro wilk	1,77E-11	1,27E-11	7,96E-11
Sminov Kolmogorov	3,77E-05	8,37E-08	8,06E-09
Prueba de tendencia (valores de <i>p-value</i>)			
coeficiente de correlación de spearman	0,0004386	< 2,2E-16	2,25E-09
Prueba para la estabilidad en la media (valores <i>p-value</i>)			
Test U man-Whitney	Convencional-Árbol	Convencional-Domo geodésico 4v	Domo Geodésico 4v-Árbol
	0,04549	6,70E-08	0,02978
Prueba para el análisis de medianas			
Kruskal-Wallis	p-value < 2,2E-16		

Fuente: elaborado por los autores, 2019.

Discusión

La presente investigación está fundamentada en el principio del balance hídrico, partiendo del papel fundamental que constituye la niebla como entrada de agua. La niebla representa un gran valor durante las épocas de baja precipitación (fenómeno del Niño), pues durante estos periodos de sequía las nubes se mantienen y los bancos de nieblas que se hallan en los bosques de niebla del país constituyen la presencia de agua que puede ser captada en porcentajes que van desde el 11 % de la precipitación hasta el 22 % de

acuerdo a la altitud (Armenteras Pascual, Cadena Vargas & Moreno Sánchez, 2007).

A partir de este referente la investigación tiene como alcance comparar tres estructuras para la captura de agua niebla durante 307 días, mediante el estudio de su diseño y la cuantificación de la captura de agua proveniente de la niebla, para determinar de esta manera cuál estructura posee una mayor eficiencia.

Los diseños planteados para las trampas de niebla y los datos de captación corroboran que estos sistemas son una tecnología eficiente y

práctica para la obtención de agua a partir de fuentes alternativas en el municipio de Zipacón, debido a que esta área geográfica presenta dos características fundamentales que permitieron el correcto funcionamiento de las estructuras captadoras. La primera de ellas es su humedad relativa que puede llegar a tener un valor mínimo mensual de 68 % y un máximo absoluto de 83 %, este último favoreciendo la formación de niebla (Pérez Díaz et al., 2017) y en segundo lugar esta su pertenencia a la cuenca alta del río Apulo, localización que permite una variabilidad climática “caracterizada por la confluencia e intercambio permanente del clima frío de la sabana de Bogotá y de los páramos de la cordillera, con el clima cálido que asciende de las tierras bajas y del valle del Magdalena” (Martínez Celis, Palau Rivas & Pardo Durana, 2011), lo que ocasiona la formación de extensos bancos de niebla y, por consiguiente, la obtención de datos durante la investigación.

Haciendo énfasis en la captura de agua se puede afirmar que los días en los cuales se presentaron momentos de niebla también se presentaron precipitaciones, en otras palabras la niebla y las precipitaciones tuvieron una correlación durante el 53,09 % de los días de estudio, resultado similar al obtenido por (Bittencourt, Barros, Eller, Müller & Oliveira, 2019) ellos confirman que las horas mensuales de nieblas y los días de precipitación se correlacionan entre sí, pues la aparición de la niebla se asocia con la aparición de lluvias y nubes, este fenómeno se da gracias al proceso de inversión térmica.

No obstante, se presentaron 144 días en los que los datos evidencian una nula captación de agua por parte de las estructuras con valores iguales a 0 l/m²- día, estos valores rat-

ifican que no hubo momentos de niebla tal como lo expresa Cereceda (2014), la niebla presenta una variabilidad diaria en su disponibilidad teniendo así periodos con nula disponibilidad en los que no se presenta la cosecha de agua. Sin embargo y tal como lo expresan Montecinos et al. (2018, p. 4) se pueden evidenciar eventos de niebla sin salida de agua, ya que la malla requiere una saturación para comenzar el proceso de drenaje, en este sentido se explica que las trampas con formas naturales lograron capturar agua y realizar el proceso de drenaje dos días más que la convencional, pues la malla pudo llegar al punto de saturación por las caras y áreas efectivas para la captación (tabla 1), por consiguiente, su porcentaje de nula captación es 0,66 % menor que la convencional.

Por otra parte, en la figura 8 se denota que durante el periodo de estudio hubo una tendencia de mayor captación durante los meses de abril, mayo, septiembre, octubre y diciembre para las tres estructuras y un decrecimiento durante los meses de marzo, junio, julio y noviembre, esto se debe a que Colombia, y a su vez el municipio de Zipacón, “se encuentran en la zona ecuatorial húmeda, por lo tanto la zona de convergencia intertropical cruza dos veces al año sobre el país generando un régimen climático bimodal con dos periodos ciclónicos de lluvias, alternados con dos periodos secos anticiclónicos” (Calle & Guillot, 2001), En este orden de ideas el periodo de lluvias en el cual también se manifiesta una mayor cantidad de niebla se da en los meses de abril, mayo, octubre y noviembre, en consecuencia el periodo de verano se da en los meses de diciembre, enero y agosto, cuando los niveles de captación disminuyeron, además se evidencia que TC presentó los promedios de captación más bajos durante todos los meses de estudio.

En este sentido las estructuras que se realizaron a partir de formas naturales presentan una mayor eficiencia de captación, pues DGM4V capturó 164,17 l/m² y TA capturó 85,15 l/m² más que TC, esto se debe a que sus diseños tridimensionales permitieron mejorar la captura y la resistencia, puesto que ofrecen diversos frentes para la colección de agua, tal como lo indican Julián Poveda & Juan Sanabria para este tipo de diseños “*al poseer caras en distintas direcciones permite la omisión de la variante de la orientación del viento aumentando la eficiencia de la captación y mejorando la autorresistencia de la estructura frente a los fuertes vientos*” (2017).

Así mismo, los resultados representados en la figura 9 muestran que la estructura bidimensional (TC) en el periodo de estudio presenta los valores de captación más bajos durante cada uno de los meses en comparación con las dos estructuras tridimensionales (DG4V y AT), esto se asemeja a los valores obtenidos por Tobón & Gil (2007), donde el método de captación artificial con estructura bidimensional (arpa) obtuvo valores de captación más bajos con respecto a la estructura tridimensional (cilindro) durante el periodo de estudio en el páramo Guerrero.

Por consiguiente el área de captación efectiva representada por la malla *raschel* y la implementación de más caras en las estructuras que simulan formas naturales juegan un papel importante dentro de los diseños de la tecnología, pues como lo manifiestan Regalado & Ritter (2019) la eficiencia y la cantidad de litros de agua recolectados se ven potencialmente beneficiados tras el aumento de las caras. De igual forma DG4V logró capturar un total de 345,9 l/m², lo cual representa un 23 % más de captación referente a AT y un 47,4 % más respecto a TC,

datos que confirman lo expresado por Rivera & Holmes (2014). La optimización a partir de diseños tridimensionales logra mejorar la eficiencia aerodinámica y la eficiencia de deposición, aumentado de esta manera el agua almacenada.

Por otra parte, y haciendo énfasis en las pruebas no paramétricas representadas en la tabla 3, se evidencia que la correlación de Spearman muestra que ninguna de las tres estructuras posee una tendencia en la recolección de agua niebla a través de los días, por lo tanto estos datos aún no pueden ser tomados como guía para la generación de posibles predicciones de captura en una serie cronológica futura.

La prueba de Mann-Withney indica que los atrapanieblas poseen diferencias significativas en la eficiencia de captación de agua niebla que se da entre TC y AT, al igual que en TC y DG4V y entre AT y DG4V, sin embargo entre TC y AT se presenta una menor diferencia entre la eficiencia de captación. Además, las estructuras tuvieron diferencias significativas con respecto a la estabilidad de la media, por ello se concluye que los datos de los subconjuntos de atrapanieblas formados no proceden de poblaciones continuas idénticas, a causa de ello sus propiedades estadísticas difieren entre sí (Castro & Carvajal Escobar, 2010).

La prueba de Kruskal-Wallis nos permite generar una comparación de las medianas de los datos en los tres casos analizados. De la realización de esta se obtuvo un *p-value* menor de 0,05, por ello se rechaza la hipótesis nula de que los tres métodos de captación de agua niebla poseen la misma efectividad en la captura de agua niebla, sino que, por el contrario, presentan una diferencia significativa, en este caso DG4V presenta una

captura de agua más alta, seguido de AT y en último lugar se halla TC.

Conclusiones

Las estructuras que poseen diseños a partir de formas naturales presentaron una mayor eficiencia de captación respecto a la trampa convencional, sin embargo, de las tres estructuras el domo geodésico 4v posee una eficiencia de captación más relevante.

Los diseños tridimensionales para la captura de agua niebla posibilitan una mayor eficiencia de recolección y a su vez proporcionan una resistencia más óptima a las estructuras.

Con los diseños estructurales planteados para las trampas de niebla se logró comprobar que estos sistemas de captación constituyen una tecnología práctica, eficiente y sostenible que permite la captación de agua, obedeciendo a condiciones particulares del municipio de Zipacón.

Para realizar predicciones futuras de datos en series climatológicas o hidrológicas es necesario contar con sucesiones de datos de varios años.

Conflicto de interés

Los autores del presente manuscrito en su totalidad declaran que este fue revisado a cabalidad y no presentan ningún conflicto de interés.

Agradecimientos

A nuestra alma mater la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, a la Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales,

al proyecto curricular de Ingeniería Ambiental y a todos aquellos que permitieron y contribuyeron con el desarrollo del proceso investigativo.

Referencias

- Arellano Escudero, N. (2017). El desierto de Atacama como laboratorio: experimentos y tecnologías de la energía solar. *Revista Mundo*, 22(44), 85.
- Armenteras Pascual, D., Cadena Vargas, C. & Moreno Sánchez, R. (2007). Evaluación del estado de los bosques de niebla y de la meta 2010 en Colombia. En I. D. Humboldt (ed.), *Evaluación del estado de los bosques de niebla y de la meta 2010 en Colombia*. Bogotá: El Instituto.
- Banco Mundial. (2017). Más allá de la escasez: seguridad del agua en Oriente Medio y África del Norte. Washington: Banco Mundial.
- Baquero Palacios, S. V., Delvasto Reyes, A. L. & Mejía Hoy, S. M. (2018). Evaluación de la calidad de agua niebla recolectada en Choachí, Colombia. *Revista Inventum*, 13(25), 53-60. Doi: doi: 10.26620/uniminuto.inventum.13.25.2018. 53-60
- Bittencourt, P. R., Barros, F., Eller, C. B., Müller, C. S. & Oliveira, R. S. (2019). El régimen de niebla en un bosque nublado montano tropical en Brasil y sus efectos sobre el agua, la luz y el microclima. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 359-369.
- Calle, G. M. & Guillot, G. (2001). Ecología y efecto ambiental de embalses. Bogotá: Ideam.

- Castro, L. M. & Carvajal Escobar, Y. (2010). Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9), 15-25.
- Cereceda, P. L. (2014). Agua de Niebla, Nuevas tecnologías para el desarrollo sustentable en zonas áridas y semiáridas. Coquimbo: La Discusión.
- Correggiari M., Castelli G., Bresci E., Salbitano F. (2017) Colección de niebla y enfoque participativo para la gestión del agua y el desarrollo local: reflexiones prácticas de estudios de caso en las tierras secas de Atacama. En: M. Ouessar, D. Gabriels, A. Tsunekawa y S. Evett S. (eds.), *Seguridad del agua y la tierra en tierras secas*. Springer, Cham. Tunes
- Cortés Molina, N. & Romero Rodríguez, N. (2016). Diseño de las tecnologías ambientalmente apropiadas para la finca La Libertad, en la vereda Laguna Verde del municipio de Zipacón. (Tesis de grado). Universidad distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Fuentes Ejzman, J. (2016). En Pampa Dos Cruces instalan los primeros atrapanieblas de la región de Arica y Parinacota. *Nuestra Tierra*, 1(303), 12-14.
- García, C., Vaca, M. & García, J. (2013). Factibilidad técnica y de salud de la recolección de aguas nieblas: Estudio de caso. *Revista de Salud Pública*, 15(3), 366-373.
- García, M. C., Piñeros Botero, A., Bernal Quiroga, F. A. & Ardila Robles, E. (2012). Variabilidad climática, cambio climático y el recurso hídrico en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 32, 60-64. Gutiérrez Sarmiento, M. C. & Cardona, C. M. (2014). Caracterización ecológica de las lombrices (*Pontoscolex corethrurus*) como bioindicadoras de suelos compactados en condiciones de alta humedad del suelo con diferentes coberturas vegetales (Zipacón, Cundinamarca). *Revista Científica*, 2(19), 41-53.
- Harb, O., Salem, M., Makled, K. & Abd El-Hay, G. (2016). Fog water harvesting providing stability for small Bedwe communities lives in North cost of Egypt. *Annals of Agricultural Science*, 61(1), 105-110.
- Qadir, M., C. Jiménez, G., L. Farnum, R., L. Dodson, L. & Smakhtin, V. (2018). Fog Water Collection: Challenges beyond Technology. *MDPI AG, Basel, Switzerland*, 10(4), 372.
- Regalado, C. & Ritter, A. (2019). On the estimation of potential fog water collection from meteorological variables. *Agricultural and Forest Meteorology*. Recuperado de www.elsevier.com/locate/agrforme
- Martínez Celis, D., Palau Rivas, F. & Pardo Durana, A. (2011). Plan integral de manejo del itinerario cultural de la cuenca alta del río Apulo (Zipacón), territorio de tránsitos y pausas. Recuperado de http://openarchive.icomos.org/1342/1/Itinerario_cultural_zipacon.pdf
- Montecinos, S., Carvajal, D., Cereceda, P. & Concha, M. (2018). Collection efficiency of fog events. *Atmospheric Research*, 209, 163-169. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.004>
- Moratiel, R., Martínez-Cob, A., Tarquis, A. & Snyder, R. (2016). Soil water balance correction due to light rainfall, dew and fog in

- Ebro river basin (Spain). *Agricultural Water Management*, 170, 61-67. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.013>
- Pascual Aguilar, J. A., Payano, R., Medrano Pérez, O. R. & Naranjo, M. F. (2011). Tecnología para la recolección de agua niebla. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/257199788_TECNOLOGIA_PARA_LA_RECOLECCION_DE_AGUA_DE_NIEBLA
- Pérez Díaz, J., Ivanov, O., Peshev, Z., Álvarez Valenzuela, M., Valiente Blanco, I., Evgenieva, T., . . . Vaseashta, A. (2017). Fogs: Physical Basis, Characteristic Properties, and Impacts on the Environment and Human Health. *Water*, 9(10). doi:<https://doi.org/10.3390/w9100807>
- Poveda Lancheros, J. & Sanabria, J. (2017). Evaluación de la eficiencia de cinco materiales de malla para el sistema de atrapanieblas en el Municipio de Siachoque, Departamento de Boyacá. Tunja, Colombia. Recuperado de <https://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/13661/1/74339247.pdf>
- Rivera A. & Holmes L. R. (2014). Diseño y eficiencia de atrapanieblas. En P. Cereceda, P. Hernández, J. Leiva & J. Rivera (eds.), *Agua de niebla* (pp. 49-65). Coquimbo: Impresora La Discusión.
- Schunk, C., Trautwein, P., Hruschka, H., Frost, E., Dodson, L., Derhem, A., . . . Menzel, A. (2018). Testing Water Yield, Efficiency of Different Meshes and Water Quality with a Novel Fog Collector for High Wind Speeds. *Aerosol and Air Quality Research* (18), 240-253.
- Tobón, C., & Gil Morale, E. (2007). Capacidad de intercepción de la niebla por la vegetación de los páramos Andinos. *Avances en Recursos Hidráulicos* (15), 35-46.
- Umaña, A. (2018). Nebulón, la alternativa para convertir la niebla en agua potable. (W. Ramírez, entrevistador) Noticiero 90 minutos.