

TESIS DE MAESTRÍA

Atrapamiento de niebla para el abastecimiento de agua potable en zonas de alta montaña: análisis experimental de la inclinación y la geometría del sistema recolector

Valeria Rodríguez Herrera

Asesor: Juan G. Saldarriaga Valderrama



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
BOGOTÁ D.C.
2025**



A mi papá, por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso y por acompañarme en los desplazamientos a Subachoque, fundamentales para el desarrollo del trabajo de campo.

A mi mamá y a mi hermana, por su constante motivación, comprensión y respaldo durante todas las etapas de esta investigación.

A Nico, por su compañía, su apoyo permanente y por motivarme siempre a dar lo mejor de mí, incluso en los momentos más exigentes del proceso.



TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo General	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
2.	Marco teórico.....	4
2.1	Interacción gota-fibra	5
2.2	Antecedentes.....	6
2.3	Localización óptima para la instalación de colectores de niebla en Colombia	9
2.4	Marco normativo y de financiamiento para la captación de niebla en Colombia.....	10
3.	Metodología	12
3.1	Parámetros adimensionales del sistema	14
3.1.1	Número de Bond	16
3.1.2	Número de Weber.....	16
3.1.3	Número de Ohnesorge	17
3.1.4	Análisis del sistema.....	17
3.2	Caracterización de las fibras	18
3.2.1	Fibra negra - malla de polietileno al 80 % de sombra	20
3.2.2	Fibra verde - malla de polietileno al 90 % de sombra	26
3.3	Estructura de captación	30
3.3.1	Estudio de inclinaciones	30
3.3.2	Estudio de geometrías.....	34
3.4	Casos estudiados en laboratorio	35
3.4.1	Estudio de inclinaciones	35
3.4.2	Estudio de geometrías.....	37
3.5	Procedimiento experimental	38
4.	Resultados y análisis.....	40



4.1	Resultados y análisis – Inclinaciones	40
4.1.1	Resultados Caso I.....	41
4.1.2	Análisis de los Resultados – Caso I	43
4.1.3	Resultados Caso II.....	44
4.1.4	Análisis de los Resultados – Caso II	46
4.1.5	Resultados Caso III.....	47
4.1.6	Análisis de los Resultados – Caso III	49
4.2	Resultados y análisis – Geometrías.....	50
4.2.1	Resultados malla negra al 80% de sombra.....	50
4.2.2	Análisis de los Resultados – malla negra	52
4.2.3	Resultados malla verde al 90% de sombra.....	53
4.2.4	Análisis de los Resultados – malla verde	55
4.3	Análisis pruebas de laboratorio en conjunto.....	56
5.	Caso de estudio Subachoque	59
5.1	Contexto y caracterización de la zona de estudio	59
5.2	Diseño e instalación del captador en campo.....	62
5.3	Protocolo de monitoreo y medición en campo	68
5.4	Resultados y observaciones en campo	70
5.4.1	Resultados casos planteados inicialmente.....	70
5.4.2	Resultados casos definitivos.....	72
5.5	Discusión del caso de estudio	75
6.	Conclusiones.....	78
7.	Recomendaciones	80
7.1	Recomendaciones para el diseño experimental en el laboratorio.....	80
7.2	Recomendaciones para el diseño de captadores de niebla	80
7.3	Recomendaciones sobre el uso de mallas	81
7.4	Recomendaciones para implementación en campo	81
7.5	Recomendaciones para futuras líneas de investigación.....	81
8.	Referencias.....	82



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Drenaje inducido por gravedad de gotas recolectadas desde una superficie inclinada con (a) mayor longitud de deslizamiento y (b) menor longitud de deslizamiento. Adaptado de Ghosh, R., Ray, T. K., & Ganguly, R. (2015). Cooling tower fog harvesting in p	7
Figura 2. Sistema de nebulización que reproduce la neblina con paneles inclinados.....	12
Figura 3. Sistema de nebulización que reproduce la neblina con captadores de diferentes geometrías.	13
Figura 4. Recolección de gotas de neblina con guardapolvos y plato de Petri.....	14
Figura 5. Obtención de imágenes de gotas en microscopio.....	15
Figura 6. Ejemplo de imágenes capturadas por Zen Blue para gotas de agua.	15
Figura 7. Análisis de rugosidad en ImageJ.	20
Figura 8. Malla de polietileno al 80% de sombra.	21
Figura 9. Ejemplo de metodología de medición de diámetros de la fibra negra.	22
Figura 10. Ejemplo metodología ángulo de contacto malla negra.....	26
Figura 11. Malla de polietileno al 90% de sombra.	26
Figura 12. Ejemplo de metodología de medición de diámetros de la fibra verde.	27
Figura 13. Ejemplo metodología ángulo de contacto malla verde.....	30
Figura 14. Esquema estructura de captación de neblina.	31
Figura 15. Sistema de captación de neblina con inclinaciones de 90°, 70° y 45°.	31
Figura 16. (a) Detalle de canaleta - movimiento. (b) Detalle de canaleta - posterior. (c) Salida del sistema - Baldes de recolección.	33
Figura 17. Dimensiones cono y reloj de arena.	34
Figura 18. Captadores de diferentes geometrías.	35
Figura 19. Esquema Caso II – Vista transversal. (elaboración propia).....	36
Figura 20. Esquema Caso III - Vista transversal. (elaboración propia).....	36
Figura 21. Prueba caso II en el laboratorio. Dirección de flujo.....	37
Figura 22. Resultados pruebas iniciales.....	40
Figura 23. Resultados pruebas Caso I.	42



Figura 24. Resultados pruebas Caso II.	44
Figura 25. Resultados pruebas Caso III.	47
Figura 26. Resultados pruebas malla negra.....	51
Figura 27. Resultados pruebas malla verde.....	54
Figura 28. Localización de finca caso de estudio Subachoque - Cundinamarca. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Earth (2025).	59
Figura 29. Fotografías de la finca en Subachoque. (a) Dinámica de neblina en la zona baja de la finca a las 9 am. (b) Neblina encañonada en la parte baja de la finca vista desde la parte más alta. (c) Proximidad de la finca al cerro El Tablazo.	60
Figura 30. Ejemplo de medición de velocidad de viento in situ con anemómetro.	61
Figura 31. Propuestas iniciales de geometrías. (a) Cono. (b) Reloj de arena. (c) Figura tridimensional más compleja.	62
Figura 32. Estructura para el captador en forma de cubo.....	63
Figura 33. Dimensiones estructura principal de los conos.	63
Figura 34. Estructura para los captadores en forma de cono.	64
Figura 35. Propuesta de montaje en campo.	65
Figura 36. Proceso de instalación en campo 30 de octubre de 2025.	66
Figura 37. Instalación 30 de octubre de 2025. (a) Caso I - Cubo y cono. (b) Caso II - Cono. (c) Caso III - Cono.	66
Figura 38. Fotografías de la visita del 8 de noviembre de 2025 - daños al captador cúbico.....	67
Figura 39. Fotografías visita 13 de noviembre. (a) Nuevo caso I - Cono. (b) y (c) Nuevo caso II – Cubo y cono.	68
Figura 40. Ejemplo de evidencia de medición por parte de Danna.....	70
Figura 41. Resultados en campo.....	75



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de zonas prioritarias en América Latina.	8
Tabla 2. Resultados diámetro promedio malla negra.	21
Tabla 3. Resultados rugosidad superficial promedio malla negra.	22
Tabla 4. Resultados densidad de fibras malla negra.	23
Tabla 5. Resultados apertura efectiva malla negra.	24
Tabla 6. Resultados porosidad y coeficiente de sombra malla negra.	25
Tabla 7. Resultados diámetro promedio malla verde.	27
Tabla 8. Resultados rugosidad superficial promedio malla verde.	28
Tabla 9. Resultados densidad de fibras malla verde.	28
Tabla 10. Resultados apertura efectiva malla verde.	29
Tabla 11. Resultados porosidad y coeficiente de sombra malla verde.	29
Tabla 12. Casos estudiados para los paneles con inclinación.	37
Tabla 13. Formato de registro de datos experimental.	38
Tabla 14. Duración en minutos pruebas - Caso I.	41
Tabla 15. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para el Caso I.	42
Tabla 16. Eficiencia de recolección para cada ángulo - Caso I.	43
Tabla 17. Duración en minutos pruebas - Caso II.	44
Tabla 18. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para el Caso II.	45
Tabla 19. Eficiencia de recolección para cada ángulo - Caso II.	45
Tabla 20. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para el Caso III.	48
Tabla 21. Eficiencia de recolección para cada ángulo - Caso III.	48
Tabla 22. Duración en minutos pruebas – malla negra.	50
Tabla 23. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para la malla negra.	51
Tabla 24. Eficiencia de recolección para cada ángulo - malla negra.	52
Tabla 25. Duración en minutos pruebas – malla verde.	54
Tabla 26. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para la malla verde.	54
Tabla 27. Eficiencia de recolección para cada ángulo - malla verde.	55
Tabla 28. Casos iniciales estudiados en campo.	66



Tabla 29. Casos definitivos estudiados en campo.	68
Tabla 30. Primeros resultados de los casos propuestos inicialmente para campo.	71
Tabla 31. Resultados de los casos propuestos para campo.	72



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Número de Bond.	5
Ecuación 2. Número de Weber.....	5
Ecuación 3. Número de Ohnesorge.....	5
Ecuación 4. Caudal de salida de boquillas nebulizadoras.....	13
Ecuación 5. RMS - Root Mean Square Roughness.....	19
Ecuación 6. Eficiencia de recolección del panel.	43



1. INTRODUCCIÓN

Colombia es uno de los países con mayor disponibilidad hídrica del mundo, con una oferta natural estimada en cerca de 63.000 metros cúbicos por habitante al año, cifra considerablemente superior al promedio mundial (IDEAM, 2021). Esta riqueza hídrica se distribuye de forma heterogénea a lo largo del territorio nacional, influenciada por su ubicación geográfica, clima y topografía. En particular, la presencia de sistemas montañosos como la cordillera de los Andes ha dado lugar a una diversidad de ecosistemas de alta montaña caracterizados por su elevada humedad atmosférica y frecuente formación de niebla. Estos ecosistemas, son especialmente comunes entre los 2.000 y 4.000 metros sobre el nivel del mar y presentan condiciones ideales para el aprovechamiento de la captación pasiva de agua a partir de la niebla (Luteyn, 1999; IDEAM, 2014).

A pesar de su riqueza hídrica, Colombia presenta profundas desigualdades en el acceso al agua potable, especialmente en zonas rurales dispersas. De acuerdo con la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (2024), solo el 72% de los hogares colombianos cuenta con servicio de acueducto, mientras que en las zonas urbanas esta cobertura alcanza el 85%, en las zonas rurales apenas llega al 39%. Esta brecha también fue evidenciada por el Centro de Pensamiento en Ciudades y Territorios Globales de la Universidad Nacional de Colombia, el cual reportó una diferencia de hasta 25 puntos porcentuales entre la cobertura de agua potable en áreas urbanas (98%) y rurales (73%) (Bernal Pedraza & Licon Calpe, 2024).

Esta combinación de riqueza hídrica y condiciones favorables para la neblina convierte a Colombia en un escenario estratégico para el desarrollo de tecnologías innovadoras de abastecimiento de agua en zonas rurales dispersas. Además, la desigualdad estructural que existe entre las ciudades y el campo, resalta la urgencia de explorar tecnologías descentralizadas, como los sistemas de captación de niebla, que podrían ofrecer una alternativa viable para garantizar el acceso al agua potable en territorios históricamente marginados.

En los últimos años, la aplicación de tecnologías de captación de agua a través de la niebla ha cobrado relevancia como alternativa sostenible y de bajo consumo energético. Estos sistemas, basados en paneles o mallas verticales que interceptan el rocío de nieblas, requieren mínima energía (usualmente solo la fuerza de gravedad) y emplean materiales accesibles que pueden ser replicados por las comunidades locales (Climate Technology Centre & Network, 2016). En un caso destacado en Ecuador, se implementó una torre de captación tridimensional en una comunidad andina por encima de los 3200 m.s.n.m., logrando rendimientos de entre 0,65 y 2,63 L/m²/día de agua apta para consumo humano, produciendo cerca de 26 578 m³/año y demostrando ser económicamente rentable (ratio beneficio-costos de 1,90) (Carrera-Villacrés, Rodríguez-Espinosa & Toulkeridis, 2023). Además, estudios comparativos destacan que los



sistemas de captación de niebla son “relativamente simples”, con bajo costo de operación y mantenimiento, y especialmente efectivos en áreas montañosas donde otras fuentes de agua son escasas (WorldWideScience, 2024). Estas características han estimulado un creciente interés en la replicación comunitaria de la tecnología, contribuyendo también al empoderamiento local y la autonomía hídrica rural.

La captación de agua de niebla, aunque prometedora, aún enfrenta retos de diseño y eficiencia. Por ejemplo, la geometría plana tradicional de los captadores limita su capacidad de captación en comparación con diseños más innovadores, como los prismáticos tridimensionales. En este contexto, es esencial investigar cuál es la geometría óptima para maximizar la eficiencia de captación de agua y garantizar su sostenibilidad en términos económicos, sociales y ambientales.

En este estudio se presenta una revisión bibliográfica de los principales factores técnicos que influyen en la eficiencia de recolección de los sistemas de captación de niebla, incluyendo el número y disposición de las mallas, el ángulo de inclinación y la comparación entre configuraciones planas y tridimensionales. Como complemento a esta revisión, se desarrolló una etapa experimental en laboratorio que comprendió, en una primera fase, el análisis de la influencia del ángulo de inclinación de los paneles recolectores y, en una segunda fase, la evaluación comparativa de tres geometrías de captación no convencionales. Adicionalmente, se realizó un trabajo de campo en el municipio de Subachoque, donde se replicó e instaló un captador con geometría tridimensional para contrastar su desempeño en condiciones reales. A partir de la integración de los resultados experimentales y del caso de estudio en campo, se busca proponer una geometría de captación funcional y replicable para zonas rurales de alta montaña, que permita mejorar la eficiencia del sistema sin comprometer su viabilidad constructiva ni su adaptación al entorno.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Determinar la geometría óptima de mallas o conjunto de mallas que maximice la captación de agua en sistemas de atrapamiento de niebla, considerando la eficiencia técnica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analizar el diseño y las estructuras asociadas que contribuyen a mejorar la eficiencia del sistema de captación de niebla, considerando variables geométricas y físicas como la inclinación, la geometría del recolector y el número de capas.
- Evaluar la influencia de la geometría y configuración del sistema sobre los mecanismos de interacción gota-fibra, incluyendo impacto, adhesión, coalescencia y drenaje, a partir de ensayos experimentales y del análisis de parámetros adimensionales.



-
- Proponer un modelo funcional y estéticamente integrador que sea replicable en comunidades rurales de alta montaña, basado en pruebas experimentales y análisis teóricos.



2. MARCO TEÓRICO

La neblina es un fenómeno atmosférico que consiste en la suspensión de microgotas de agua en el aire, con diámetros típicos entre 1 y 40 μm y concentraciones que oscilan entre 0,05 y 1 g/m^3 (Schemenauer & Cereceda, 1994). Su formación ocurre cuando el vapor de agua en la atmósfera alcanza su punto de rocío, fenómeno común en zonas de alta montaña o regiones costeras donde el aire húmedo asciende por pendientes y se enfría rápidamente.

Desde el punto de vista técnico, el comportamiento físico de la niebla ha sido ampliamente estudiado para entender cómo puede ser interceptada por estructuras diseñadas para recolectarla. Investigaciones pioneras como las de Schemenauer y Cereceda (1994) desarrollaron los primeros estándares para colectores pasivos, denominados “fog fences”, los cuales permitieron analizar variables clave como el tamaño de la malla, la altura del captador y la dirección del viento. En años más recientes, la incorporación de herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) ha enriquecido estos estudios, permitiendo simular el comportamiento del flujo de niebla frente a distintas geometrías.

En este contexto, la eficiencia de los atrapanieblas se analiza a partir de tres componentes fundamentales: aerodinámica, depósito y drenaje. La eficiencia aerodinámica se refiere a la proporción del flujo de niebla que interactúa efectivamente con la superficie recolectora. Esta está influenciada por factores como la forma y orientación del captador, la resistencia al flujo y la turbulencia inducida. (Gandhidasan & Abualhamayel, 2005). Por ejemplo, se ha observado que el uso de mallas con un coeficiente de sombra intermedio (que no sean ni muy densas ni muy abiertas) logra un mejor equilibrio entre permeabilidad y captación.

Por su parte, la eficiencia de depósito mide la cantidad de gotas que, tras impactar la malla, se adhieren efectivamente a sus fibras. Este fenómeno depende del tamaño de las gotas, la velocidad del viento, el diámetro de los filamentos y las propiedades de la superficie. Shahrokhian et al. (2020) encontraron que el uso de superficies microtexturizadas o con patrones alternos hidrofóbicos e hidrofílicos mejora considerablemente la adhesión y el direccionamiento de las gotas hacia los bordes inferiores del panel, favoreciendo su posterior recolección. Además, el número de Stokes (parámetro que relaciona la inercia de las gotas con las características del flujo) es utilizado para estimar la probabilidad de que una gota impacte y se deposite exitosamente.

Finalmente, la eficiencia de drenaje se refiere a la capacidad del sistema para conducir el agua captada hacia el sistema de almacenamiento sin pérdidas por evaporación, estancamiento o reentrada al flujo de viento. Este componente es crucial, ya que, si el agua no drena de forma efectiva, puede acumularse en la malla y disminuir tanto la eficiencia aerodinámica como la de



depósito. Según Park et al. (2013), La incorporación de canales o texturas que dirijan el flujo ha mostrado mejoras sustanciales en la eficiencia general del sistema.

2.1 Interacción gota-fibra

Uno de los aspectos más críticos en el diseño de atrapanieblas es la interacción entre las microgotas de niebla y las fibras individuales de la malla, un fenómeno gobernado por fuerzas inerciales, viscosas y de tensión superficial. Estudios recientes, como el de Mukhopadhyay et al. (2024), han analizado la forma y el desprendimiento de gotas en fibras cilíndricas, identificando dos configuraciones dominantes: la “barrel” (gota envolvente) y la “clamshell” (gota colgante). La transición entre estas formas depende del número de Bond:

Ecuación 1. Número de Bond.

$$Bo = \frac{\rho g r^2}{\sigma}$$

donde r es el radio de la fibra, g la aceleración gravitacional, y σ la tensión superficial. Las gotas alcanzan un volumen crítico de desprendimiento, acelerado por la gravedad, que puede predecirse y relacionarse con el valor de Bo .

En cuanto al impacto y captura inicial de gotas durante el flujo, es importante mencionar el número de Weber, definido como:

Ecuación 2. Número de Weber.

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma}$$

donde V y d son la velocidad y el diámetro de la gota, respectivamente. Este número caracteriza la deformación y adherencia: valores bajos ($We \ll 1$) permiten la captura efectiva de gotas sin ruptura, mientras que valores altos ($We > 1$) aumentan la posibilidad de fragmentación (MDPI Coatings, 2022). Otra magnitud relevante es el número de Ohnesorge,

Ecuación 3. Número de Ohnesorge.

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma d}} \quad \text{ó} \quad Oh = \frac{1}{\sqrt{We \times Re}}$$



donde μ es la viscosidad dinámica y Re número de Reynolds, los cuales relacionan la viscosidad con las fuerzas inerciales y de tensión superficial, ayudando a modelar la propagación de la gota sobre la fibra.

Por su parte, el trabajo de Mukhopadhyay et al. (2023) también examinó cómo el radio de la fibra influye en el volumen de desprendimiento: fibras más delgadas acumulan menos agua antes de desprenderse, reduciendo pérdidas por escurrimiento prematuro, aunque también pueden disminuir la eficiencia de depósito. Estos hallazgos resaltan que el diseño óptimo de la fibra debe equilibrar tres variables fundamentales: diámetro, mojabilidad y geometría, para maximizar la eficiencia integral.

2.2 Antecedentes

Diversos estudios han abordado el diseño y optimización de sistemas de captación de niebla mediante análisis teóricos y simulaciones por dinámica de fluidos computacional (CFD), con el objetivo de mejorar la eficiencia aerodinámica de los colectores. Uno de los aportes más relevantes en este campo es el estudio de Carrasquilla-Batista et al. (2020), quienes analizaron mediante CFD el comportamiento aerodinámico de colectores en forma de "V" dispuestos en configuraciones multicapa. Sus resultados mostraron que la incorporación de múltiples capas de mallas paralelas permite aumentar significativamente la eficiencia de captación, al generar una mayor zona de interacción con el flujo de niebla y favorecer la colisión de gotas con las superficies recolectoras. En particular, se evidenció que la eficiencia aerodinámica se incrementa cuando el diseño contaba con 4 o 5 capas y si se disponen con una separación y ángulo adecuados, permitiendo el paso controlado del flujo y reduciendo las pérdidas por turbulencia o reentrada del agua.

Por otro lado, el trabajo de Goense (2018), desarrollado en la Universidad de Delft, se centró en analizar la influencia de la geometría del colector sobre la eficiencia de captación, utilizando también simulaciones CFD para comparar formas planas y convexas. Los resultados obtenidos mostraron que los colectores con curvatura convexa presentan un comportamiento aerodinámico más favorable, ya que logran guiar el flujo de niebla hacia la superficie de captación de manera más eficiente, aumentando la probabilidad de impacto de las gotas. La forma convexa, al reducir la desviación del flujo lateral, mejora la recolección sin necesidad de aumentar el área de la malla ni la resistencia estructural. De manera coherente, Carrera-Villacrés, Rodríguez-Espinosa y Toulkeridis (2023) evidenciaron que las estructuras con curvaturas suaves o diseños tridimensionales logran una mejor canalización del viento y, por ende, una mayor eficiencia de captación, confirmando así la importancia del diseño geométrico en la optimización de estos sistemas.



De manera complementaria, otros estudios han abordado el impacto del ángulo de inclinación de los paneles recolectores en la eficiencia de captación de niebla. Ghosh, Ray y Ganguly (2015), en un estudio realizado en una planta termoeléctrica, evaluaron el rendimiento de diferentes mallas metálicas montadas en la salida de torres de enfriamiento, donde el flujo de niebla asciende verticalmente. Encontraron que una inclinación de aproximadamente 30° respecto a la vertical optimiza la recolección, al lograr un equilibrio entre la reducción del área efectiva del panel y la reducción de pérdidas por drenaje inducido por gravedad, como se muestra en la Figura 1. Resultados similares fueron reportados en el estudio publicado en Frontiers 2021, en el que se evaluó experimentalmente la eficiencia de mallas planas con distintas modificaciones de mojabilidad en un entorno de niebla industrial. Este trabajo también concluyó que 30° es una inclinación óptima, por las mismas razones: una mejor recolección neta al reducir el desprendimiento rápido de gotas sin sacrificar significativamente el área activa del colector.

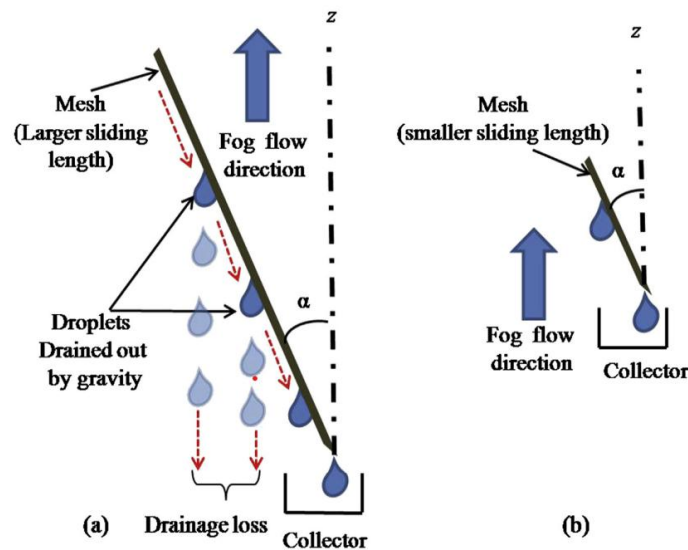


Figura 1. Drenaje inducido por gravedad de gotas recolectadas desde una superficie inclinada con (a) mayor longitud de deslizamiento y (b) menor longitud de deslizamiento. Adaptado de Ghosh, R., Ray, T. K., & Ganguly, R. (2015). *Cooling tower fog harvesting in p*

No obstante, es importante señalar que ambos estudios se desarrollaron en contextos donde la niebla se desplaza en dirección ascendente (como en torres de enfriamiento industriales), lo que implica una dinámica diferente respecto al flujo de niebla natural en ecosistemas de alta montaña, donde el viento generalmente transporta la neblina de forma horizontal o lateral. Por esta razón, en el presente trabajo se propone investigar experimentalmente la influencia del ángulo de inclinación en condiciones de laboratorio, replicando un flujo lateral de niebla que simule más fielmente el comportamiento de este fenómeno en entornos naturales. Este enfoque



permitirá determinar si el ángulo óptimo identificado en entornos industriales es también replicable en sistemas diseñados para captación en campo.

En cuanto a experiencias en contextos latinoamericanos, se han desarrollado múltiples proyectos que evidencian la viabilidad de la captación de niebla como una fuente complementaria de abastecimiento hídrico, especialmente en comunidades rurales de alta montaña. En Perú, Sánchez Cabanillas (2018) documentó la implementación de atrapanieblas con mallas tipo Raschel en zonas áridas de Lima, mostrando que, con condiciones favorables de niebla y vientos constantes, se podían alcanzar volúmenes de recolección de hasta 5 L/m²/día. Sin embargo, también se identificaron limitaciones asociadas al diseño plano de las estructuras y al deterioro de los materiales, lo que reducía su eficiencia y vida útil.

De forma similar, en Ecuador, Carrera-Villacrés, Rodríguez-Espinosa y Toulkeridis (2023) llevaron a cabo un estudio aplicado en una comunidad altoandina, donde se implementaron colectores tridimensionales experimentales con curvaturas adaptadas a la dirección del viento. Sus resultados indicaron una mejora notable en la eficiencia de captación con respecto a estructuras planas tradicionales, alcanzando tasas de recolección entre 0,65 y 2,63 L/m²/día.

En Colombia, los trabajos de Serje Martínez (2021, 2024) han explorado el uso de mallas alternativas y materiales de bajo costo en zonas rurales dispersas, particularmente en el altiplano cundiboyacense. Su investigación ha comparado diferentes tipos de tejidos y configuraciones de montaje, concluyendo que la orientación al viento y la textura de la malla tienen un impacto directo en la eficiencia del sistema. A partir de estos hallazgos, se plantea la necesidad de desarrollar diseños que no solo sean técnicamente eficientes, sino también estéticamente integradores y culturalmente apropiados para facilitar su adopción comunitaria.

En conjunto, estos antecedentes en América Latina ofrecen evidencia empírica valiosa que sustenta la pertinencia del presente estudio, al demostrar que los sistemas de captación de niebla pueden ser una alternativa viable y sostenible para mejorar el acceso al agua en comunidades rurales de alta montaña. Al mismo tiempo, reflejan los desafíos técnicos y sociales que deben ser abordados para lograr una implementación exitosa, entre ellos la optimización geométrica de los colectores, la durabilidad de los materiales y la aceptación comunitaria de las estructuras.

Tabla 1. Comparación de zonas prioritarias en América Latina.

País	Altitud promedio	Frecuencia de niebla	Eficiencia promedio (L/m²/día)	Referencia
Perú	>2500 msnm	>180 días/año	4–6	Sánchez Cabanillas (2018)
Ecuador	>3000 msnm	>150 días/año	0.65–2.63	Carrera-Villacrés et al. (2023)



Colombia	>2000 msnm	>150 días/año	1-4	Serje Martínez (2021, 2024)
-----------------	------------	---------------	-----	-----------------------------

2.3 Localización óptima para la instalación de colectores de niebla en Colombia

La eficiencia de los sistemas de captación de agua de niebla depende no solo del diseño y la geometría de los atrapanieblas, sino también de su ubicación geográfica y condiciones ambientales locales (Serje Martínez, 2021). La selección adecuada del lugar de instalación es un factor crítico que influye directamente en el volumen de agua recolectada (Flores Bazán, 2021). Para maximizar la captación, es necesario considerar variables como la altitud, ya que zonas montañosas por encima de los 2000 msnm suelen tener mayor incidencia de niebla debido al enfriamiento nocturno y a la interacción entre corrientes húmedas y relieve; la exposición al viento dominante, dado que las laderas orientadas hacia la dirección predominante del viento permiten una mayor interacción entre el flujo de niebla y las superficies recolectoras; la frecuencia de niebla, requiriéndose más de 150 días al año con este fenómeno para garantizar una captación sostenible; la velocidad del viento, siendo óptimas entre 2 y 6 m/s para evitar pérdidas por arrastre; y la humedad relativa alta, con valores cercanos al 100% durante la formación de la niebla, lo cual asegura una mayor densidad de gotas en el aire (Schemenauer & Cereceda, 1994).

Estos factores han sido estudiados extensamente en zonas costeras y montañosas de América Latina, África y Asia, identificando patrones comunes que definen áreas con potencial para la implementación de esta tecnología (Carrera-Villacrés, Rodríguez-Espinosa & Toulkeridis, 2023). Por ejemplo, Ballesteros (2024) realizó un análisis de viabilidad sobre las áreas propicias para la captación de neblina en Colombia. En este estudio determinó que las zonas con mayor aptitud para la captación de neblina en Colombia se localizan principalmente en las regiones altoandinas, especialmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia y Caldas. Estas áreas presentan condiciones climáticas favorables, como altitudes superiores a 2000 msnm, alta humedad relativa (mayor al 80%) y temperaturas medias entre 8 °C y 16 °C, factores que favorecen la formación de niebla.

Para identificar dichas zonas, Ballesteros (2024) aplicó un modelo de análisis multicriterio mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), asignando diferentes pesos a variables climáticas clave, como la humedad relativa y la temperatura media. En uno de los escenarios analizados, donde la humedad relativa se ponderó al 60% y la temperatura media al 40%, se logró identificar una amplia extensión de territorio con aptitud moderada a alta para la instalación de atrapanieblas. Los resultados mostraron que estas zonas coinciden mayoritariamente con la Cordillera Occidental y Central de los Andes colombianos, lo cual respalda hallazgos previos como los de Fesehaye (2013), quien también destacó la potencialidad de estas regiones para tecnologías de captación de agua atmosférica.



Además, el estudio encontró que las comunidades rurales dispersas ubicadas en estos sectores son las más propensas a beneficiarse de esta tecnología, ya que enfrentan limitaciones significativas en el acceso a fuentes convencionales de agua potable. La integración de criterios técnicos y socioeconómicos permitió no solo evaluar la viabilidad física del recurso, sino también su pertinencia desde el punto de vista de desarrollo rural sostenible. Esto refuerza la idea de que la captación de neblina puede convertirse en una alternativa viable y complementaria para mejorar la seguridad hídrica en zonas vulnerables del país. Sin embargo, resalta la importancia del trabajo con la comunidad, para generar apropiación del sistema de recolección y así tener una implementación exitosa.

2.4 Marco normativo y de financiamiento para la captación de niebla en Colombia

En Colombia, la reglamentación general sobre recursos hídricos y saneamiento brinda un marco favorable para proyectos comunitarios innovadores, como la captación de niebla. La Constitución Política de 1991 y la Ley 99 de 1993 establecen que el manejo del agua corresponde al dominio público y que las comunidades tienen derecho a una gestión sostenible del recurso (Constitución Política de Colombia, 1991; Ley 99 de 1993).

Además, el Plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026, bajo el lema *Colombia, potencia mundial de la vida*, prioriza el agua como eje transversal de justicia social y adaptación al cambio climático, incorporando acciones concretas para fortalecer soluciones tecnológicas apropiadas en zonas rurales (DNP, 2023). Dentro de este marco, se crearon instancias como la Gerencia de Proyectos Estratégicos de Agua y Saneamiento Básico, mediante la cual se estructuran proyectos con acceso a presupuestos nacionales y vigencias futuras, priorizando territorios rurales rezagados (DNP, 2025).

En el ámbito comunitario, el programa “Ruta ComuniAgua” establece un esquema de subsidios y acompañamiento técnico para organizaciones comunitarias de agua y saneamiento básico, con financiamiento del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. En 2024, este programa benefició a cientos de acueductos rurales con apoyos que superan los 9.900 millones de pesos, permitiendo la estructuración de proyectos de inversión que pueden incluir tecnologías alternativas como los atrapanieblas (MinVivienda, 2024).

Complementariamente, la Resolución 124 de 2024 de la Agencia de Desarrollo Rural contempla el cofinanciamiento de proyectos productivos e innovadores en zonas rurales, incluyendo tecnologías orientadas al manejo del agua. Esta normativa exige que el MADR y la ADR diseñen mecanismos que fomenten la innovación en bienes y servicios rurales (ADR, 2024).

Finalmente, el Decreto Distrital 806 de 2021 y otras normativas territoriales permiten la implementación de soluciones alternativas de acueducto (como sistemas de captación de agua no convencionales) siempre que cuenten con la autorización de la autoridad sanitaria y la



participación de la comunidad. Esto abre la puerta a que tecnologías como los sistemas de niebla sean legal y técnicamente viables en zonas de alta montaña con baja cobertura de acueducto (Decreto Distrital 806, 2021).

A pesar de que el marco normativo y las herramientas de financiamiento existentes ofrecen una base sólida para la implementación de tecnologías alternativas como la captación de niebla, aún persisten retos importantes que limitan su escalamiento. Uno de los principales obstáculos es la falta de lineamientos técnicos específicos que orienten la instalación, operación y mantenimiento de estos sistemas dentro de los estándares de calidad y seguridad requeridos por las autoridades sanitarias. Además, aunque programas como “Ruta ComuniAgua” y la Resolución 124 de 2024 promueven la innovación en zonas rurales, la adopción de estas tecnologías sigue siendo limitada debido a la necesidad de mayor evidencia técnica sobre su eficiencia y sostenibilidad a largo plazo.

En este sentido, el estudio de Ballesteros (2024) destaca que, si bien existen zonas en Colombia (especialmente en los departamentos de Cundinamarca, Boyacá, Nariño, Antioquia y Caldas) con condiciones climáticas favorables para la captación de niebla, la viabilidad de los proyectos no depende únicamente de la disponibilidad del recurso, sino también de su integración socioeconómica y ambiental. Este análisis refuerza la importancia de diseñar estrategias que vinculen a las comunidades desde la fase de planeación, garantizando que los sistemas sean percibidos no solo como infraestructura funcional, sino también como elementos visualmente armonizados al entorno. En consecuencia, para superar los retos actuales, es necesario articular el marco normativo existente con estudios técnicos más profundos sobre la geometría óptima de los atrapanieblas, su adaptación local y su escalabilidad mediante políticas públicas claras que incentiven su adopción en comunidades rurales dispersas con déficit hídrico.



3. METODOLOGÍA

Esta tesis se desarrolló como parte de la continuidad del trabajo de Laura Serje Martínez (2024), titulado *Análisis comparativo de materiales para sistemas de captación de neblinas en zonas rurales dispersas de Colombia*. Este enfoque permitió aprovechar el montaje experimental previamente validado en laboratorio, adaptándolo para estudiar nuevas configuraciones estructurales orientadas a mejorar la eficiencia de captación. La metodología propuesta para esta investigación tiene una etapa inicial en el laboratorio donde se plantea un modelo físico para evaluar la eficiencia de recolección de paneles recolectores cuando tienen diferentes ángulos de inclinación respecto a la horizontal (Figura 2).



Figura 2. Sistema de nebulización que reproduce la neblina con paneles inclinados.

En una segunda etapa de la experimentación en laboratorio, el enfoque metodológico se amplió para evaluar el efecto de la geometría del recolector sobre la eficiencia de captación de niebla. Para ello, se diseñaron y ensayaron tres configuraciones geométricas distintas del captador: un cono, un reloj de arena y un cubo, este último utilizado como caso de referencia o control (Figura 3). Los recolectores se ubicaron a una distancia horizontal constante de 1.8 m respecto a las boquillas, lo que permitió realizar una comparación directa y controlada de la eficiencia de recolección asociada a cada geometría, minimizando la influencia de variables externas y concentrando el análisis en el efecto geométrico del sistema.



Figura 3. Sistema de nebulización que reproduce la neblina con captadores de diferentes geometrías.

En este sentido, se utilizó el mismo espacio físico del Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes (Figura 2). El sistema está compuesto por una red de tuberías de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada dispuestas en paralelo, conectadas a 18 boquillas nebulizadoras (nueve por lado), las cuales están fabricadas en latón niquelado con núcleo interno de cerámica y diseñadas para generar partículas finas de agua que simulan gotas de niebla bajo presiones entre 5 y 20 bar.

Cada boquilla utilizada presenta una relación no lineal entre presión y caudal, que puede aproximarse mediante la ecuación empírica:

Ecuación 4. Caudal de salida de boquillas nebulizadoras.

$$Q = K\sqrt{P}$$

Donde, Q es el caudal de salida en ml/s, P es la presión de entrada en bar y K es un coeficiente específico del modelo de boquilla utilizado.

De acuerdo con la tesis de Serje 2024, el coeficiente K para estas boquillas es de aproximadamente 0.256. Para esta investigación, se adoptó un caudal promedio de salida de 2.33 ml/s. Estas boquillas se modificaron depende del caso que se estuviera evaluando, los cuales se explican más adelante en el apartado de casos estudiados. El suministro de caudal lo proporciona una hidrolavadora que mantiene una presión controlable, la cual es monitoreada mediante un manómetro.



Para más información y detalle del sistema de nebulización, ver tesis de Laura Serje Martínez (2024).

3.1 Parámetros adimensionales del sistema

Con el fin de obtener información de la interacción gota-fibra del sistema, se realizó la caracterización de los parámetros adimensionales que gobiernan el comportamiento de las gotas de niebla al interactuar con las superficies recolectoras. Estos parámetros, tales como el número de Weber, el número de Reynolds y el número de Stokes, permiten describir el régimen dinámico del sistema y evaluar la relevancia relativa de las fuerzas inerciales, viscosas y de tensión superficial que intervienen en los procesos de impacto, adhesión, rebote y drenaje de las gotas. Para la estimación de dichos parámetros fue necesario determinar experimentalmente el diámetro característico de las gotas generadas por el nebulizador, así como su velocidad de salida.

Para la determinación experimental del diámetro característico de las gotas, se implementó un procedimiento de captura diseñado para minimizar el efecto de evaporación. Las gotas emitidas fueron recolectadas utilizando guardapolvos, los cuales permitieron su almacenamiento temporal inmediatamente después de la generación. Una vez recolectadas, las gotas se transfirieron de forma rápida a un plato Petri (Petri dish), con el objetivo de reducir al máximo las pérdidas por evaporación antes del análisis. (Figura 4).

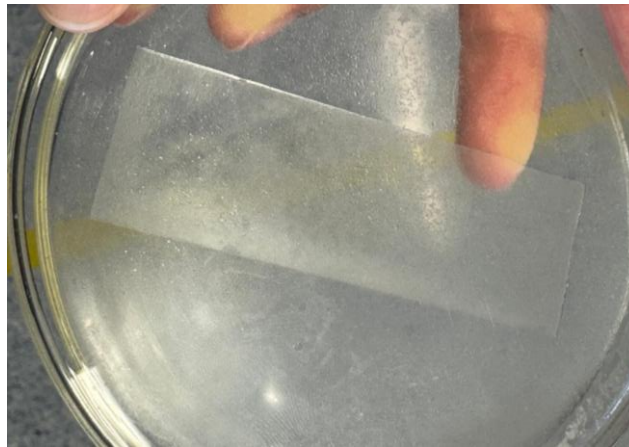


Figura 4. Recolección de gotas de neblina con guardapolvos y plato de Petri.

Posteriormente, las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Ingeniería Biomédica, donde se realizó la adquisición de imágenes mediante un microscopio óptico ZEISS Primo Star equipado con cámara Axiocam. Las imágenes fueron capturadas de manera inmediata utilizando el software ZEN BLUE, garantizando una resolución suficiente para la medición precisa del diámetro de las gotas. A partir de estas imágenes, los diámetros fueron determinados mediante



análisis de imagen, permitiendo obtener una distribución representativa de tamaños de gota bajo las condiciones de operación del sistema experimental.

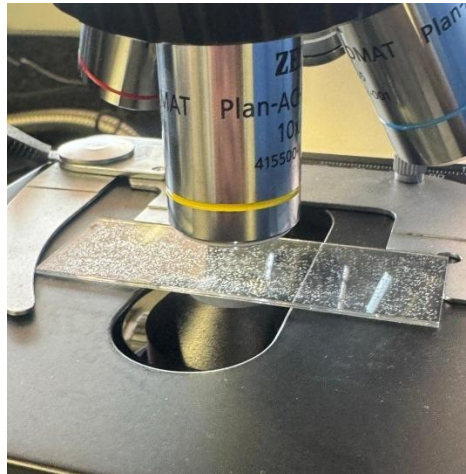


Figura 5. Obtención de imágenes de gotas en microscopio.

La velocidad característica empleada en el cálculo de los parámetros adimensionales se determinó mediante la medición directa de la velocidad del flujo portador aire-gotas utilizando un anemómetro (Mini Thermo-Anemometer EXTECH), ubicado en la zona de impacto del flujo sobre la superficie recolectora. El orden de magnitud de la velocidad medida es consistente con valores reportados para boquillas de nebulización de alta presión operando entre 5 y 20 bar, donde las velocidades características del flujo aire-gotas se encuentran típicamente en el rango de 5 a 20 m/s.

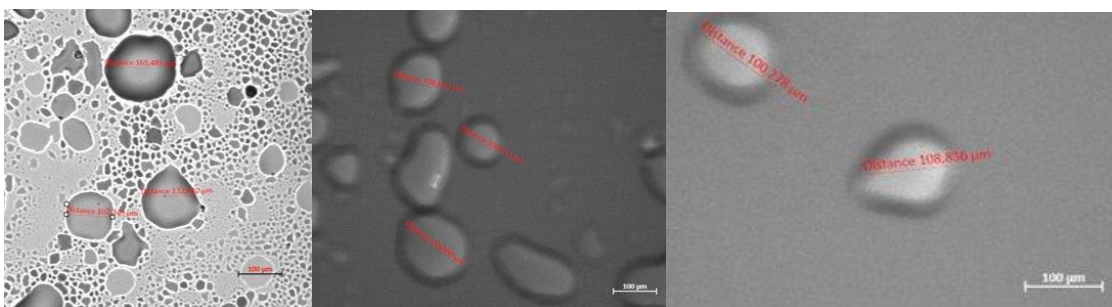


Figura 6. Ejemplo de imágenes capturadas por Zen Blue para gotas de agua.

A partir del procedimiento experimental descrito, se obtuvo un diámetro promedio de las gotas de **122.78 µm**, valor representativo del tamaño característico de las partículas generadas por el sistema de nebulización empleado. Adicionalmente, la velocidad media del flujo aire-gotas medida mediante anemómetro fue de **8.13 m/s**, la cual se encuentra dentro del rango esperado para boquillas de nebulización de alta presión operando en condiciones similares. La combinación de estos valores de diámetro y velocidad es físicamente coherente con los rangos



reportados en la literatura para sistemas de generación de niebla artificial, y permite caracterizar de manera adecuada el régimen dinámico de interacción gota–fibra analizado en esta investigación.

3.1.1 Número de Bond

El número de Bond (Bo) se calculó con el fin de evaluar la relación entre las fuerzas gravitacionales y las fuerzas de tensión superficial que actúan sobre las gotas de agua durante su interacción con la fibra colectora. Este parámetro adimensional se definió como:

$$Bo = \frac{\rho g r^2}{\sigma}$$

donde $\Delta\rho$ corresponde a la diferencia de densidad entre el líquido y el aire, g es la aceleración de la gravedad, r es el radio característico de la gota y σ la tensión superficial del agua. Utilizando un diámetro promedio de gota de $122.78 \mu\text{m}$, una tensión superficial de 0.0728 N/m y un valor promedio de $\Delta\rho = 997.77 \text{ kg/m}^3$, se obtuvo un valor de $Bo = 5.07 \times 10^{-4}$.

Dado que el valor del número de Bond es considerablemente menor que la unidad ($Bo \ll 1$), la **tensión superficial domina** sobre las fuerzas gravitacionales en la dinámica de las gotas. En este régimen, las gotas que impactan la fibra tienden a adherirse y permanecer ancladas a su superficie, en lugar de escurrir o desprenderse inmediatamente por efecto del peso propio. Este comportamiento favorece la acumulación progresiva y la coalescencia de gotas, lo que puede conducir a una saturación local de la malla; sin embargo, también permite que las gotas crezcan hasta alcanzar un tamaño crítico mayor antes de caer, incrementando potencialmente la eficiencia global de recolección.

3.1.2 Número de Weber

El número de Weber (We) se empleó para caracterizar la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de tensión superficial que gobiernan la deformación y estabilidad de las gotas durante su interacción con las fibras del sistema de captación de niebla. Este número adimensional se define como:

$$We = \frac{\rho V^2 d}{\sigma}$$

donde ρ es la densidad del líquido, V la velocidad característica de la gota, d su diámetro y σ la tensión superficial. Para el presente estudio se utilizaron los valores $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$, $V = 8,13 \text{ m/s}$, $d = 1,23 \times 10^{-4} \text{ m}$ y $\sigma = 0,0728 \text{ N/m}$, obteniéndose un número de Weber del orden de $We \approx 110$.



En este caso, el valor obtenido ($We \gg 10$) indica que las gotas generadas por el sistema de nebulización se encuentran en un **régimen claramente inercial**, en el cual pueden presentarse deformaciones significativas e incluso fragmentación durante el impacto sobre las fibras. Este comportamiento resulta particularmente relevante para el análisis de la eficiencia de captación de niebla, ya que la deformación y ruptura de las gotas influyen directamente en los mecanismos de adhesión, coalescencia y drenaje sobre la malla.

3.1.3 Número de Ohnesorge

El número de Ohnesorge (Oh) se calculó para caracterizar la influencia relativa de las fuerzas viscosas frente a las fuerzas inerciales y de tensión superficial durante la interacción gota-fibra. Este número adimensional se define como:

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma d}}$$

donde μ es la viscosidad dinámica del líquido, ρ la densidad del líquido, σ la tensión superficial y r el radio característico de la gota. Se utilizaron los valores $\mu = 1,002 \times 10^{-3}$ Pa/s, $\rho = 998$ kg/m³ y $\sigma = 0,0728$ N/m. El radio de la gota se tomó como $r = 6,14 \times 10^{-5}$ m, correspondiente al diámetro promedio medido experimentalmente ($d = 122,78$ μ m). Con estos parámetros se obtuvo un valor de **$Oh \approx 0,015$** .

Dado que $Oh < 1$, la influencia de la viscosidad es reducida y el comportamiento de las gotas está **dominado por la inercia y la tensión superficial**. En este régimen, las gotas presentan baja disipación viscosa, lo que permite su deformación durante el impacto y las hace susceptibles a fragmentación en presencia de velocidades elevadas del flujo o condiciones de viento intenso. Este resultado es consistente con el régimen dinámico esperado en sistemas de atrapanieblas, donde el balance entre fuerzas capilares e inerciales controla la adhesión, estabilidad y posible ruptura de las gotas sobre la malla.

3.1.4 Análisis del sistema

El análisis conjunto de los números de Bond, Weber y Ohnesorge permite caracterizar de manera integral el régimen físico que gobierna la interacción gota-fibra en el sistema de captación de niebla estudiado. El valor extremadamente bajo del número de Bond ($Bo \ll 1$) indica que las fuerzas de tensión superficial dominan ampliamente sobre las fuerzas gravitacionales, favoreciendo la adhesión inicial de las gotas a la fibra y su permanencia sobre la superficie sin desprendimiento inmediato por efecto del peso propio. Sin embargo, el elevado número de Weber ($We \gg 10$) evidencia que, durante el impacto, las gotas se encuentran en un régimen claramente inercial, en el cual pueden experimentar deformaciones significativas e incluso fragmentación, dependiendo de la geometría de la fibra y de las condiciones locales del flujo. A su vez, el bajo valor del número de Ohnesorge ($Oh < 1$) confirma que la influencia de la



viscosidad es secundaria, lo que implica una baja disipación viscosa y permite que las gotas respondan de manera sensible al balance entre inercia y tensión superficial.

En conjunto, estos resultados describen un sistema en el que las gotas impactan las fibras con suficiente energía para deformarse, pero donde la tensión superficial es dominante una vez se establece el contacto, promoviendo la adhesión, la coalescencia y el crecimiento progresivo de las gotas hasta alcanzar un tamaño crítico para el drenaje. Este régimen es representativo de condiciones típicas en sistemas de atrapanieblas y justifica la necesidad de analizar simultáneamente la geometría de la malla y su inclinación, ya que el desempeño del sistema depende del delicado equilibrio entre impacto inercial, retención capilar y desprendimiento gravitacional.

3.2 Caracterización de las fibras

Con el fin de caracterizar de manera cuantitativa las propiedades geométricas de las fibras que influyen directamente en los procesos de impacto, adhesión y drenaje de las gotas de niebla, se realizó un análisis de imagen digital a partir de fotografías de alta resolución de la malla. El procesamiento de las imágenes se llevó a cabo utilizando el software ImageJ, herramienta de uso extendido en estudios de caracterización de superficies y análisis morfológico de materiales fibrosos.

Las imágenes fueron previamente calibradas espacialmente a partir de una longitud de referencia conocida, permitiendo que todas las mediciones se expresaran en unidades reales de longitud (centímetros) y área (cm^2). A partir de este análisis se determinaron los siguientes parámetros geométricos: diámetro promedio de la fibra, rugosidad superficial, densidad de fibras (pitch), apertura efectiva de la malla, porosidad y coeficiente de sombra.

El diámetro de la fibra se obtuvo mediante la medición directa de secciones transversales visibles en las imágenes calibradas. Para cada tipo de malla se realizaron 60 mediciones independientes de diámetro, seleccionadas aleatoriamente sobre diferentes filamentos, con el fin de obtener una estimación estadísticamente representativa del valor promedio y su dispersión. Este tamaño de muestra es consistente con recomendaciones estadísticas ampliamente aceptadas para la estimación robusta de parámetros geométricos a partir de análisis de imagen, donde muestras superiores a 30 observaciones permiten reducir significativamente el error estándar de la media y garantizar la estabilidad estadística de los parámetros estimados (Montgomery y Runger, 2014).

La rugosidad superficial de la fibra se caracterizó a partir del análisis del valor de gris (gray value) de la imagen, asumiendo que las variaciones de intensidad están asociadas a irregularidades topográficas a escala microscópica. Para cada fibra se realizaron tres tandas independientes de medición, a partir de diferentes regiones de interés, con el fin de reducir la variabilidad asociada a la iluminación y a la selección de área. (**¡Error! No se encuentra el**



origen de la referencia.) La rugosidad se cuantificó mediante el parámetro RMS (Root Mean Square Roughness), definido como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - z)^2}$$

Ecuación 5. RMS - Root Mean Square Roughness.

donde z_i corresponde al valor de gris de cada píxel y z es el valor promedio de la intensidad. Este parámetro representa la desviación cuadrática media respecto al valor medio y es ampliamente utilizado para describir la microtextura superficial, propiedad directamente relacionada con los mecanismos de adhesión y retención de gotas.

La densidad de fibras o pitch se determinó a partir de la medición del espaciamiento longitudinal entre fibras adyacentes. Para ello, se realizaron 60 mediciones del espaciamiento entre filamentos en diferentes secciones de la imagen, a partir de las cuales se calculó el valor promedio del espaciamiento y, posteriormente, el número de fibras por unidad de longitud (fibras/cm). Este parámetro es fundamental para describir la densidad de la malla, ya que influye tanto en la interacción aerodinámica con el flujo de aire como en la probabilidad de impacto de las gotas de niebla sobre la superficie recolectora.

La apertura efectiva de la malla se calculó mediante la delimitación de 30 polígonos que describen los huecos formados entre fibras adyacentes, permitiendo estimar el área libre promedio de la malla. A partir del área total de la imagen y del área ocupada por las fibras, se calcularon adicionalmente la porosidad, definida como la fracción de área libre respecto al área total, y el coeficiente de sombra, definido como el porcentaje de área cubierta por material sólido. Estos parámetros permiten relacionar las propiedades geométricas de la malla con su permeabilidad al flujo de aire y su capacidad de intercepción de gotas.

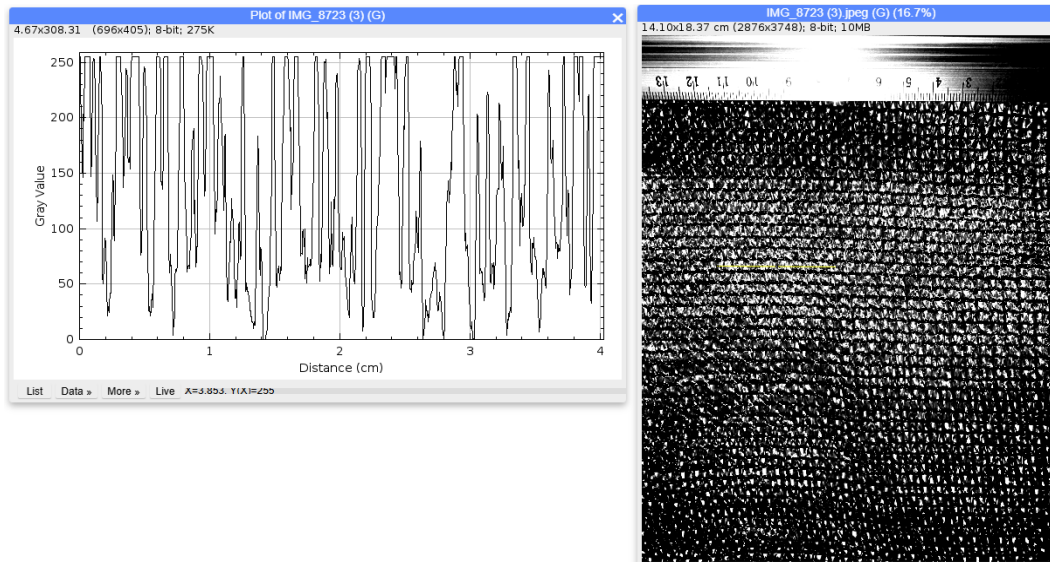


Figura 7. Análisis de rugosidad en ImageJ.

Los valores obtenidos para cada parámetro se presentan y analizan en las subsecciones siguientes para cada tipo de fibra, y constituyen la base para la comparación entre materiales y configuraciones geométricas evaluadas en esta investigación.

3.2.1 Fibra negra - malla de polietileno al 80 % de sombra

La primera fibra analizada corresponde a una malla de polietileno de alta densidad (PE) con un 80 % de sombra, comúnmente utilizada en aplicaciones agrícolas y ampliamente reportada en la literatura como material base para sistemas de captación de niebla. La referencia específica utilizada en esta investigación fue adquirida en Varienplast – Fábrica y Almacén, bajo la denominación comercial “Polisombra Negra al 80 %”. Este tipo de malla es representativo de los materiales tradicionalmente empleados en atrapanieblas por su disponibilidad, bajo costo, resistencia mecánica y comportamiento estable frente a la radiación ultravioleta y a condiciones ambientales adversas.



Figura 8. Malla de polietileno al 80% de sombra.

Diametro promedio

Diámetros - malla negra (cm)	
Promedio	0.034
Mínimo	0.02
Máximo	0.049
σ	0.008
SEM	0.001
CV%	23

Tabla 2. Resultados diámetro promedio malla negra.

El diámetro promedio de la fibra de la malla negra fue de 0.034 cm (0.34 mm), con valores que oscilaron entre 0.02 cm y 0.049 cm, lo cual es consistente con los rangos reportados para mallas de polietileno utilizadas en sistemas de captación de niebla. Este orden de magnitud es adecuado para favorecer el impacto inercial de gotas de niebla transportadas por el flujo de aire, ya que diámetros de fibra del orden de cientos de micrómetros permiten un balance favorable entre probabilidad de intercepción y permeabilidad al flujo. En particular, fibras demasiado delgadas tienden a reducir la eficiencia de impacto, mientras que fibras excesivamente gruesas incrementan la resistencia aerodinámica del sistema, afectando el paso del aire a través de la malla.

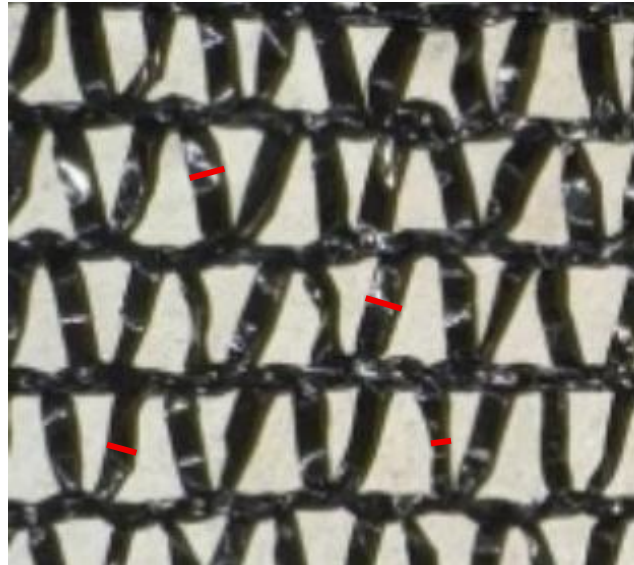


Figura 9. Ejemplo de metodología de medición de diámetros de la fibra negra.

La dispersión observada en los diámetros, reflejada en una desviación estándar de 0.008 cm y un coeficiente de variación del 23 %, evidencia una variabilidad geométrica moderada propia de mallas comerciales fabricadas por extrusión. No obstante, el bajo error estándar de la media (SEM = 0.001 cm) indica que el valor promedio estimado es estadísticamente robusto y representativo del material analizado. Esta variabilidad local en el diámetro puede contribuir a generar heterogeneidades en los mecanismos de captación y drenaje, favoreciendo la coalescencia de gotas en ciertas regiones de la malla, fenómeno que ha sido reportado como potencialmente beneficioso para la recolección global de agua en sistemas de atrapamiento de niebla.

Rugosidad superficial

Promedio		
1	131.454	129.397
2	133.480	
3	123.257	
RMS		
1	80.805	85.600
2	86.600	
3	89.393	

Tabla 3. Resultados rugosidad superficial promedio malla negra.

Los resultados del análisis de rugosidad superficial de la malla negra muestran valores promedio de intensidad de nivel de gris comprendidos entre 123.3 y 133.5, con valores de RMS entre 80.8 y 89.4, obtenidos a partir de tres tandas independientes de medición. Dado que la



rugosidad se estimó a partir del valor de gris de la imagen, estos parámetros corresponden a valores adimensionales, los cuales representan variaciones relativas de la microtextura superficial de la fibra. La consistencia entre las diferentes tandas de medición indica una buena repetibilidad del procedimiento y sugiere que las irregularidades observadas son representativas de la superficie del material y no producto de ruido asociado a la iluminación o al procesamiento de la imagen.

Los valores relativamente elevados del parámetro RMS evidencian una superficie con micro irregularidades pronunciadas, característica típica de fibras de polietileno extruidas utilizadas en mallas comerciales. Desde el punto de vista del atrapamiento de niebla, una mayor rugosidad superficial puede favorecer la adhesión inicial de las gotas al incrementar el área de contacto efectivo y reducir la probabilidad de rebote tras el impacto. Sin embargo, una rugosidad excesiva también puede afectar el drenaje de las gotas coalescidas, por lo que su influencia debe analizarse en conjunto con otros parámetros geométricos como el diámetro de la fibra y la apertura de la malla. En este sentido, los valores obtenidos constituyen una referencia adecuada para evaluar el desempeño relativo de esta fibra frente a otras configuraciones analizadas en la investigación.

Densidad de fibras (pitch)

Distancias - malla negra (cm)	
Promedio	0.363
Mínimo	0.229
Máximo	0.5
σ	0.078
SEM	0.010
CV%	22
<hr/>	
Fibra por cm	2.755

Tabla 4. Resultados densidad de fibras malla negra.

La densidad de fibras de la malla negra se determinó a partir de la medición del espaciamiento entre fibras adyacentes, obteniéndose una distancia promedio de 0.363 cm, con valores mínimos y máximos de 0.229 cm y 0.5 cm, respectivamente. A partir de este espaciamiento medio se calculó una densidad de 2.76 fibras/cm, valor característico de mallas de polietileno con alto porcentaje de sombra. El orden de magnitud del pitch obtenido es consistente con configuraciones comúnmente empleadas en sistemas de captación de niebla, donde se busca un equilibrio entre una adecuada probabilidad de impacto de las gotas y una resistencia aerodinámica moderada al flujo de aire.

La dispersión observada en las distancias medidas, reflejada en un coeficiente de variación del 22 %, evidencia una heterogeneidad geométrica propia de mallas comerciales, asociada al



proceso de fabricación y al patrón de tejido. No obstante, el bajo error estándar de la media (SEM = 0.010 cm) indica que el valor promedio del espaciamiento es estadísticamente representativo del material analizado. Desde el punto de vista del atrapamiento de niebla, esta variabilidad local en la densidad de fibras puede generar zonas con diferente probabilidad de intercepción y drenaje, lo cual puede favorecer la captación global al promover mecanismos de coalescencia diferencial a lo largo de la malla.

Apertura efectiva de la malla

Áreas - malla negra (cm²)	
Promedio	0.113
Mínimo	0.028
Máximo	0.197
σ	0.045
SEM	0.008
CV%	40

Tabla 5. Resultados apertura efectiva malla negra.

La apertura efectiva promedio de la malla negra fue de 0.113 cm², con valores que oscilaron entre 0.028 cm² y 0.197 cm², lo que evidencia una amplia variabilidad en el tamaño de los huecos formados entre fibras adyacentes. Este rango es consistente con mallas de polietileno de alto porcentaje de sombra, donde la geometría del tejido genera aperturas no uniformes. La magnitud de la apertura efectiva obtenida es relevante para los procesos de captación de niebla, ya que determina la fracción del flujo de aire que atraviesa la malla sin interactuar con las fibras, así como la probabilidad de impacto de las gotas transportadas por dicho flujo.

La dispersión observada en las áreas medidas, reflejada en un coeficiente de variación del 40 %, indica una heterogeneidad geométrica significativa, característica de mallas comerciales fabricadas por procesos industriales no orientados a aplicaciones de precisión. Sin embargo, el error estándar de la media relativamente bajo (SEM = 0.008 cm²) sugiere que el valor promedio estimado es representativo del comportamiento global de la malla. Desde el punto de vista del atrapamiento de niebla, esta variabilidad en la apertura puede favorecer una captación más eficiente al combinar regiones de mayor permeabilidad al flujo con zonas de mayor probabilidad de intercepción, promoviendo simultáneamente el paso del aire y la retención de gotas, y contribuyendo así al desempeño integral del sistema recolector.

Porosidad y coeficiente de sombra

Área (cm²)	
Área total	196.188
Área malla	165.334



Porosidad	15.73%
coeficiente sombra	84.27%

Tabla 6. Resultados porosidad y coeficiente de sombra malla negra.

El análisis de imagen permitió estimar la porosidad y el coeficiente de sombra de la malla negra a partir de la relación entre el área total de la imagen y el área ocupada por las fibras. Para la muestra analizada, se obtuvo una porosidad de 15.73 %, correspondiente a la fracción de área libre, y un coeficiente de sombra de 84.27 %, asociado al porcentaje de área cubierta por material sólido. Estos valores reflejan una malla altamente densa, diseñada para limitar significativamente el paso de radiación y flujo a través de su superficie.

El coeficiente de sombra medido experimentalmente presenta una alta concordancia con el valor nominal del 80 % reportado por el fabricante, lo que valida tanto la información comercial del material como la metodología empleada para su caracterización geométrica. La diferencia observada puede atribuirse a la variabilidad inherente del tejido y a la definición geométrica precisa del coeficiente de sombra basada en área proyectada. Desde el punto de vista del atrapamiento de niebla, una porosidad relativamente baja implica una mayor probabilidad de impacto de las gotas sobre las fibras, aunque también conlleva un incremento en la resistencia aerodinámica del sistema. Por ello, estos resultados constituyen una referencia fundamental para analizar el desempeño de la malla en distintas configuraciones geométricas e inclinaciones, donde el balance entre permeabilidad al flujo y eficiencia de captación resulta determinante.

Este nivel de porosidad y coeficiente de sombra sugiere que la eficiencia del sistema dependerá en gran medida de la geometría e inclinación del recolector, más que de la modificación del material base.

Ángulo de contacto

Adicionalmente, se realizó un análisis de imagen de una gota depositada sobre la malla negra con el fin de evaluar su comportamiento humectante. A partir de las imágenes procesadas se determinaron ángulos de contacto de aproximadamente 115° y 117° en cada uno de los costados de la gota, valores característicos de superficies hidrofóbicas. Estos resultados son consistentes con el comportamiento reportado para materiales poliméricos como el polietileno y el polipropileno, ampliamente utilizados en sistemas de captación de niebla. La naturaleza hidrofóbica de la fibra implica una menor tendencia al esparcimiento de la gota sobre la superficie, favoreciendo la formación de gotas casi esféricas que pueden coalescer y drenar con mayor facilidad una vez alcanzan un tamaño crítico, lo cual resulta relevante para la eficiencia global del proceso de recolección.



Figura 10. Ejemplo metodología ángulo de contacto malla negra.

3.2.2 Fibra verde - malla de polietileno al 90 % de sombra

La segunda fibra analizada corresponde a una malla de polietileno de alta densidad (PE) con un 90 % de sombra, utilizada comúnmente en aplicaciones agrícolas donde se requiere una alta cobertura superficial. La referencia específica empleada en esta investigación fue adquirida en Varienplast – Fábrica y Almacén, bajo la denominación comercial “Polisombra verde de 90 % de 4 m de ancho”. En comparación con la malla negra previamente descrita, esta malla presenta una mayor densidad de fibras y una menor fracción de área libre, características que se traducen en aperturas más reducidas y un coeficiente de sombra más elevado, lo que la convierte en un material de especial interés para evaluar el efecto de configuraciones altamente densas sobre los procesos de impacto, adhesión y drenaje de gotas en sistemas de captación de niebla.



Figura 11. Malla de polietileno al 90% de sombra.



Diametro promedio

Diámetros - malla verde (cm)	
Promedio	0.0253
Mínimo	0.010
Máximo	0.044
σ	0.008
SEM	0.001
CV%	30

Tabla 7. Resultados diámetro promedio malla verde.

El diámetro promedio de la fibra de la malla verde fue de 0.0253 cm (0.253 mm), con valores comprendidos entre 0.010 cm y 0.044 cm, lo que indica fibras significativamente más delgadas que las observadas en la malla negra. Este menor diámetro puede incrementar la probabilidad de intercepción de gotas pequeñas al aumentar el número de fibras por unidad de área, aunque también puede influir en los mecanismos de drenaje al favorecer la retención de gotas sobre la superficie.

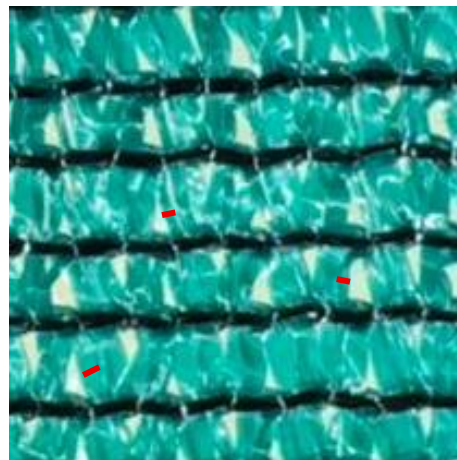


Figura 12. Ejemplo de metodología de medición de diámetros de la fibra verde.

La dispersión observada, con un coeficiente de variación del 30 %, refleja una variabilidad geométrica mayor que la registrada en la malla negra, característica de mallas de alta densidad donde el proceso de fabricación introduce heterogeneidades más marcadas en el espesor de los filamentos. No obstante, el bajo error estándar de la media (SEM = 0.001 cm) confirma que el valor promedio obtenido es estadísticamente representativo del material analizado.

Rugosidad superficial

Promedio		
1	140.161	129.345



2	135.004	
3	112.871	
RMS		
1	86.714	89.974
2	89.906	
3	93.301	

Tabla 8. Resultados rugosidad superficial promedio malla verde.

El análisis de rugosidad superficial de la malla verde arrojó valores promedio de intensidad de nivel de gris entre 112.9 y 140.2, con valores de RMS comprendidos entre 86.7 y 93.3, obtenidos a partir de tres tandas independientes de medición. Al igual que en la malla negra, estos valores corresponden a parámetros adimensionales derivados del nivel de gris, representativos de la microtextura superficial de la fibra.

Los valores de RMS ligeramente superiores a los observados en la malla negra sugieren una superficie con mayor grado de micro irregularidad, lo cual puede favorecer la adhesión inicial de las gotas de niebla al reducir la probabilidad de rebote tras el impacto. Sin embargo, combinada con diámetros de fibra más pequeños, esta mayor rugosidad puede contribuir a una mayor retención de gotas, afectando potencialmente la eficiencia del drenaje.

Densidad de fibras (pitch)

Distancias - malla verde (cm)	
Promedio	0.156
Mínimo	0.079
Máximo	0.274
σ	0.041
SEM	0.005
CV%	27
<hr/>	
Fibra por cm	6.405

Tabla 9. Resultados densidad de fibras malla verde.

La densidad de fibras de la malla verde se obtuvo a partir de un espaciamiento promedio entre filamentos de 0.156 cm, lo que corresponde a una densidad de 6.41 fibras/cm, valor considerablemente superior al de la malla negra. Esta alta densidad de fibras es coherente con el mayor porcentaje de sombra del material y genera una estructura significativamente más cerrada al paso del flujo de aire.

La variabilidad observada en el espaciamiento, con un coeficiente de variación del 27%, evidencia nuevamente la heterogeneidad geométrica propia de mallas comerciales de alta densidad. Desde el punto de vista del atrapamiento de niebla, este elevado pitch incrementa la



probabilidad de impacto de las gotas sobre las fibras, aunque puede aumentar la resistencia aerodinámica del sistema.

Apertura efectiva de la malla

Áreas - malla verde (cm²)	
Promedio	0.014
Mínimo	0.005
Máximo	0.034
σ	0.008
SEM	0.001
CV%	56

Tabla 10. Resultados apertura efectiva malla verde.

La apertura efectiva promedio de la malla verde fue de 0.014 cm², valor significativamente menor al registrado para la malla negra, reflejando una estructura mucho más cerrada. El rango de aperturas observado y el alto coeficiente de variación (56%) indican una marcada heterogeneidad en el tamaño de los huecos, característica típica de mallas con alto porcentaje de sombra y elevado número de fibras por unidad de área.

Desde el punto de vista del atrapamiento de niebla, estas aperturas reducidas limitan el paso directo del flujo de aire a través de la malla, incrementando la probabilidad de interacción entre las gotas y las fibras, aunque a costa de una mayor pérdida de carga.

Porosidad y coeficiente de sombra

Área (cm²)	
Área total	472.59
Área malla	452.25
Porosidad	4.30%
coeficiente sombra	95.70%

Tabla 11. Resultados porosidad y coeficiente de sombra malla verde.

El análisis de imagen permitió estimar una porosidad de 4.3% y un coeficiente de sombra de 95.70% para la malla verde, confirmando su carácter altamente denso. Estos valores indican que la mayor parte del área proyectada está ocupada por material sólido, con una fracción de área libre muy reducida.

El coeficiente de sombra medido experimentalmente es coherente con el valor nominal del 90% reportado por el fabricante, aunque ligeramente superior, lo cual puede atribuirse a la variabilidad del tejido y a la definición geométrica precisa basada en área proyectada. Desde el



punto de vista del atrapamiento de niebla, esta baja porosidad implica una elevada probabilidad de impacto de las gotas, pero también un aumento significativo de la resistencia aerodinámica. En consecuencia, el desempeño de esta malla dependerá en gran medida de la geometría e inclinación del recolector, más que de la modificación del material base, reforzando la relevancia del análisis geométrico desarrollado en esta investigación.

Ángulo de contacto

En el caso de la malla verde, el análisis de imagen de una gota depositada sobre la superficie permitió estimar ángulos de contacto de aproximadamente 101° y 105° en cada uno de los costados de la gota. Estos valores, aunque ligeramente menores que los obtenidos para la malla negra, se mantienen por encima de 90° , lo que indica un comportamiento hidrofóbico moderado del material. Esta diferencia sugiere una mayor interacción gota-superficie, con una tendencia ligeramente superior al esparcimiento de la gota sobre la fibra. Desde el punto de vista del atrapamiento de niebla, este comportamiento puede favorecer la adhesión inicial de las gotas, aunque también podría influir en el patrón de drenaje y en el tiempo de permanencia de las gotas sobre la malla.

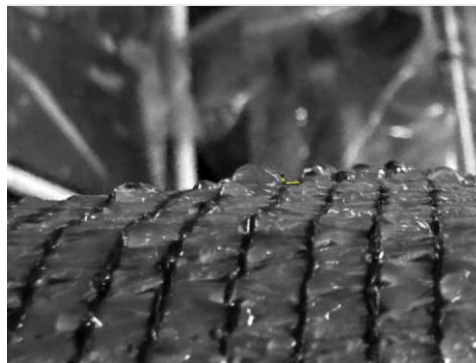


Figura 13. Ejemplo metodología ángulo de contacto malla verde.

3.3 Estructura de captación

3.3.1 Estudio de inclinaciones

A diferencia del montaje original, en esta investigación se utilizó una estructura interna de captación introduciendo una nueva configuración compuesta por tres paneles independientes de malla, los cuales permiten ajustar su ángulo de inclinación (Figura 14).

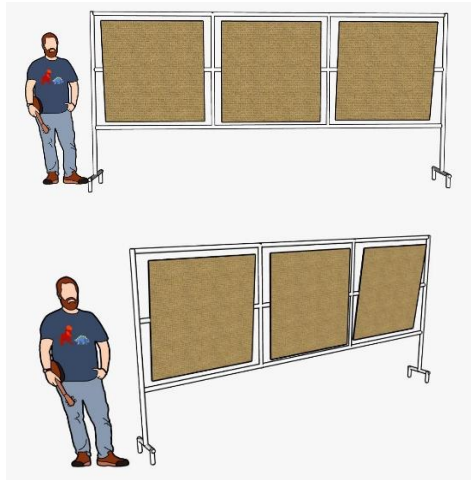


Figura 14. Esquema estructura de captación de neblina.

Los paneles fueron fabricados con malla de polietileno al 80 % de sombra, mientras que la estructura de soporte fue construida utilizando tubería de PVC de 1" y media y $\frac{3}{4}$ ", garantizando estabilidad y facilidad de ensamble. Además, se utilizaron ángulos de 90°, 70° y 45° respecto a la horizontal.



Figura 15. Sistema de captación de neblina con inclinaciones de 90°, 70° y 45°.

Para la recolección del agua captada, se implementaron tres canaletas independientes asociadas a cada uno de los paneles. El panel más alejado de la entrada, ubicado en posición vertical (90°), contaba con una canaleta que atravesaba el sistema por su parte central. El segundo panel, ubicado en la mitad, tenía su canaleta saliendo por el lado derecho del montaje, mientras que el tercer panel, disponía de una canaleta que salía por el lado izquierdo. Es



importante destacar que todo el sistema de recolección fue diseñado con pendiente para facilitar el escurrimiento natural del agua hacia afuera del área de nebulización. Además, las canaletas laterales fueron construidas con un diseño modular y móvil, lo que permitió ajustar la distancia respecto al sistema según las necesidades del experimento. Cada canaleta estaba conectada mediante tuberías de PVC también inclinadas, que conducían el agua recolectada hacia tres baldes independientes, garantizando así una medición diferenciada del volumen captado por cada panel, como se muestra en la Figura 16.

Figura 16. (a) Detalle de canaleta - movimiento. (b) Detalle de canaleta - posterior. (c) Salida del sistema - Baldes de recolección.

3.3.2 Estudio de geometrías

Como se comentó previamente, en esta fase del estudio experimental se evaluaron tres geometrías diferentes para el captador de niebla: un cono, un reloj de arena y un cubo. Con el fin de garantizar una comparación directa entre las geometrías, se consideró únicamente el área lateral efectiva de captación, sin incluir las tapas superior e inferior. El cono presentó un área lateral de 1.15 m^2 , mientras que el reloj de arena tuvo un área lateral de 1.16 m^2 (Figura 17); en el caso del cubo, el área lateral fue de 1.15 m^2 , correspondiente a una configuración con lados de 0.54 m .

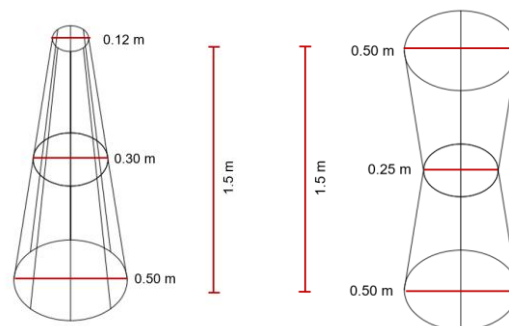


Figura 17. Dimensiones cono y reloj de arena.

La estructura del cono y del reloj de arena fue fabricada en acero al carbono de 6 mm de espesor, con uniones soldadas en puntos estratégicos para garantizar rigidez y estabilidad durante los ensayos. En contraste, el cubo se construyó utilizando tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada, seleccionada por su facilidad de ensamble y bajo peso. Para la superficie de captación se emplearon dos tipos de malla en diferentes etapas del experimento: en una primera fase se utilizó malla negra de polietileno al 80% de sombra y, posteriormente, se realizaron ensayos con malla verde de polietileno al 90% de sombra, con el fin de evaluar el efecto del material y la densidad de la malla sobre la eficiencia de recolección.



Figura 18. Captadores de diferentes geometrías.

Finalmente, para la recolección y medición del agua drenada por cada geometría, se emplearon piscinas inflables con un diámetro equivalente al de los captadores, dispuestas en la base de cada estructura para retener el agua depositada durante los ensayos. Al finalizar cada prueba experimental, el contenido acumulado en las piscinas se vertía cuidadosamente en un balde y posteriormente se medía su volumen utilizando una probeta graduada, garantizando así una cuantificación directa y reproducible del volumen de agua recolectado por cada configuración geométrica.

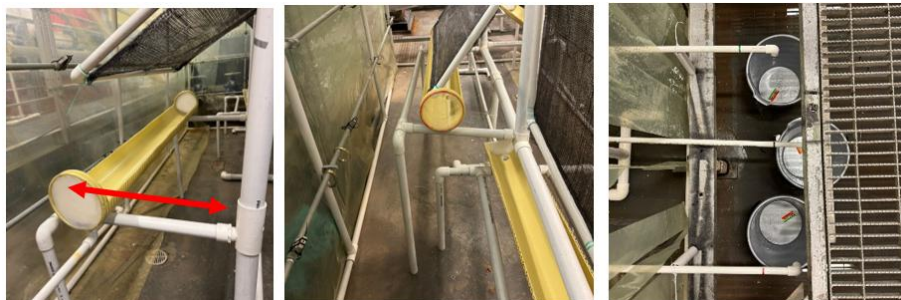


Figura 16. (a) Detalle de canaleta - movimiento. (b) Detalle de canaleta - posterior. (c) Salida del sistema - Baldes de recolección.



3.3.3 Estudio de geometrías

Como se comentó previamente, en esta fase del estudio experimental se evaluaron tres geometrías diferentes para el captador de niebla: un cono, un reloj de arena y un cubo. Con el fin de garantizar una comparación directa entre las geometrías, se consideró únicamente el área lateral efectiva de captación, sin incluir las tapas superior e inferior. El cono presentó un área lateral de 1.15 m^2 , mientras que el reloj de arena tuvo un área lateral de 1.16 m^2 (Figura 17); en el caso del cubo, el área lateral fue de 1.15 m^2 , correspondiente a una configuración con lados de 0.54 m .

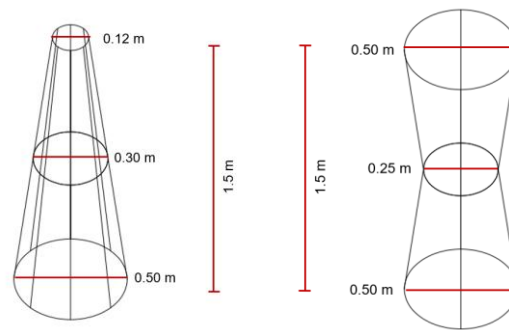


Figura 17. Dimensiones cono y reloj de arena.

La estructura del cono y del reloj de arena fue fabricada en acero al carbono de 6 mm de espesor, con uniones soldadas en puntos estratégicos para garantizar rigidez y estabilidad durante los ensayos. En contraste, el cubo se construyó utilizando tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada, seleccionada por su facilidad de ensamble y bajo peso. Para la superficie de captación se emplearon dos tipos de malla en diferentes etapas del experimento: en una primera fase se utilizó malla negra de polietileno al 80% de sombra y, posteriormente, se realizaron ensayos con malla verde de polietileno al 90% de sombra, con el fin de evaluar el efecto del material y la densidad de la malla sobre la eficiencia de recolección.



Figura 18. Captadores de diferentes geometrías.

Finalmente, para la recolección y medición del agua drenada por cada geometría, se emplearon piscinas inflables con un diámetro equivalente al de los captadores, dispuestas en la base de cada estructura para retener el agua depositada durante los ensayos. Al finalizar cada prueba experimental, el contenido acumulado en las piscinas se vertía cuidadosamente en un balde y posteriormente se medía su volumen utilizando una probeta graduada, garantizando así una cuantificación directa y reproducible del volumen de agua recolectado por cada configuración geométrica.

3.4 Casos estudiados en laboratorio

3.4.1 Estudio de inclinaciones

Con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema de captación de inclinaciones bajo distintas condiciones de flujo, se definieron tres escenarios experimentales. El Caso I consistió en mantener las 18 boquillas nebulizadoras activas, distribuidas equitativamente con 3 boquillas por lado en cada uno de los tres paneles. Este caso simuló un entorno natural con alta humedad y niebla proveniente de ambas direcciones, generando una mayor suspensión de gotas de agua alrededor del sistema.

En el Caso II, se cerraron las boquillas de un lado en cada panel, dejando activas únicamente nueve boquillas en total (tres por panel). En los paneles inclinados a 70° y 45° (ángulo respecto



a la horizontal), se mantuvieron abiertas las boquillas que daban flujo inferior, es decir que quedaban ubicadas en el costado donde el flujo quedaba debajo del panel. Esta disposición permitió generar una especie de flujo ascendente de niebla simulada hacia la superficie recolectora como se muestra en la Figura 19.

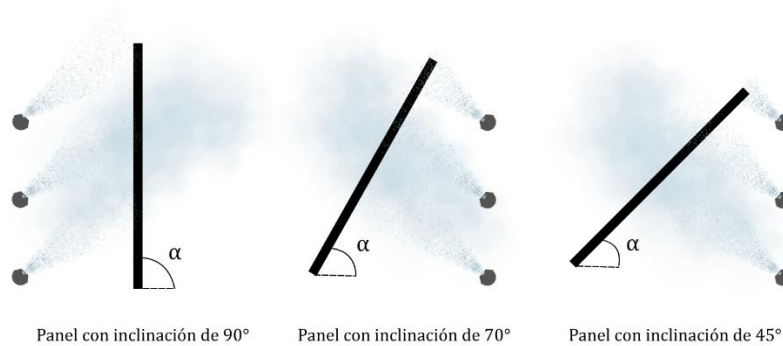


Figura 19. Esquema Caso II – Vista transversal. (elaboración propia)

Finalmente, en el Caso III , se intercambiaron las posiciones de las boquillas activas en los paneles de 70° y 45°: aquellas que estaban cerradas en el caso anterior se abrieron, y viceversa. Esto provocó que el flujo de niebla pasara de manera más lateral sobre la malla (Figura 20), una situación que se acerca más a la de la naturaleza. Es importante destacar que, en los casos II y III, el panel de 90° mantuvo su configuración constante, recibiendo siempre el mismo tipo de ataque de niebla simulada.

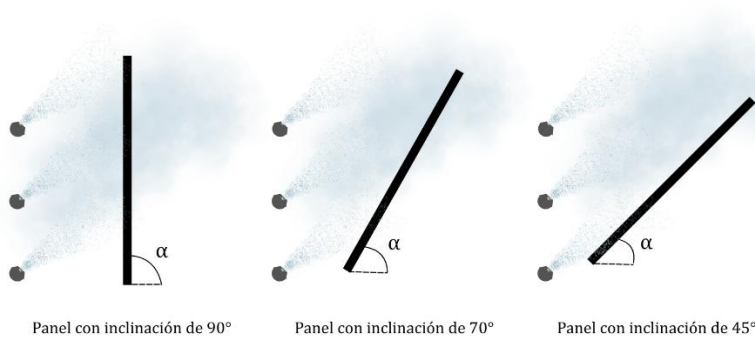


Figura 20. Esquema Caso III - Vista transversal. (elaboración propia).



Figura 21. Prueba caso II en el laboratorio. Dirección de flujo.

La siguiente tabla resume los 3 casos empleados.

Tabla 12. Casos estudiados para los paneles con inclinación.

Caso	Configuración de las boquillas	Dirección del flujo de niebla simulada
I	Todas las boquillas activas (18 en total).	Flujo uniforme desde ambos lados hacia los paneles.
II	Se cerraron las boquillas de un solo lado en cada panel (9 boquillas activas). Para los paneles de 70° y 45°, se dejaron activas las boquillas ubicadas en la parte inferior, generando una especie de flujo ascendente.	Flujo lateral en diagonal dirigido desde abajo del panel hacia arriba.
III	Se cerraron las boquillas de un lado en los paneles de 45° y 70°, dejando activas las de la parte superior.	Flujo lateral en diagonal, por encima del panel.

3.4.2 Estudio de geometrías

Para el estudio de geometrías, los escenarios experimentales se definieron a partir de la variación del material de malla que recubría cada captador. En un primer escenario, todas las estructuras geométricas (cono, reloj de arena y cubo) fueron recubiertas con malla negra de polietileno al 80 % de sombra, utilizada inicialmente en los ensayos de inclinación. En un segundo escenario, se repitieron los ensayos empleando malla verde de polietileno al 90 % de sombra en todas las geometrías. El resto de las condiciones experimentales, incluyendo la configuración del sistema de nebulización, la distancia a las boquillas y el protocolo de



medición, se mantuvieron constantes. Esta comparación permitió evaluar de manera aislada la influencia del material y la densidad de la malla sobre la eficiencia de captación, al tiempo que se garantizó coherencia con la selección del material utilizado posteriormente en las pruebas de campo por consideraciones estéticas.

3.5 Procedimiento experimental

Para todas las pruebas, se siguió un protocolo estandarizado basado en el propuesto por Serje Martínez (2024), con pequeñas adaptaciones según las características específicas del nuevo diseño estructural.

Pasos realizados en cada prueba:

1. Purga del sistema: Se eliminó el aire residual del sistema de tuberías abriendo completamente el suministro de agua por un minuto.
2. Encendido de la hidrolavadora: Se activó el sistema de alta presión y se registró la presión inicial en el manómetro.
3. Inicio de la prueba: Se cronometró el tiempo de duración de la prueba (15, 20, 30 o 45 minutos).
4. Finalización: Al terminar el tiempo establecido, se apagó la hidrolavadora y se cerró la válvula principal.
5. Medición del volumen recolectado: El agua captada en cada canaleta se midió utilizando una probeta de 1 litro.
6. Registro de datos: Los resultados fueron anotados en un formato digital similar al usado en la investigación original.

Tabla 13. Formato de registro de datos experimental.

Prueba	Presión registrada (psi)	Fecha de prueba	Volumen recolectado (L)	Tiempo de la prueba (día)	Área efectiva (m ²)	Volumen diario recolectado por metro cuadrado (L/ m ² día)
90°						
Prueba n						
70°						
Prueba n						
45°						
Prueba n						

Prueba	Presión registrada (psi)	Fecha de prueba	Volumen recolectado (L)	Tiempo de la prueba (día)	Área efectiva (m ²)	Volumen diario recolectado por metro cuadrado (L/ m ² día)



Cubo						
Prueba n						
Cono						
Prueba n						
Reloj de arena						
Prueba n						

Durante la realización de la tesis de Serje 2024, se presentó una avería en la hidrolavadora. Dentro de las recomendaciones indicadas, se señaló que era necesario permitirle periodos de descanso entre cada prueba para evitar sobrecalentamiento o daños. Por esta razón, las pruebas se realizaron con intervalos de reposo. Por ejemplo, en la prueba de 45 minutos, se operó la bomba en tres intervalos de 15 minutos encendidos, seguidos de 10 minutos de descanso entre cada intervalo.



4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Resultados y análisis – Inclinaciones

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos tras la realización de un total de 31 pruebas experimentales, distribuidas en los tres casos de estudio propuestos. Cada prueba fue diseñada para evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones específicas, con el objetivo de validar los planteamientos sobre la incidencia de la inclinación en un panel en la eficiencia de la recolección de niebla.

Primero, se presenta de manera organizada el conjunto de datos recolectados, estructurados según cada caso analizado. Para cada uno de ellos se presenta un breve análisis, para concluir con un análisis comparativo entre los 3 escenarios.

La recolección de datos comenzó el 14 de mayo de 2025, con un total de tres pruebas consecutivas realizadas durante tres días consecutivos (del 14 al 16 de mayo). Cada prueba tuvo una duración de 45 minutos y se llevó a cabo en las mismas condiciones ambientales y operativas.

Las pruebas fueron numeradas como Prueba 1, Prueba 2 y Prueba 3, respectivamente (que corresponden a las fechas del 14, 15 y 16 de mayo, respectivamente). Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 22, donde se grafica el volumen diario recolectado por metro cuadrado ($L/m^2/día$) en función de las pruebas realizadas.

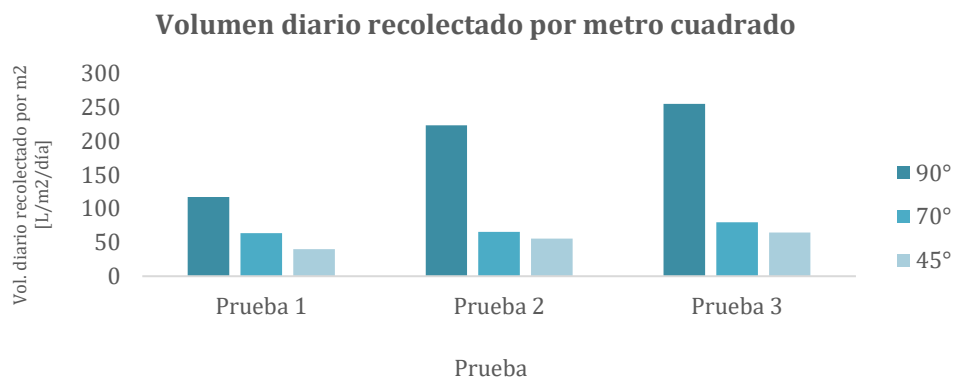


Figura 22. Resultados pruebas iniciales.

En la figura se observa claramente que el volumen de agua recolectado aumentó progresivamente en cada una de las pruebas realizadas. Esta tendencia sugiere que el sistema fue acumulando humedad a medida que avanzaban las pruebas, lo que resultó en una mejora de su desempeño. Específicamente, cuando el sistema ya había sido utilizado previamente, presentaba un estado “mojado” o “saturado”, lo cual favoreció una mayor recolección de agua en comparación con las pruebas anteriores.



Este comportamiento puede explicarse por al menos dos factores: primero, la posible presencia de condensación residual, es decir, que el sistema retenía cierta cantidad de humedad después de cada prueba, facilitando la formación de nuevas gotas en los ciclos siguientes. Segundo, un efecto de saturación en la superficie del sistema, el cual pudo haber incrementado su eficiencia en la captación de vapor de agua, especialmente en la configuración vertical (90°), donde se registraron los mayores volúmenes recolectados.

De estas pruebas iniciales se concluye que el estado previo del sistema tiene un impacto significativo en su desempeño. Cuando el sistema ya había sido utilizado en días anteriores, su capacidad para recolectar agua aumentó considerablemente. Esto sugiere que el sistema requiere un período de estabilización o calibración antes de realizar mediciones precisas, especialmente si se busca obtener resultados reproducibles en condiciones controladas. Es por esto que de aquí en adelante para cada prueba el sistema se encendió por 10 minutos para saturar el sistema antes de empezar a tomar datos.

4.1.1 Resultados Caso I

Para el Caso I se realizaron un total de 11 pruebas entre el 22 de mayo y el 13 de junio de 2025. Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 23, donde se calcula el volumen diario recolectado por metro cuadrado ($L/m^2/día$) para cada prueba, comparando tres configuraciones angulares: 90° , 70° y 45° .

Para todos los casos, las pruebas se llevaron a cabo con tiempos de duración variables, como se detalla en la Tabla 14. Este diseño experimental fue planeado con el objetivo de evaluar la consistencia de los resultados al normalizar los volúmenes recolectados en función del tiempo y la superficie ($L/m^2/día$).

Tabla 14. Duración en minutos pruebas - Caso I

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tiempo (min)	15			20			30		45		

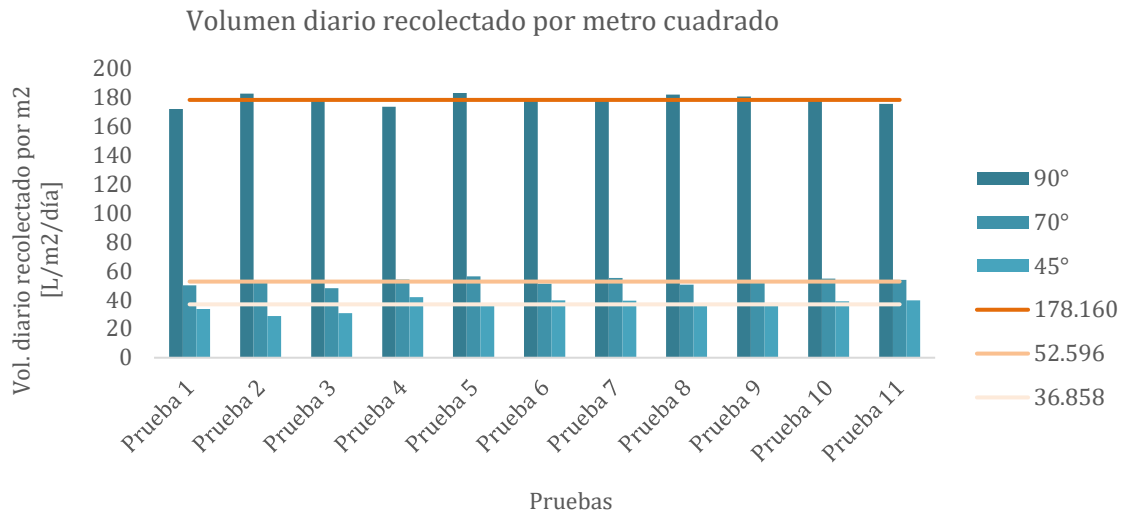


Figura 23. Resultados pruebas Caso I.

En la figura se observa que la configuración a 90° muestra los valores más altos y consistentes, con un promedio cercano a $178.2 \text{ L/m}^2/\text{día}$, lo cual sugiere que esta configuración es la más eficiente para recolectar agua. Por otro lado, la configuración a 70° presenta valores significativamente menores, con un promedio de aproximadamente $52.6 \text{ L/m}^2/\text{día}$, indicando un desempeño inferior en comparación con la configuración vertical (90°). Finalmente, la configuración a 45° registra los valores más bajos, con un promedio de $36.9 \text{ L/m}^2/\text{día}$, lo que confirma que esta configuración es la menos eficiente para recolectar agua.

Para cuantificar las variaciones entre las configuraciones angulares, se calcularon las diferencias porcentuales entre los volúmenes recolectados en cada caso. Los resultados se presentan en la Tabla 15. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para el Caso I.

Tabla 15. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para el Caso I.

Angulo de inclinación	Diferencia porcentual (%)
90°	6.0%
70°	14.5%
45°	31.0%

Además, se determinaron las eficiencias de cada configuración angular para comprender mejor el desempeño del sistema en términos de aprovechamiento del agua suministrada. Para calcular la eficiencia, se midió tanto el caudal de entrada como el caudal de salida del sistema. El caudal de entrada se estimó considerando el número de rociadores por panel (6)



multiplicado por el caudal de salida promedio de cada nebulizador, que según la tesis de Laura Serje es de 2.33 ml/s . Por otro lado, el caudal de salida se calculó dividiendo el volumen recolectado (L) por el tiempo de la prueba (s). Finalmente, la eficiencia se obtuvo mediante la relación del caudal de salida y el caudal de entrada al sistema,

Ecuación 6. Eficiencia de recolección del panel.

$$\eta = \frac{Q_{\text{salida del sistema}}}{Q_{\text{entrada al sistema}}} \times 100$$

lo cual permitió cuantificar qué porcentaje del agua suministrada fue efectivamente recolectado. Los resultados se muestran en la Tabla 16.

Tabla 16. Eficiencia de recolección para cada ángulo - Caso I.

Ángulo de inclinación	Eficiencia
90°	14.7%
70°	4.4%
45°	3.1%

4.1.2 Análisis de los Resultados – Caso I

Los resultados obtenidos en el Caso I permiten concluir lo siguiente:

1. Efecto del ángulo de operación: El sistema alcanza su máximo desempeño cuando opera a 90° , lo cual coincide con la intuición física de que esta configuración maximiza la exposición de la superficie recolectora al vapor de agua. Las configuraciones a 70° y 45° muestran una disminución progresiva en el volumen recolectado, lo que puede atribuirse a una menor eficiencia en la captación de vapor debido a la reducción en el área expuesta o cambios en la dinámica de condensación.
2. Consistencia del sistema: Aunque existen pequeñas variaciones en los resultados individuales, el sistema muestra una alta consistencia en términos de desempeño, especialmente en la configuración a 90° . Esto sugiere que el diseño y la implementación del sistema son robustos y reproducibles bajo las condiciones controladas de este estudio.
3. Relevancia del ángulo en la eficiencia del sistema: Estos resultados refuerzan la importancia del ángulo de operación no solo en términos del volumen recolectado, sino también en la eficiencia del sistema. Una configuración más óptima reduce el



desperdicio de agua durante el proceso de recolección, siendo la posición a 90° la más eficiente con un promedio del 14.75%.

- Viabilidad del sistema: Aunque existe una diferencia en la eficiencia entre las configuraciones, bajo estas condiciones controladas, las tres opciones lograron recolectar una cantidad considerable de agua, comparable con estudios en campo. Por esta diferencia se justifica la propuesta del Caso II para evaluar el sistema bajo otras condiciones ambientales que intenten simular mejor un ecosistema en campo.

4.1.3 Resultados Caso II

Para el Caso II se realizaron un total de 10 pruebas entre el 25 de junio y el 4 de julio de 2025. En este escenario experimental, se cerraron las boquillas de un solo lado en cada panel (9 boquillas activas en total), manteniéndose abiertas las ubicadas en la parte inferior de los paneles inclinados a 70° y 45°, con el fin de generar un flujo ascendente de niebla, por debajo del panel recolector, como se muestra en la Figura 19.

En este caso, la duración de las pruebas se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Duración en minutos pruebas - Caso II.

Prueba	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tiempo (min)	15			20			30		45		

Los resultados obtenidos se resumen en la Figura 24, donde se grafica el volumen diario recolectado por metro cuadrado $L/m^2/día$ para cada prueba, comparando las tres configuraciones angulares: 90°, 70° y 45°.

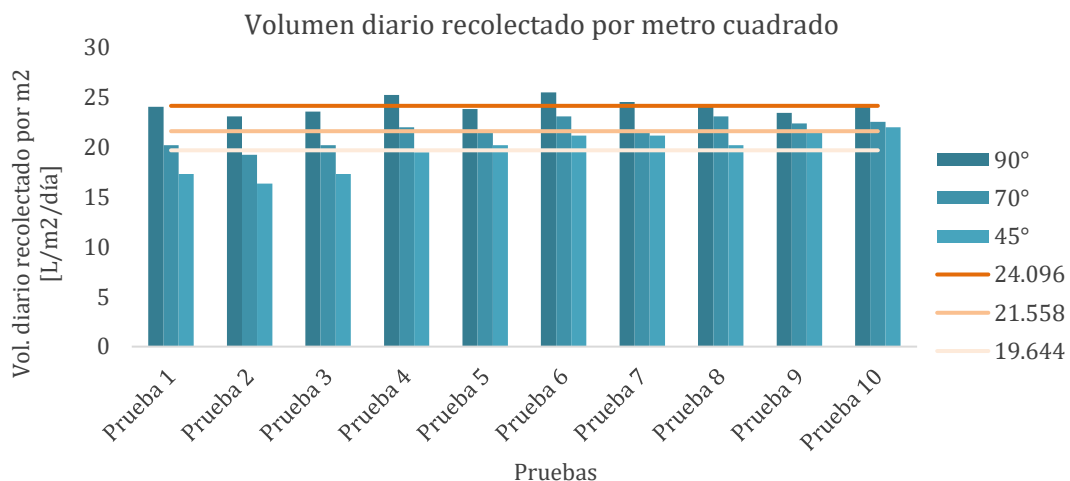


Figura 24. Resultados pruebas Caso II.



En la figura se observa que el panel de 90° sigue siendo el más eficiente, registrando volúmenes promedio cercanos a $24 L/m^2/día$, lo cual es consistente con los resultados del Caso I. Este comportamiento confirma que la orientación vertical favorece una mayor captación de agua debido a su exposición directa al flujo de niebla simulada.

El panel de 70° muestra un desempeño intermedio, con volúmenes recolectados aproximados de $22 L/m^2/día$. Esta configuración se beneficia del flujo ascendente, pero su inclinación reduce ligeramente la eficiencia en comparación con el panel vertical. Además, los resultados son significativamente peores que los obtenidos en el Caso I, donde el valor promedio era de $52.53 L/m^2/día$ lo cual era de esperarse ya que el patrón de flujo de un solo lado disminuye el caudal de entrada.

Por otro lado, el panel de 45° registra los menores volúmenes recolectados entre los tres paneles, con un valor promedio de $19.64 L/m^2/día$. Aunque esta configuración también se afecta del flujo lateral desde abajo, su menor ángulo de inclinación limita su capacidad de captar agua efectivamente, pues las gotas de agua caen antes de viajar por la malla hasta la canalera, manteniendo un rendimiento inferior a los otros dos paneles.

Para cuantificar las variaciones entre las configuraciones angulares, se calcularon las diferencias porcentuales entre los volúmenes recolectados en cada caso. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 18. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para el Caso II.

Ángulo de inclinación	Diferencia porcentual (%)
90°	9.43%
70°	16.67%
45°	25.68%

Estos valores indican que, aunque el panel de 90° sigue siendo el más eficiente, las diferencias relativas entre las configuraciones aumentan en comparación con el Caso I. Esto sugiere que el cambio en el patrón de flujo tiene un impacto significativo en la distribución de la eficiencia entre las distintas inclinaciones, ya que se recoge menos volumen de agua.

Para determinar las eficiencias de cada configuración angular en términos de aprovechamiento del agua suministrada, se consideró esta vez que el caudal de entrada estaba dado únicamente por 3 boquillas rociadoras para cada panel. Se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 19. Eficiencia de recolección para cada ángulo - Caso II.



Ángulo de inclinación	Eficiencia
90°	4.20%
70°	3.76%
45°	3.43%

Los niveles absolutos de eficiencia son significativamente menores en comparación con el Caso I. Esto se debe principalmente al menor caudal de entrada generado por el cierre de las boquillas en un solo lado, lo cual reduce la cantidad de agua disponible para la recolección. Además, no hay tanta diferencia en la eficiencia de recolección para los 3 ángulos. Sugiriendo que para un flujo ascendente no existe mayor diferencia si se inclinan los paneles o no.

4.1.4 Análisis de los Resultados – Caso II

Los resultados obtenidos en el Caso II permiten concluir lo siguiente:

1. Efecto del patrón de flujo en la recolección: Al modificar el patrón de flujo de niebla simulada (cerrando las boquillas de un solo lado y generando un flujo ascendente por debajo de los paneles inclinados) se observó una reducción significativa en los volúmenes recolectados. Este cambio afectó principalmente a las configuraciones inclinadas (70° y 45°), cuyo desempeño depende más del posicionamiento relativo entre el flujo de entrada y la superficie recolectora.
2. Persistencia del mejor desempeño del panel vertical: A pesar del cambio en el patrón de flujo, el panel de 90° mantuvo su superioridad sobre las otras configuraciones, registrando un volumen promedio de 24 L/m²/día . Esto refuerza la idea de que la orientación vertical no solo maximiza el área efectiva expuesta al flujo de niebla, sino que también favorece una trayectoria más directa y eficiente de las gotas hacia la canalera de recolección.
3. Impacto negativo del flujo ascendente en paneles inclinados: En comparación con el Caso I, los paneles inclinados mostraron una caída considerable en su desempeño. El panel de 70° pasó de recolectar un promedio de 52.6 L/m²/día a tan solo 22 L/m²/día, mientras que el panel de 45° disminuyó de 36.9 L/m²/día a 19.64 L/m²/día. Esta reducción se atribuye principalmente a que el flujo ascendente no logra interactuar de forma óptima con la superficie inclinada, dificultando la captura efectiva de las gotas.
4. Eficiencia global reducida: La eficiencia del sistema disminuyó considerablemente respecto al Caso I, debido a la reducción del caudal de entrada generado por el uso limitado de rociadores (9 boquillas activas). Los valores de eficiencia fueron: 4.20% para el panel de 90°, 3.76% para el de 70° y 3.43% para el de 45°. Aunque el panel



vertical sigue siendo el más eficiente, estos resultados indican que el diseño actual puede optimizarse para mejorar el aprovechamiento del agua suministrada bajo este tipo de flujo.

5. Necesidad de ajustar el patrón de flujo para paneles inclinados: Los datos sugieren que el flujo ascendente desde debajo de los paneles inclinados no es el más adecuado para maximizar la recolección de agua, ni tampoco simula muy bien lo que pasa en la naturaleza. Las gotas tienden a dispersarse antes de impactar o una vez se adhieren, se caen por acción de la gravedad antes de llegar a la canaleta, lo cual reduce la cantidad de agua recolectada. Por esta razón, se plantea como necesario implementar un nuevo escenario experimental (Caso III) en el que los rociadores se ubiquen por encima de la malla diagonal en los paneles de 70° y 45° (del otro lado), de tal forma que el flujo de niebla caiga por gravedad sobre la superficie recolectora, facilitando una interacción más directa y controlada.

4.1.5 Resultados Caso III

Para el Caso III, se realizaron un total de 10 pruebas el 24 de julio del 2026. En este escenario experimental, se modificó la ubicación de los rociadores en los paneles inclinados (70° y 45°), colocándolos por encima de la malla diagonal, con el objetivo de generar un flujo más descendente y lateral de niebla hacia la superficie recolectora. Este diseño permitió evaluar cómo el cambio en la dirección del flujo afecta la eficiencia de recolección en comparación con los patrones de flujo ascendente evaluados en el Caso II.

La duración de las pruebas varió de la misma forma que en el caso II para poder realizar un ejercicio comparativo mejor (ver Tabla 17. Duración en minutos pruebas - Caso II.). Los resultados obtenidos de este caso se resumen en la Figura 25.

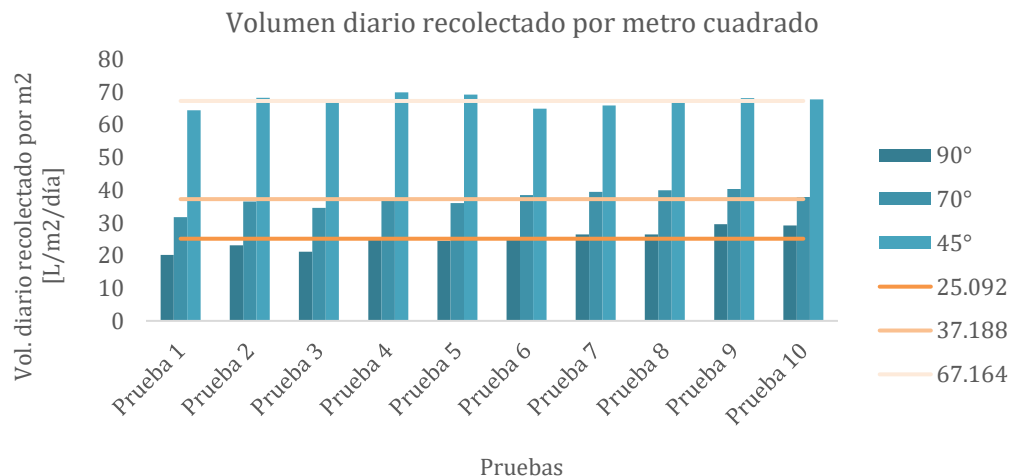


Figura 25. Resultados pruebas Caso III.



En la gráfica se observa que el panel de 45° muestra los mejores resultados, registrando volúmenes promedio cercanos a $67.16 L/m^2/día$, lo cual es significativamente superior a los valores obtenidos en los casos anteriores. Este comportamiento sugiere que la orientación inclinada favorece una mayor captación de agua cuando el flujo de niebla cae directamente sobre la superficie recolectora, aprovechando mejor la dinámica de condensación y deslizamiento de las gotas.

El panel de 70° también presenta un desempeño notable, con volúmenes recolectados aproximados de $37.18 L/m^2/día$. Esta configuración se beneficia del flujo descendente, pero su inclinación intermedia reduce ligeramente la eficiencia en comparación con el panel de 45°. Sin embargo, estos resultados son significativamente mejores que los obtenidos en el Caso II, donde el valor promedio era de $22 L/m^2/día$.

Por otro lado, el panel de 90° registra los menores volúmenes recolectados entre los tres paneles, con un valor promedio de $25.09 L/m^2/día$. Esto es consistente con los resultados del caso II donde el panel vertical recogía en promedio $24.096 L/m^2/día$.

Las diferencias porcentuales entre los volúmenes recolectados en cada caso se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 20. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para el Caso III.

Ángulo de inclinación	Diferencia porcentual (%)
90°	31.71%
70°	21.43%
45°	7.90%

Estos valores indican que, aunque el panel de 45° es el que es más consistente en cuando a sus datos recolectados. Los otros dos paneles se mantienen similares en diferencia porcentual a los de los casos I y II.

Para el cálculo de la eficiencia, se hizo el mismo análisis que para el caso II, donde se consideran 3 nebulizadores por panel. A continuación, se presentan los datos que se obtuvieron para la eficiencia en esta configuración.

Tabla 21. Eficiencia de recolección para cada ángulo - Caso III.

Ángulo de inclinación	Eficiencia
90°	4.37%
70°	6.48%



45°	11.66%
-----	--------

Estos niveles absolutos de eficiencia son significativamente mayores en comparación con el caso anterior donde el flujo llegaba por debajo de la malla, especialmente para los paneles inclinados. Esto se debe principalmente a que el flujo descendente permite una interacción más efectiva entre el vapor de agua y la superficie recolectora, maximizando la captación de gotas. Además, hay que resaltar que son valores que se acercan mucho más al caso inicial (I).

4.1.6 Análisis de los Resultados – Caso III

Los resultados obtenidos en el Caso III permiten concluir lo siguiente:

1. Efecto del patrón de flujo descendente - lateral: Al modificar la dirección del flujo de niebla simulada (ubicando los rociadores por encima de la malla diagonal y generando un flujo descendente hacia los paneles inclinados), se observó una mejora significativa en los volúmenes recolectados para las configuraciones inclinadas (70° y 45°). Este cambio optimiza la interacción entre el flujo de niebla y la superficie recolectora, reduciendo pérdidas y aumentando la eficiencia global del sistema.
2. Superioridad del panel inclinado a 45°: En este caso, el panel de 45° mostró el mejor desempeño, con un volumen promedio de 67.16 L/m²/día. Este resultado confirma que la inclinación facilita el deslizamiento de las gotas hacia la canalera recolectora, especialmente cuando el flujo de niebla cae directamente sobre la superficie. La trayectoria más corta y controlada de las gotas en esta configuración maximiza la captación de agua.
3. Mejora en el desempeño del panel de 70°: Comparado con los resultados del Caso II, el panel de 70° mostró una recuperación significativa en su eficiencia, alcanzando un promedio de 37.18 L/m²/día. Este aumento se debe principalmente al flujo descendente, que permite una mejor distribución del vapor de agua sobre la superficie inclinada, reduciendo la dispersión y aumentando la retención de gotas.
4. Mayor equilibrio en la eficiencia entre configuraciones: En comparación con los casos anteriores, las diferencias relativas entre las configuraciones angulares disminuyen considerablemente en el Caso III. Esto indica que el flujo descendente mejora la distribución de la eficiencia entre las distintas inclinaciones, minimizando las disparidades observadas en los flujos ascendentes.
5. Aumento general en la eficiencia del sistema: Los niveles absolutos de eficiencia aumentaron respecto al caso II, especialmente para los paneles inclinados. Los valores de eficiencia fueron: 4.37% para el panel de 90°, 6.48% para el de 70° y 11.66% para el de 45°.



4.2 Resultados y análisis – Geometrías

En este apartado se presentan y analizan los resultados obtenidos a partir de la segunda fase experimental en laboratorio, correspondiente a la evaluación de captadores con geometrías tridimensionales. En total se realizaron 20 pruebas experimentales, distribuidas en dos casos de estudio, con el objetivo de analizar la influencia de la geometría del captador y del tipo de malla en la eficiencia de recolección de niebla.

Los dos casos analizados en esta etapa corresponden a pruebas realizadas con malla negra con una porosidad del 80 % y con malla verde con una porosidad del 90 %. Para cada tipo de malla se llevaron a cabo 10 pruebas, manteniendo condiciones experimentales controladas con el fin de permitir una comparación directa entre ambos escenarios. La recolección de datos se realizó entre el 1 de octubre y el 4 de diciembre, periodo durante el cual se buscó abarcar distintas condiciones ambientales dentro del entorno de laboratorio.

Cada prueba tuvo una duración comprendida entre 30 y 45 minutos. Adicionalmente, previo al inicio de cada ensayo se estableció un período de calentamiento del sistema de 10 minutos, con el fin de saturar las mallas y garantizar condiciones iniciales consistentes entre pruebas. Esta decisión metodológica se tomó con base en los resultados de la fase experimental anterior, donde se evidenció que el estado previo del sistema influye de manera significativa en los volúmenes recolectados. A continuación, se presentan los resultados organizados por caso de estudio, seguidos de un análisis comparativo entre las distintas configuraciones evaluadas.

4.2.1 Resultados malla negra al 80% de sombra

Para esta etapa experimental se realizaron un total de 10 pruebas, correspondientes a la evaluación de tres captadores con geometría tridimensional (cubo, cono y reloj de arena), todos recubiertos con malla negra al 80% de sombra. Las pruebas se llevaron a cabo entre el 1 de octubre y el 18 de noviembre de 2025, bajo condiciones operativas similares, con el objetivo de comparar el desempeño de cada geometría en términos de recolección de agua.

Las pruebas tuvieron duraciones variables entre 30 y 45 minutos, como se detalla en la Tabla 22, y fueron diseñadas para evaluar la consistencia de los resultados al normalizar los volúmenes recolectados en función del tiempo y del área efectiva de cada captador, expresando los resultados en términos de volumen diario recolectado por metro cuadrado ($L/m^2/día$).

Tabla 22. Duración en minutos pruebas – malla negra

Prueba	1	2	5	6	7	9	10	3	4	8
Tiempo (min)	30							45		



Los resultados obtenidos para las tres geometrías se resumen en la Figura 26, donde se presenta el volumen diario recolectado por metro cuadrado para cada una de las pruebas realizadas.

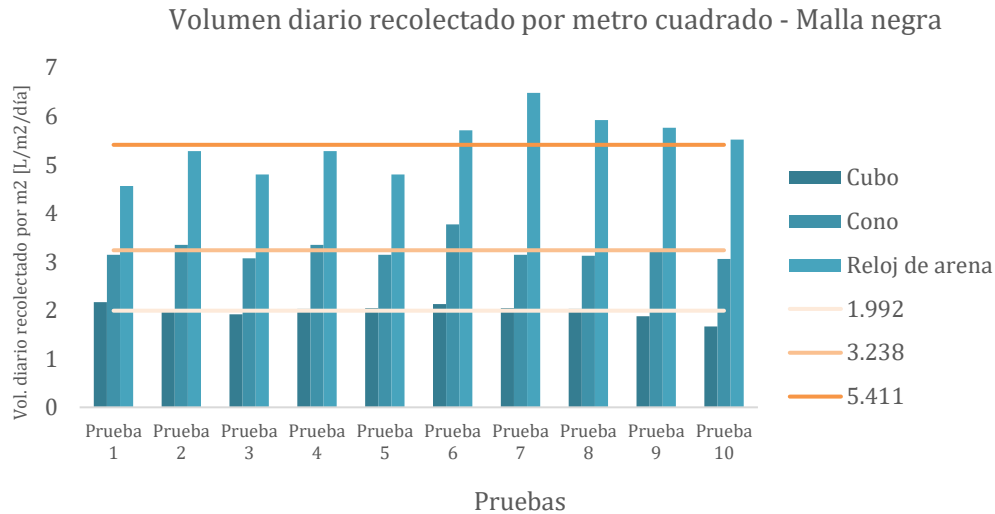


Figura 26. Resultados pruebas malla negra.

En la figura se observa que el captador con geometría de reloj de arena presenta, de manera consistente, los valores más altos de recolección, con un promedio de $5.41 \text{ L/m}^2/\text{día}$. Este comportamiento indica que la geometría convexa y tridimensional favorece tanto la captación de la niebla como el drenaje eficiente de las gotas hacia el sistema de recolección.

El captador cónico muestra un desempeño intermedio, con un valor promedio de $3.24 \text{ L/m}^2/\text{día}$, superando claramente al cubo en todas las pruebas realizadas. La forma cónica permite una mejor guía del flujo y del escurrimiento de las gotas, lo que se traduce en un mayor volumen recolectado en comparación con una geometría plana o con aristas marcadas.

Por su parte, el captador cúbico registra los valores más bajos de recolección, con un promedio de $1.99 \text{ L/m}^2/\text{día}$. Aunque el cubo logra captar agua en todas las pruebas, su geometría limita la eficiencia del drenaje, ya que las gotas deben desprenderse de la malla para caer por gravedad, lo que aumenta las pérdidas por evaporación o desprendimiento prematuro.

Para cuantificar la variabilidad de los resultados dentro de cada geometría, se calcularon las diferencias porcentuales entre los volúmenes recolectados, las cuales se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para la malla negra.



Geometría	Diferencia porcentual (%)
Cubo	23.1%
Cono	18.9%
Reloj de arena	29.6%

Los resultados muestran que el reloj de arena presenta la mayor variabilidad relativa (29.6%), seguido del cubo (23.1%) y el cono (18.9%). A pesar de esta variabilidad, el reloj de arena mantiene los valores absolutos más altos de recolección, lo que indica que, aunque es más sensible a pequeñas variaciones en las condiciones experimentales, su desempeño global sigue siendo superior.

Finalmente, se calcularon las eficiencias de recolección para cada geometría, considerando el caudal de entrada suministrado por los nebulizadores y el caudal de salida correspondiente al volumen efectivamente recolectado. Los resultados se presentan en la Tabla 24.

Tabla 24. Eficiencia de recolección para cada ángulo - malla negra.

Geometría	Eficiencia %
Cubo	7.9%
Cono	12.7%
Reloj de arena	18.5%

Los valores obtenidos confirman que el reloj de arena alcanza la mayor eficiencia de recolección (18.5%), seguido por el cono (12.7%) y, finalmente, el cubo (7.9%). Estos resultados refuerzan la hipótesis de que las geometrías convexas tridimensionales no solo favorecen la captación de la niebla, sino también el transporte y drenaje eficiente del agua recolectada, reduciendo pérdidas y mejorando el desempeño global del sistema.

4.2.2 Análisis de los Resultados – malla negra

Los resultados obtenidos en las pruebas con malla negra al 80% de sombra permiten concluir lo siguiente:

1. Efecto de la geometría del captador: Los resultados evidencian una diferencia cuantitativa significativa entre las geometrías evaluadas. El captador con geometría de reloj de arena presentó el mayor desempeño, con un volumen promedio normalizado de $5.41 L/m^2/día$, seguido por el cono con $3.24 L/m^2/día$, mientras que el cubo registró el menor valor con $1.99 L/m^2/día$. Esto implica que el reloj de arena recolectó aproximadamente 2.7 veces más agua que el cubo y cerca de 1.7 veces más que el cono,



confirmando la superioridad de las geometrías convexas tridimensionales frente a una geometría plana tradicional.

2. Consistencia del sistema experimental: A pesar de que las pruebas se realizaron con dos duraciones distintas (30 y 45 minutos), los valores normalizados muestran una variabilidad relativamente baja dentro de cada geometría. El cono presentó el comportamiento más estable, con fluctuaciones moderadas alrededor de su valor promedio, mientras que el reloj de arena, aunque mostró una mayor dispersión en términos porcentuales, mantuvo consistentemente los valores absolutos más altos en todas las pruebas. El cubo, por su parte, presentó el menor rango de valores, aunque también el desempeño más bajo.
3. Relación entre geometría y eficiencia de recolección: El análisis de eficiencia refuerza las diferencias observadas en los volúmenes recolectados. El reloj de arena alcanzó una eficiencia promedio del 18.5%, seguido por el cono con 12.7%, mientras que el cubo registró solo 7.9%. En términos relativos, el reloj de arena fue más de dos veces más eficiente que el cubo, y aproximadamente 1.5 veces más eficiente que el cono. Estas diferencias indican que las geometrías convexas no solo captan mayores volúmenes de agua, sino que también aprovechan de manera más efectiva el caudal suministrado al sistema.
4. Implicaciones para el diseño de captadores de niebla: Los resultados cuantitativos obtenidos con la malla negra al 80% muestran que la elección de la geometría puede generar diferencias superiores al 100% en el desempeño del sistema. La marcada superioridad del reloj de arena y del cono sugiere que los captadores tridimensionales guían el flujo de niebla de forma más eficiente y facilitan el drenaje de las gotas hacia el sistema de recolección. Esto respalda la hipótesis de que las geometrías convexas son más adecuadas para escenarios con flujos de viento variables y justifica su posterior evaluación en condiciones más cercanas al campo.

4.2.3 Resultados malla verde al 90% de sombra

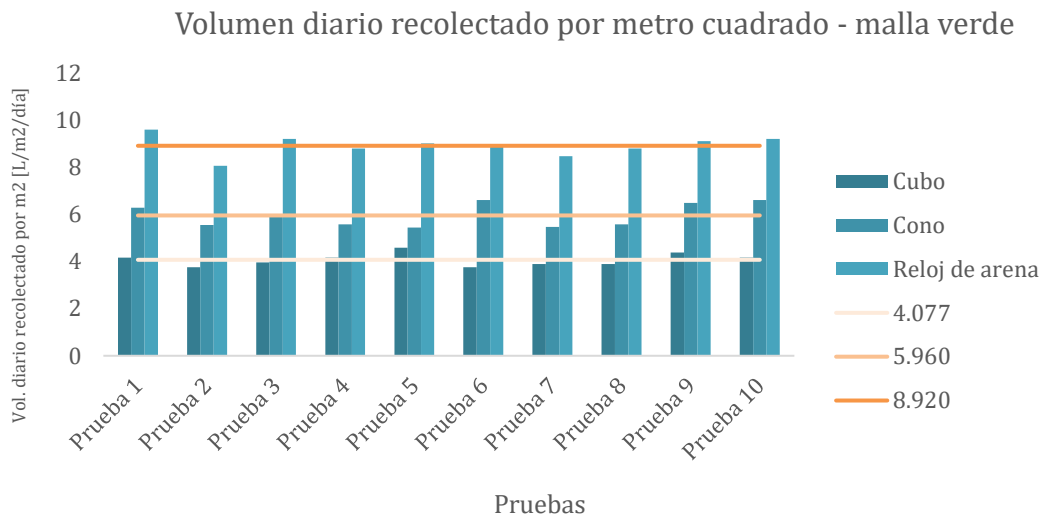
Para este caso se realizaron un total de 10 pruebas experimentales utilizando malla verde al 90% de sombra, entre el 21 de noviembre y el 4 de diciembre de 2025. Al igual que en el caso de la malla negra, las pruebas se llevaron a cabo bajo condiciones controladas de presión y con un tiempo de calentamiento previo de 10 minutos, con el fin de saturar la malla y garantizar la consistencia de los datos recolectados.

Las pruebas tuvieron duraciones variables entre 30 y 45 minutos, lo cual permitió evaluar la estabilidad del sistema y normalizar los volúmenes recolectados en función del tiempo y del área efectiva de cada captador ($L/m^2/día$).


Tabla 25. Duración en minutos pruebas – malla verde.

Prueba	1	3	5	6	9	10	2	4	7	8
Tiempo (min)	30						45			

Los resultados obtenidos para las tres geometrías evaluadas (cubo, cono y reloj de arena) se presentan en la Figura 27, donde se muestra el volumen diario recolectado por metro cuadrado ($L/m^2/día$) para cada prueba.


Figura 27. Resultados pruebas malla verde.

En la figura se observa que, de manera consistente, el captador con geometría de reloj de arena presenta los mayores volúmenes de recolección a lo largo de todas las pruebas, seguido por el cono, mientras que el cubo registra los valores más bajos. Los valores promedio normalizados evidencian un comportamiento estable entre pruebas, con una menor dispersión relativa en comparación con la malla negra, lo cual sugiere que la malla verde al 90 % proporciona una mayor uniformidad en el proceso de captación.

Para cuantificar la variabilidad entre pruebas dentro de cada geometría, se calcularon las diferencias porcentuales de los volúmenes recolectados, cuyos resultados se presentan en la Tabla 26.

Tabla 26. Diferencia porcentual de los volúmenes recolectado para la malla verde.

Geometría	Diferencia porcentual (%)
-----------	---------------------------



Cubo	18.18%
Cono	17.72%
Reloj de arena	16.00%

Los valores obtenidos indican que las diferencias porcentuales son relativamente similares entre las tres geometrías, con valores del 18.18% para el cubo, 17.72% para el cono y 16.00% para el reloj de arena, lo cual refleja una mayor estabilidad del sistema en comparación con las pruebas realizadas con malla negra.

Adicionalmente, se calcularon las eficiencias de recolección para cada geometría, considerando la relación entre el caudal de salida y el caudal de entrada al sistema, de la misma forma que en los casos anteriores. Los resultados se resumen en la Tabla 27.

Tabla 27. Eficiencia de recolección para cada ángulo - malla verde.

Geometría	Eficiencia %
Cubo	16.7%
Cono	24.1%
Reloj de arena	31.7%

Los valores de eficiencia muestran un incremento notable respecto a la malla negra, alcanzando 16.7% para el cubo, 24.1% para el cono y 31.7% para el reloj de arena. Este comportamiento sugiere que la mayor densidad de la malla verde favorece la deposición de gotas y reduce las pérdidas por desprendimiento o evaporación, mejorando el aprovechamiento del agua suministrada al sistema.

4.2.4 Análisis de los Resultados - malla verde

Los resultados obtenidos para la malla verde al 90% de sombra permiten extraer las siguientes conclusiones:

1. Desempeño relativo entre geometrías: El captador con geometría de reloj de arena presentó el mejor desempeño global, con una eficiencia promedio del 31.7%, seguido por el cono con 24.1%, mientras que el cubo registró el valor más bajo con 16.7%. Esto implica que el reloj de arena fue aproximadamente 1.9 veces más eficiente que el cubo y cerca de 1.3 veces más eficiente que el cono, confirmando una ventaja clara de las geometrías convexas frente a la geometría plana tradicional.
2. Comparación cuantitativa del volumen recolectado: En términos de volumen diario recolectado por metro cuadrado, el reloj de arena presentó valores promedio cercanos a $8.9 \text{ L}/\text{m}^2/\text{día}$, mientras que el cono alcanzó aproximadamente $6.0 \text{ L}/\text{m}^2/\text{día}$ y el



cubo alrededor de $4.1 L/m^2/día$. Esto significa que, bajo las mismas condiciones experimentales, el reloj de arena recolectó más del doble de agua que el cubo y aproximadamente un 48% más que el cono, evidenciando una mejora sustancial asociada a la geometría tridimensional y convexa.

3. Consistencia y estabilidad del sistema: Las diferencias porcentuales entre pruebas fueron relativamente bajas y similares para las tres geometrías (entre 16% y 18%), lo que indica una buena estabilidad experimental y una respuesta consistente del sistema a lo largo del periodo de medición. Esta menor dispersión en comparación con la malla negra sugiere que la malla verde al 90% favorece un comportamiento más uniforme en la captación de agua.
4. Influencia de la malla en la eficiencia de captación: El aumento general de la eficiencia para todas las geometrías, en comparación con los resultados obtenidos con malla negra, indica que la mayor densidad de sombreado (90%) contribuye a mejorar la deposición de gotas sobre la superficie recolectora. En particular, las geometrías convexas parecen beneficiarse más de esta condición, ya que la combinación entre curvatura, inclinación variable y mayor retención superficial favorece el escurrimiento controlado hacia el sistema de drenaje.
5. Relevancia del diseño geométrico bajo condiciones controladas: Los resultados confirman que, incluso bajo condiciones de laboratorio controladas y con un mismo material de malla, la geometría del captador sigue siendo un factor determinante en la eficiencia del sistema. Aunque el cubo logra recolectar agua de manera consistente, su desempeño es significativamente inferior al de los colectores convexas, reforzando la hipótesis de que estos últimos ofrecen una interacción más eficiente con el flujo de niebla y una mejor conducción del agua recolectada.
6. Implicaciones para el diseño de prototipos en campo: El comportamiento observado en este caso sugiere que el uso de mallas de mayor densidad, combinado con geometrías convexas, puede ser una estrategia efectiva para maximizar la recolección de agua. Estos resultados sirven como base para justificar la selección del cono y del reloj de arena como geometrías de interés para las etapas posteriores del estudio y para su evaluación bajo condiciones reales en campo.

4.3 Análisis pruebas de laboratorio en conjunto

El conjunto de pruebas de laboratorio realizadas en las distintas fases experimentales permitió evaluar de manera sistemática la influencia de la inclinación del panel, el patrón de flujo, la geometría del captador y el tipo de malla sobre la eficiencia de recolección de niebla. En total, se llevaron a cabo más de 50 pruebas experimentales, todas bajo condiciones



altamente controladas, lo que permitió aislar el efecto de cada variable y extraer conclusiones comparables entre escenarios.

Uno de los aprendizajes más relevantes de esta etapa es que, en condiciones de laboratorio, la configuración geométrica y la dirección del flujo tienen un impacto mayor sobre el desempeño del sistema que pequeñas variaciones en el tiempo de ensayo. En la primera fase (Casos I, II y III), se evidenció que la orientación del panel y el patrón de flujo determinan el orden de eficiencia entre configuraciones. El panel vertical (90°) fue el más eficiente bajo flujos frontales y ascendentes, alcanzando eficiencias cercanas al 14.7 % en el Caso I. Sin embargo, cuando el flujo se volvió descendente y lateral (Caso III), los paneles inclinados, especialmente el de 45° , superaron claramente al panel vertical, alcanzando eficiencias de hasta 11.66 %, lo que confirma que la interacción entre flujo y superficie recolectora es un factor clave.

En la segunda fase experimental, centrada en la evaluación de geometrías tridimensionales, los resultados mostraron diferencias aún más marcadas. Independientemente del tipo de malla utilizada, las geometrías convexas (cono y reloj de arena) superaron de manera consistente al cubo. Con malla negra al 80%, el reloj de arena recolectó aproximadamente 2.7 veces más agua que el cubo, mientras que con malla verde al 90 % esta relación se mantuvo cercana a un factor de 2. En términos de eficiencia, el reloj de arena alcanzó valores de 18.5% con malla negra y 31.7% con malla verde, lo que representa un incremento absoluto superior a 13 puntos porcentuales asociado únicamente al cambio de malla.

Un aspecto clave a reconocer es que todas las pruebas se realizaron en un ambiente altamente controlado, caracterizado por un encerramiento plástico que generó condiciones de alta humedad y baja variabilidad ambiental. En esta etapa no se introdujo variabilidad en la velocidad del viento, lo cual limita la extrapolación directa de los valores absolutos de eficiencia a condiciones reales de campo. No obstante, este control permitió comparar configuraciones bajo un mismo marco experimental, fortaleciendo la validez de las conclusiones relativas y de los análisis comparativos.

Adicionalmente, los resultados evidenciaron oportunidades claras de mejora en el sistema de nebulización, particularmente en el diseño del drenaje y en el tamaño del espacio de ensayo. En varios escenarios se observó que parte del agua suministrada no interactuaba de manera óptima con las superficies recolectoras o se perdía antes de llegar a la canalera, lo cual afecta directamente la eficiencia calculada. Un espacio de mayor tamaño permitiría una mejor distribución del flujo y reduciría efectos de recirculación y saturación artificial del ambiente.

A partir de estas limitaciones, se identifica como una línea clara de trabajo futuro la implementación de un túnel de viento, que permita controlar de forma independiente variables como velocidad, dirección y turbulencia del flujo, acercando el comportamiento del sistema a condiciones más representativas del entorno natural. Este tipo de infraestructura



permitiría evaluar no solo el desempeño promedio, sino también la robustez de cada geometría frente a variaciones dinámicas del flujo.

En conjunto, las pruebas de laboratorio permitieron validar de manera consistente que:

- (i) la geometría del captador es un factor determinante, con mejoras de hasta 200% en volumen recolectado al pasar de geometrías planas a convexas;
- (ii) la densidad de la malla influye directamente en la eficiencia, con incrementos superiores al 70% al pasar de malla negra al 80% a malla verde al 90%; y
- (iii) la dirección del flujo puede modificar completamente el orden de desempeño entre configuraciones.

Estos aprendizajes constituyen la base técnica para la selección de las configuraciones evaluadas posteriormente en campo, donde se espera que la interacción con condiciones ambientales reales permita validar y complementar los resultados obtenidos en laboratorio.



5. CASO DE ESTUDIO SUBACHOQUE

5.1 Contexto y caracterización de la zona de estudio

El caso de estudio se desarrolló en el municipio de Subachoque, localizado en la provincia de Sabana Occidente del departamento de Cundinamarca, Colombia, en la Cordillera Oriental de los Andes. El área específica de instalación del sistema de captación se encuentra aproximadamente en las coordenadas 4.972620° N, -74.212570° O, en una zona rural caracterizada por condiciones típicas de alta montaña. El casco urbano del municipio se sitúa a una altitud promedio cercana a los 2650 – 2680 m s. n. m., lo que lo ubica dentro del rango altitudinal donde se presentan con frecuencia fenómenos de nubosidad baja y neblina persistente (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2023).

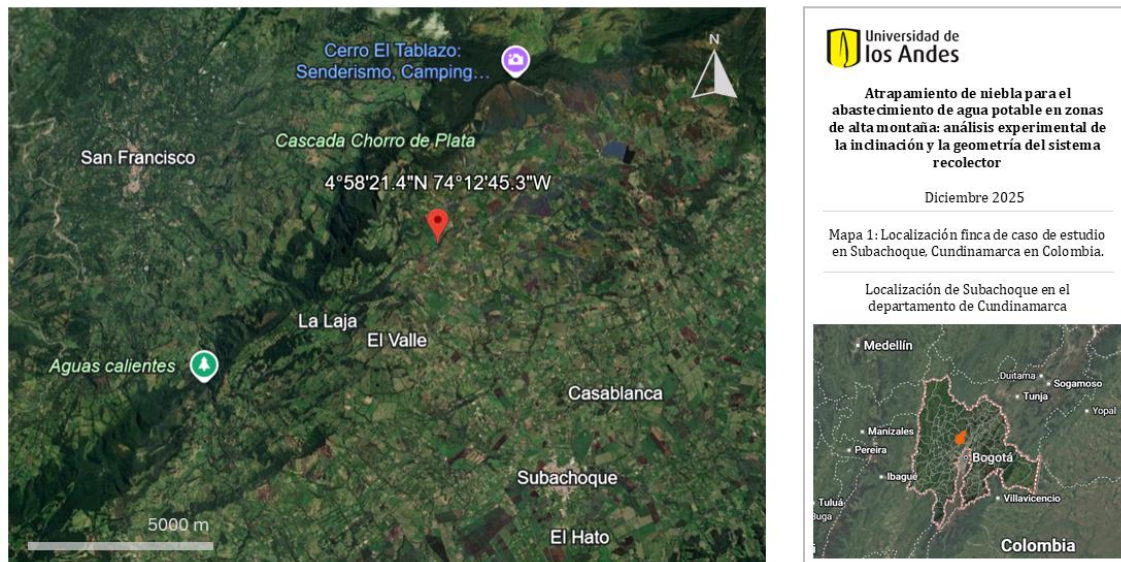


Figura 28. Localización de finca caso de estudio Subachoque - Cundinamarca. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales de Google Earth (2025).

Desde el punto de vista climático, Subachoque presenta un clima frío de montaña, con temperaturas medias anuales que oscilan entre 8 y 18 °C, alta humedad relativa y una marcada presencia de nubosidad durante gran parte del año (Weather Atlas, 2024). Estas condiciones favorecen la formación recurrente de niebla, especialmente durante las primeras horas de la mañana y en periodos nocturnos, cuando la combinación de enfriamiento radiativo y elevada humedad del aire propicia la condensación de microgotas en suspensión.

El predio donde se desarrolló el trabajo de campo corresponde a una finca de carácter privado, la cual fue facilitada para la instalación experimental del sistema de captación de niebla. Este terreno presenta una variación altitudinal interna significativa, con cotas aproximadas que



oscilan entre los 2915 m s. n. m. en su punto más bajo y los 3059 m s. n. m. en la parte más alta del predio. Su localización estratégica, en cercanía al complejo de páramos de Guerrero y Agua Blanca, así como al cerro El Tablazo (Figura 29c), genera condiciones ambientales propicias para la presencia frecuente de nubosidad baja y niebla orográfica. De acuerdo con registros climáticos regionales, la humedad relativa promedio en esta zona de Subachoque suele situarse entre el 80 % y el 90 % durante gran parte del año, con valores elevados especialmente en horas nocturnas y matutinas (IDEAM, 2022; Weather Atlas, 2024). Adicionalmente, la morfología del terreno da lugar a la formación de un cañón natural dentro del predio (Figura 29b), el cual actúa como un corredor topográfico que favorece el ascenso y canalización de masas de aire húmedo. Este efecto parece orientar el flujo de neblina de manera recurrente en dirección a la finca, incrementando la frecuencia e intensidad de los eventos de captación y reforzando la idoneidad del sitio para evaluar el desempeño de sistemas atrapanieblas en condiciones reales de alta montaña.



Figura 29. Fotografías de la finca en Subachoque. (a) Dinámica de neblina en la zona baja de la finca a las 9 am. (b) Nieblina encañonada en la parte baja de la finca vista desde la parte más alta. (c) Proximidad de la finca al cerro El Tablazo.

La topografía de la zona se caracteriza por pendientes moderadas a pronunciadas y variaciones altitudinales significativas en distancias cortas, lo que genera microclimas locales y patrones variables de circulación del aire (IDEAM, 2022). Estas características influyen directamente en la dinámica del flujo de viento y en la frecuencia e intensidad de los eventos de niebla, factores determinantes para el desempeño de los sistemas de captación.

Desde el punto de vista anemológico, el comportamiento del viento en la zona de estudio fue analizado a partir de los registros históricos de la estación climatológica Primavera La, operada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) a través del Sistema de Información Climatológica e Hidrológica (SICLICA). Esta estación, localizada en el municipio de Subachoque a una altitud aproximada de 2590 m s. n. m., presenta condiciones representativas



del entorno del predio de estudio. Los datos mensuales correspondientes al periodo 1991–2014 muestran una clara predominancia de vientos provenientes de los cuadrantes Este (E) y Noreste (NE), con apariciones ocasionales de direcciones Noroeste (NW) y Sureste (SE). Estas direcciones son coherentes con la configuración topográfica regional y con la influencia de los relieves circundantes, como el cerro El Tablazo y los complejos de páramo cercanos, que favorecen la canalización del flujo de aire húmedo hacia las zonas más elevadas. En cuanto a la intensidad del viento, las velocidades medias mensuales oscilan principalmente entre 1.2 y 2.6 m/s, con valores frecuentes alrededor de 1.5 – 2.2 m/s, rango considerado favorable para procesos de captación de niebla. Estas condiciones permiten el transporte sostenido de microgotas en suspensión sin generar fuerzas excesivas que limiten su adhesión y coalescencia sobre las superficies recolectoras, reforzando la idoneidad del sitio para la evaluación de sistemas atrapanieblas en condiciones reales de alta montaña (CAR, 2024).

Adicionalmente, se realizaron mediciones in situ de velocidad del viento y temperatura del aire durante las visitas de campo, utilizando un mini termo–anemómetro Extech. Las mediciones se efectuaron en horario diurno, coincidiendo con los periodos de inspección y operación del sistema de captación. Los resultados mostraron velocidades de viento variables, con valores mínimos registrados de 0,2 m/s y máximos de hasta 3,7 m/s, lo cual se encuentra dentro del rango favorable para procesos de captación de niebla. Asimismo, el equipo registró una temperatura promedio del aire de 17,9 °C durante las mediciones, valor consistente con las condiciones climáticas diurnas características de la zona de estudio.



Figura 30. Ejemplo de medición de velocidad de viento in situ con anemómetro.

En este contexto, Subachoque constituye un sitio representativo para la evaluación de tecnologías de atrapamiento de niebla en zonas de alta montaña, ya que combina condiciones ambientales favorables para la captación con accesibilidad logística para la instalación y monitoreo del sistema. El estudio de campo realizado en esta zona permite contrastar los resultados obtenidos en laboratorio con el comportamiento real de un captador de geometría



no convencional expuesto a condiciones naturales, aportando evidencia experimental relevante para la validación del enfoque propuesto en esta investigación.

5.2 Diseño e instalación del captador en campo

Al finalizar la primera etapa de la investigación (Tesis I), y a partir de la revisión bibliográfica y de los resultados obtenidos en los ensayos experimentales de inclinación en laboratorio, se propusieron diversas configuraciones geométricas para los captadores de niebla. Estas propuestas buscaban cumplir con dos criterios principales: presentar superficies convexas con inclinaciones cercanas a 45° , con el fin de optimizar la intercepción de gotas, y facilitar un drenaje eficiente del agua recolectada. En la Figura 31 se ilustran las geometrías conceptuales evaluadas durante esta etapa de diseño.

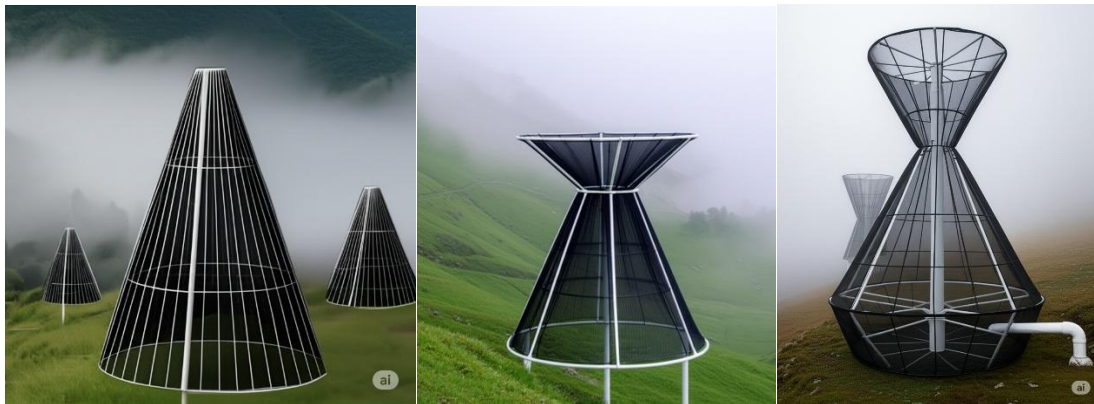


Figura 31. Propuestas iniciales de geometrías. (a) Cono. (b) Reloj de arena. (c) Figura tridimensional más compleja.

No obstante, al considerar la factibilidad constructiva, la facilidad de montaje en campo y la replicabilidad en contextos rurales, se decidió implementar en el estudio de campo un captador con geometría cónica y, como sistema de referencia, un captador con geometría cúbica. La selección del cono respondió principalmente a su mayor simplicidad constructiva frente a otras geometrías propuestas, como el reloj de arena, sin perder el carácter tridimensional y convexo de interés para el análisis. De este modo, se mantuvo la comparación fundamental entre una geometría no convencional convexa y una geometría plana tradicional, representada por el cubo, permitiendo evaluar su desempeño bajo condiciones ambientales reales sin comprometer la viabilidad técnica del sistema.

El captador con geometría cónica fue fabricado utilizando tubería de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada, empleando uniones tipo “T”, codos y tricodos para conformar la estructura principal. Cada cono presentaba una longitud de lado de 0,79 m, lo que corresponde a un área lateral aproximada de $2,5 \text{ m}^2$, y fue instalado a una altura de 55 cm sobre el nivel del suelo. En total se construyeron tres captadores cónicos, todos con dimensiones y características geométricas idénticas, con el fin de garantizar la comparabilidad de los resultados obtenidos en campo.



Figura 32. Estructura para el captador en forma de cono.

Para la conformación de las generatrices y el armazón lateral del cono se utilizó tubería de PVC de $\frac{3}{4}$ de pulgada, con una longitud total de 2,10 m. La estructura incorporó tres circunferencias principales: una circunferencia basal de 1,10 m de diámetro, una circunferencia intermedia de 0,70 m de diámetro ubicada a 1,0 m de altura desde el suelo, y una circunferencia superior de 0,24 m de diámetro. Para un área lateral de 4.2 m². Estas circunferencias fueron elaboradas, en su mayoría, a partir de aros plásticos tipo “ula-ula” utilizados comúnmente en juegos infantiles; en los casos donde no fue posible, se emplearon circunferencias formadas con tubería de riego del mismo diámetro.

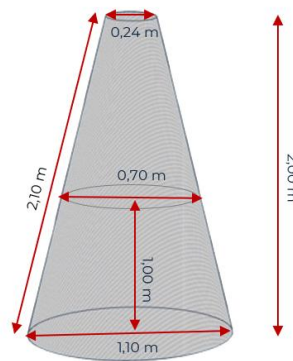


Figura 33. Dimensiones estructura principal de los conos.

Adicionalmente, se incorporaron dos circunferencias externas suplementarias con el objetivo de incrementar la rigidez estructural del captador. Estas circunferencias no atravesaban la estructura principal de PVC, sino que se dispusieron de manera externa, funcionando como elementos de amarre. Esta solución constructiva permitió mantener la forma cónica durante la



instalación de la malla de polietileno, evitando deformaciones y asegurando la estabilidad geométrica del captador durante su operación en campo.



Figura 34. Estructura para los captadores en forma de cono.

Para la instalación en campo, se mantuvo el mismo principio de recolección de agua empleado en los ensayos de laboratorio, utilizando piscinas inflables como elementos de captación del agua drenada; no obstante, en este caso se seleccionaron piscinas de mayor diámetro, acordes con las dimensiones de los captadores y el volumen potencial de agua recolectada. Esta solución permitió una recolección eficiente y sencilla del agua, así como una posterior medición del volumen captado.

Con el fin de garantizar la estabilidad estructural de los captadores frente a las condiciones de viento presentes en la zona de estudio, se implementó un sistema de anclaje mediante tensores. Para cada captador se dispusieron cuatro cuerdas fijadas en la parte superior de la estructura, orientadas hacia los cuatro puntos cardinales, las cuales fueron ancladas al suelo mediante varillas de acero. Este sistema de tensado permitió reducir el desplazamiento y la vibración de las estructuras, asegurando su correcta posición durante los periodos de operación en campo.

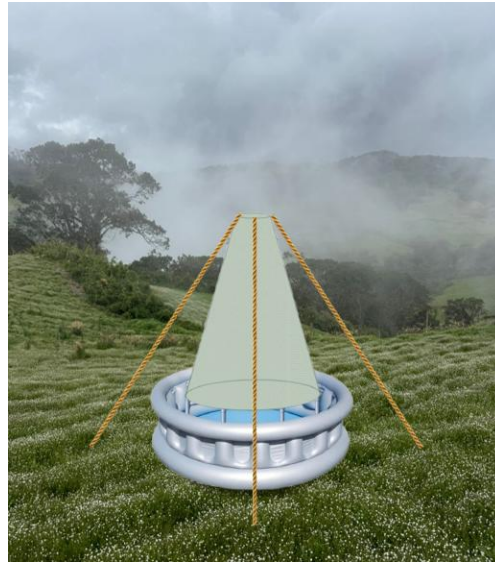


Figura 35. Propuesta de montaje en campo.

Finalmente, todos los sistemas de captación fueron recubiertos con malla de polietileno verde al 90% de sombra, seleccionada principalmente por criterios estéticos, ya que su color y apariencia se integran mejor con el entorno natural y evocan la forma de un árbol, reduciendo el impacto visual del sistema en el paisaje.

La instalación en campo se llevó a cabo el 30 de octubre de 2025. Los captadores fueron diseñados con un sistema modular que permitió su fácil armado y desarmado, facilitando tanto el transporte como su instalación en los diferentes puntos del predio. Dentro de la finca se definieron tres escenarios de evaluación, seleccionados en función de su ubicación topográfica y su potencial exposición a eventos de neblina.





Figura 36. Proceso de instalación en campo 30 de octubre de 2025.

El Caso I correspondió a la ubicación en la parte más baja del predio, cercana al cañón y situada en el borde de un precipicio. En este punto se instalaron un captador de geometría cúbica y uno de geometría cónica, con el objetivo de comparar su desempeño bajo condiciones presumiblemente favorables para la captación, dado que se esperaba una mayor interacción con la neblina ascendente. El Caso II consistió en la instalación de un captador cónico en una zona de altura intermedia de la finca, aproximadamente a 2 km del primer escenario y con un desnivel cercano a 150 m. Este se encontraba además al lado de un pequeño cuerpo de agua. Finalmente, el Caso III correspondió a la instalación de un captador cónico en la parte más alta del predio, en las inmediaciones de la vivienda del cuidador de la finca, Don Luis.



Figura 37. Instalación 30 de octubre de 2025. (a) Caso I - Cubo y cono. (b) Caso II - Cono. (c) Caso III - Cono.

Esta distribución espacial permitió evaluar el desempeño del captador cónico bajo distintas condiciones topográficas y de exposición ambiental, así como contrastar su comportamiento con una geometría plana tradicional en un entorno real de alta montaña.

La siguiente tabla resume los 3 casos que se propusieron inicialmente.

Tabla 28. Casos iniciales estudiados en campo.

Caso	Configuración del captador	Ubicación y condiciones del entorno
I	Un captador cúbico y un captador cónico instalados de manera contigua. Ambos recubiertos con malla de polietileno verde al 90%.	Parte más baja del predio, cercana a un caño y ubicada en el borde de un precipicio. Zona con alta exposición esperada a la neblina ascendente canalizada por la topografía.



II	Un captador de geometría cónica recubierto con malla de polietileno verde al 90%.	Zona de altura intermedia del predio, aproximadamente a 2 km del Caso I y con un desnivel cercano a 100 m. Condiciones intermedias de exposición a neblina.
III	Un captador de geometría cónica recubierto con malla de polietileno verde al 90%.	Parte más alta del predio, próxima a la vivienda del cuidador. Condiciones de mayor exposición al viento y menor confinamiento topográfico.

Posterior a la instalación de los captadores en campo, se alcanzaron a recolectar algunos datos preliminares; sin embargo, el día 5 de noviembre se presentó un evento de viento intenso que afectó significativamente la estabilidad de los montajes. Como resultado, los sistemas correspondientes al Caso I fueron desplazados: el captador cónico, junto con su piscina de recolección, fue arrastrado hacia el fondo del precipicio, imposibilitando su recuperación, mientras que el captador cúbico quedó atascado en la vegetación antes del borde del abismo, presentando daños en la estructura de tuberías y pérdida del sistema de drenaje. Adicionalmente, el captador cónico del Caso II sufrió un desplazamiento parcial, aunque permaneció estructuralmente íntegro.



Figura 38. Fotografías de la visita del 8 de noviembre de 2025 - daños al captador cúbico.

Durante la visita de verificación realizada el 8 de noviembre se evaluó el estado de los montajes y, considerando las limitaciones de tiempo, disponibilidad de materiales y la necesidad de garantizar continuidad experimental, en la visita del 13 de noviembre se procedió a reconfigurar el diseño del estudio. En esta nueva fase, el Caso I correspondió a un captador cónico instalado en la ubicación intermedia del predio, cercano a un pequeño cuerpo de agua, incorporando un mayor número de sensores para mejorar su estabilidad. El Caso II incluyó un captador cónicos y un captador cúbico, ubicados en la parte alta del predio, junto a la vivienda del cuidador, uno correspondiente al cono original que resistió el evento de viento y otro



restaurado a partir de los elementos recuperados del cubo, ambos reforzados con sistemas adicionales de anclaje.

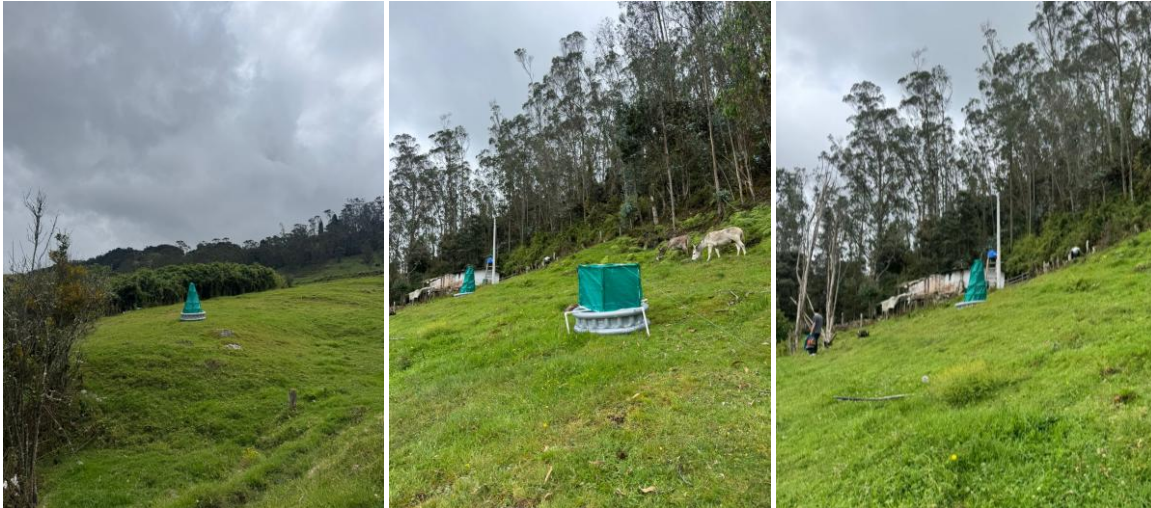


Figura 39. Fotografías visita 13 de noviembre. (a) Nuevo caso I - Cono. (b) y (c) Nuevo caso II – Cubo y cono.

Esta decisión permitió continuar con la evaluación comparativa del desempeño de geometrías convexas bajo condiciones reales, priorizando la seguridad, la viabilidad operativa y la consistencia metodológica del estudio.

La siguiente tabla resume los casos definitivos para el montaje en campo.

Tabla 29. Casos definitivos estudiados en campo.

Caso	Ubicación en el predio	Geometría del captador	Condiciones de instalación y estabilidad
I	Zona intermedia de la finca, cercana a un pequeño cuerpo de agua (estancamiento).	Cono	Captador cónico reforzado con un mayor número de tensores anclados al suelo en los cuatro puntos cardinales.
II	Parte alta del predio, junto a la vivienda del cuidador.	Cono y cubo	Dos captadores: uno cónico correspondiente al montaje original que resistió el evento de viento y otro restaurado (cubo) a partir de elementos recuperados, ambos con refuerzo adicional mediante tensores.

5.3 Protocolo de monitoreo y medición en campo



El protocolo de monitoreo y medición en campo estuvo fuertemente condicionado por la localización y accesibilidad del predio donde se instaló el sistema de captación. Como se evidenció en el mapa de localización, la finca se encuentra en una zona rural retirada del casco urbano de Subachoque, a aproximadamente 20 minutos en vehículo desde el pueblo. Adicionalmente, el acceso al predio presenta limitaciones significativas, por lo que cada visita debió realizarse en una camioneta 4x4 con tracción reforzada, lo cual restringió la frecuencia y duración de las campañas de monitoreo.

En total se realizaron seis visitas al predio, comprendidas entre el 18 de septiembre, cuando se llevó a cabo el reconocimiento inicial del terreno y la evaluación de las condiciones para la instalación de los captadores, y el 29 de noviembre, fecha correspondiente a las últimas actividades de seguimiento. Durante todo el proceso, el apoyo de Don Luis, cuidador de la finca, y de su familia fue fundamental para el desarrollo del estudio. En una primera etapa, Don Luis colaboró con la supervisión general de los montajes; posteriormente, su hija Danna, de 16 años, fue capacitada para realizar la recolección sistemática de las mediciones, lo cual permitió dar continuidad al monitoreo en ausencia de la investigadora.

La recolección del agua captada se realizó inicialmente mediante revisiones cada 12 horas, a las 6:00 a. m., al inicio del día, y a las 6:00 p. m., antes del anochecer. Sin embargo, tras las primeras semanas de monitoreo se evidenció que, durante el día, no se acumulaba un volumen significativo de agua, por lo que la recolección se concentró principalmente en las horas de la mañana. La frecuencia efectiva de recolección dependió en gran medida de las condiciones climáticas: en días lluviosos, las piscinas inflables utilizadas para el drenaje se vaciaban completamente y se reiniciaba el conteo, retomando las revisiones cada 12 horas hasta alcanzar nuevamente un volumen suficiente para su medición. Debido a la alta ocurrencia de eventos de lluvia hacia finales de noviembre, el número de datos útiles obtenidos durante este periodo fue limitado.

El procedimiento de medición consistía en transferir el agua recolectada desde la piscina inflable a un balde mediante un recipiente pequeño. Posteriormente, el volumen se medía utilizando una probeta graduada de 1 L, la cual fue marcada con números de mayor tamaño para facilitar la lectura (Figura 40). En el mismo momento de la medición, Danna enviaba el valor registrado mediante un mensaje de WhatsApp, lo que permitió asociar cada dato con su fecha correspondiente y llevar un control continuo de la información recolectada.

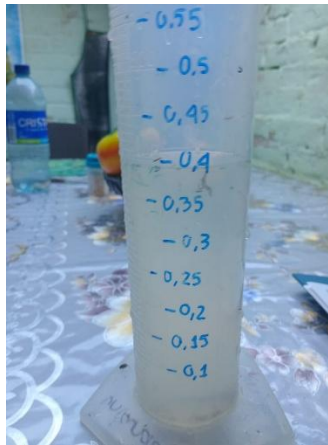


Figura 40. Ejemplo de evidencia de medición por parte de Danna.

Es importante reconocer que un montaje experimental en condiciones de campo presenta limitaciones inherentes frente al control técnico que se logra en laboratorio. En este caso, no fue posible medir variables como la evapotranspiración ni aislar completamente la influencia de la precipitación, la cual representó una de las principales restricciones del estudio. Asimismo, aunque una práctica deseable hubiera sido la medición sistemática de la velocidad local del viento mediante un anemómetro portátil, esto no fue viable debido a que el equipo pertenecía al Departamento de Ingeniería Mecánica y no podía ser prestado durante periodos prolongados. No obstante, dadas las condiciones logísticas, temporales y técnicas disponibles, el protocolo implementado representó la mejor alternativa para obtener datos experimentales en un contexto real, aportando información valiosa sobre el desempeño de los captadores bajo condiciones naturales de operación.

5.4 Resultados y observaciones en campo

5.4.1 Resultados casos planteados inicialmente

Antes de iniciar formalmente el monitoreo correspondiente a los casos de estudio definidos inicialmente (Casos I, II y III), se presentó el evento de viento intenso que afectó de manera significativa los montajes en campo. Como se describió en el capítulo anterior, el captador correspondiente al Caso I (ubicado en la parte más baja del predio, al borde del precipicio) fue completamente desplazado y no pudo ser recuperado. En consecuencia, no fue posible obtener una serie de datos representativa para este escenario inicial.

Por esta razón, los resultados que se presentan a continuación corresponden únicamente a los datos recolectados para los montajes que permanecieron operativos durante el periodo de monitoreo: el captador cónico ubicado en la zona intermedia del predio, cercano a un pequeño estancamiento de agua (Caso II), y el captador cónico instalado en la parte alta de la finca, junto a la vivienda del cuidador (Caso III). Ambos sistemas compartían la misma geometría, área



efectiva de captación y material de recubrimiento, lo que permitió comparar su desempeño bajo distintas condiciones topográficas y microclimáticas.

La Tabla 30 resume los volúmenes de agua recolectados durante las pruebas realizadas en campo, así como los valores normalizados de volumen diario recolectado por unidad de área efectiva, calculados para un periodo de 12 horas (0.5 días). Para ambos casos se consideró un área efectiva de captación de 4.3 m², correspondiente al área lateral del captador cónico instalado en campo.

Tabla 30. Primeros resultados de los casos propuestos inicialmente para campo.

Prueba	Fecha de prueba	Volumen recolectado (L)	Tiempo de la prueba (día)	Área efectiva (m ²)	Volumen diario recolectado por metro cuadrado (L/ m ² día)	Promedio
Caso III						
Prueba 1	04/11/2025	0.040	0.5	4.3	0.019	0.102
Prueba 2	08/10/2025	0.170	0.5		0.079	
Prueba 3	12/11/2025	0.300	0.5		0.140	
Prueba 4	13/11/2025	0.370	0.5		0.172	
Caso II						
Prueba 1	04/11/2025	0.100	0.5	4.3	0.047	0.202
Prueba 2	08/11/2025	0.400	0.5		0.186	
Prueba 3	12/11/2025	0.540	0.5		0.251	
Prueba 4	13/11/2025	0.700	0.5		0.326	

En el Caso III, correspondiente al cono ubicado en la parte alta del predio, los volúmenes recolectados variaron entre 0.040 L y 0.370 L por prueba, lo que se tradujo en valores normalizados de captación diaria entre 0.019 y 0.172 L/m²·día. El valor promedio obtenido para este caso fue de 0.102 L/m²·día. Estos resultados sugieren una captación moderada, consistente con una ubicación más expuesta y con menor influencia directa de acumulación de humedad proveniente del terreno circundante.

Por su parte, el Caso II, ubicado en la zona intermedia de la finca y próximo a un cuerpo de agua estancada, presentó volúmenes recolectados significativamente mayores, que oscilaron entre 0.100 L y 0.700 L por prueba. Los valores normalizados correspondientes se ubicaron entre 0.047 y 0.326 L/m²·día, con un promedio de 0.202 L/m²·día, aproximadamente el doble del valor observado en el Caso III. Esta diferencia sugiere que la proximidad a zonas con mayor disponibilidad de humedad y condiciones favorables para la formación de neblina puede tener una influencia determinante en la eficiencia de captación, incluso cuando la geometría y el material del captador son los mismos.



En términos generales, aunque el número de datos obtenidos en campo es limitado y estuvo condicionado por factores climáticos y logísticos, los resultados evidencian una tendencia clara: la ubicación topográfica y el contexto microclimático del captador tienen un impacto significativo en el volumen de agua recolectado. Asimismo, los valores obtenidos permiten validar, en condiciones reales, la viabilidad del uso de geometrías convexas como el cono para la captación de niebla, complementando los resultados obtenidos previamente en laboratorio.

5.4.2 Resultados casos definitivos

Si bien los registros obtenidos durante las primeras pruebas en campo permitieron identificar tendencias preliminares en el comportamiento de los captadores, el análisis más robusto del desempeño del sistema se realizó a partir de los casos definitivos I y II, para los cuales se lograron recopilar diez mediciones consecutivas bajo condiciones relativamente comparables. Estos casos corresponden a montajes reforzados estructuralmente, que permanecieron estables tras los eventos de viento registrados al inicio del monitoreo, lo que permitió una evaluación más confiable de la eficiencia de captación.

La Tabla 31 presenta los resultados de volumen recolectado, normalizados como volumen diario recolectado por metro cuadrado de área efectiva, para los captadores cónicos del Caso I y Caso II, así como para el captador cúbico asociado al Caso II. En todos los ensayos se consideró un tiempo de prueba de 0.5 días (12 horas), correspondiente al periodo nocturno–matutino, en el cual se observó la mayor acumulación de agua.

Tabla 31. Resultados de los casos propuestos para campo.

Prueba	Fecha de prueba	Volumen recolectado (L)	Tiempo de la prueba (día)	Área efectiva (m ²)	Volumen diario recolectado por metro cuadrado (L/ m ² día)	Promedio
Caso I - Cono						
Prueba 1	18/11/2025	0.700	0.5	4.3	0.326	0.298
Prueba 2	22/11/2025	0.670			0.312	
Prueba 3	25/11/2025	0.580			0.270	
Prueba 4	27/11/2025	0.720			0.335	
Prueba 5	03/12/2025	0.700			0.326	
Prueba 6	06/12/2025	0.750			0.349	
Prueba 7	10/12/2025	0.670			0.312	
Prueba 8	15/12/2025	0.500			0.233	
Prueba 9	19/12/2025	0.520			0.242	
Prueba 10	20/12/2025	0.600			0.279	



Prueba	Fecha de prueba	Volumen recolectado (L)	Tiempo de la prueba (día)	Área efectiva (m ²)	Volumen diario recolectado por metro cuadrado (L/ m ² día)	Promedio Cubo
Caso II						
Cono						
Prueba 1	18/11/2025	0.950	0.5	4.3	0.442	0.376
Prueba 2	22/11/2025	0.900			0.419	
Prueba 3	25/11/2025	0.750			0.349	
Prueba 4	27/11/2025	0.850			0.395	
Prueba 5	03/12/2025	0.850			0.395	
Prueba 6	06/12/2025	0.900			0.419	
Prueba 7	10/12/2025	0.800			0.372	
Prueba 8	15/12/2025	0.680			0.316	
Prueba 9	19/12/2025	0.700			0.326	
Prueba 10	20/12/2025	0.700			0.326	
Cubo						
Prueba 1	18/11/2025	0.400	0.5	2.5	0.320	0.278
Prueba 2	22/11/2025	0.400			0.320	
Prueba 3	25/11/2025	0.320			0.256	
Prueba 4	27/11/2025	0.350			0.280	
Prueba 5	03/12/2025	0.400			0.320	
Prueba 6	06/12/2025	0.380			0.304	
Prueba 7	10/12/2025	0.400			0.320	
Prueba 8	15/12/2025	0.250			0.200	
Prueba 9	19/12/2025	0.280			0.224	
Prueba 10	20/12/2025	0.300			0.240	

Para el Caso I (cono), ubicado en la zona intermedia del predio, los volúmenes recolectados oscilaron entre 0.50 L y 0.75 L por prueba, lo que se tradujo en valores normalizados de captación entre 0.233 y 0.349 L/m²·día. El valor promedio obtenido para este caso fue de 0.298 L/m²·día, evidenciando un comportamiento relativamente estable a lo largo del periodo de monitoreo, con variaciones atribuibles principalmente a cambios en las condiciones meteorológicas diarias, como la intensidad de la neblina.

En el Caso II (cono), correspondiente al captador cónico instalado en la parte alta del predio, se obtuvieron los mayores volúmenes de recolección del estudio. Los valores registrados variaron entre 0.68 L y 0.95 L por prueba, lo que corresponde a volúmenes diarios normalizados entre 0.316 y 0.442 L/m²·día. El valor promedio calculado para este captador fue de 0.376 L/m²·día, superando de manera consistente los resultados del cono del Caso I. Este comportamiento sugiere que la ubicación topográfica más elevada y expuesta favoreció una mayor interacción



con la neblina, posiblemente asociada a una mayor frecuencia de paso de nubes bajas y a un flujo de aire más constante.

Adicionalmente, se considera que el entorno inmediato del captador pudo haber influido en las diferencias observadas. Tras la reubicación del cono del Caso I luego del evento de viento, este quedó instalado en proximidad a matorrales y vegetación densa, lo que pudo haber generado una captación previa de microgotas por parte de las plantas antes de alcanzar la malla. Este fenómeno de interceptación vegetal podría haber reducido la disponibilidad efectiva de niebla para el captador, contribuyendo así a los menores volúmenes recolectados en comparación con el Caso II, aun cuando ambos sistemas compartían la misma geometría.

Por su parte, el captador cúbico asociado al Caso II presentó volúmenes recolectados menores en términos absolutos, con valores entre 0.25 L y 0.40 L por prueba. Al normalizar por su área efectiva de 2.5 m², los valores de captación se ubicaron entre 0.200 y 0.320 L/m²·día, con un promedio de 0.278 L/m²·día. Aunque este valor es comparable al promedio del cono del Caso I, resulta inferior al desempeño del cono del Caso II, lo que resalta la influencia de la geometría convexa en combinación con la ubicación del captador.

En conjunto, los resultados de los casos definitivos muestran que los captadores cónicos presentan un mejor desempeño promedio que el captador cúbico, especialmente cuando se ubican en zonas topográficamente favorables. La geometría convexa del cono, al ofrecer múltiples orientaciones locales frente al flujo de niebla, parece favorecer tanto el impacto de las gotas como su drenaje gravitacional, reduciendo la retención excesiva de agua sobre la malla. Estas observaciones refuerzan los hallazgos obtenidos en laboratorio y validan, bajo condiciones reales, el potencial de geometrías tridimensionales no convencionales para sistemas de captación de niebla en zonas de alta montaña.

En la Figura 41 se presenta la comparación gráfica del comportamiento de los tres colectores evaluados (cono Caso I, cono Caso II y cubo Caso II), donde se evidencia de manera conjunta la evolución temporal de la captación y las diferencias sistemáticas entre geometrías y ubicaciones.

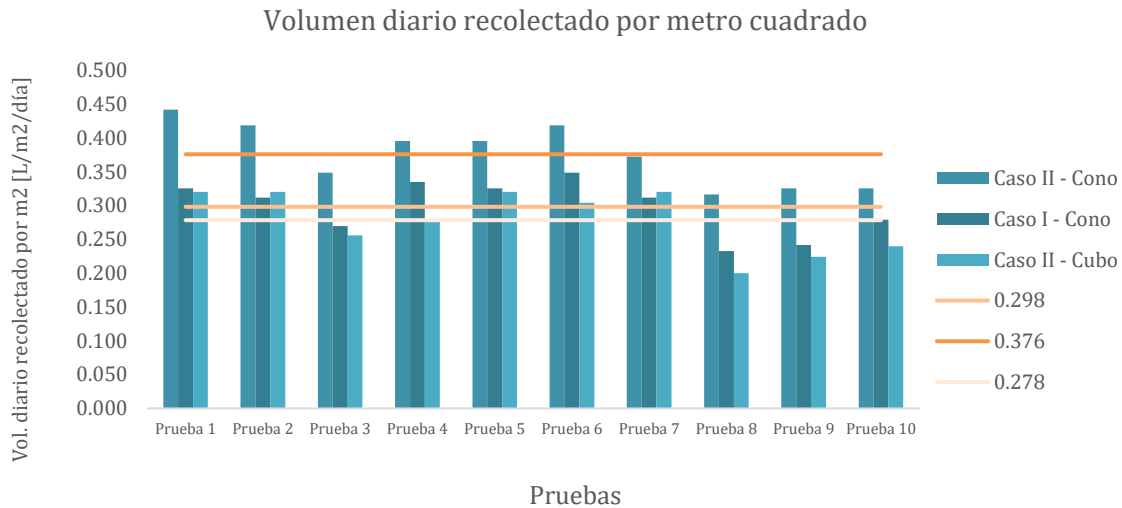


Figura 41. Resultados en campo

5.5 Discusión del caso de estudio

Los resultados obtenidos en el estudio de campo permiten contrastar, aunque de manera preliminar, el comportamiento de captadores de niebla con geometrías convexas frente a una geometría plana tradicional bajo condiciones reales de operación. Los ensayos de laboratorio realizados previamente demostraron de forma consistente que, bajo condiciones controladas, la geometría tipo reloj de arena presenta la mayor eficiencia de captación, seguida por el cono y, finalmente, el cubo. En este sentido, los resultados de campo mantienen parcialmente esta tendencia, en tanto el captador cúbico continúa mostrando el desempeño más bajo. No obstante, la diferencia observada entre el cono y el cubo en campo resulta menos pronunciada de lo que sugerían los resultados de laboratorio, lo cual indica que la ventaja relativa de las geometrías convexas puede verse atenuada por factores propios del entorno natural, como la variabilidad del viento, las pérdidas asociadas al drenaje y las condiciones ambientales no controladas.

Esta discrepancia evidencia la complejidad inherente a los sistemas de captación de niebla en condiciones reales, donde variables no controladas (como la dirección cambiante del viento, la precipitación, la evaporación y las pérdidas durante el drenaje) adquieren un papel determinante. En particular, el sistema de drenaje empleado, basado en piscinas inflables, si bien permitió una solución rápida y funcional, pudo haber condicionado los resultados, especialmente en el caso del captador cúbico, donde la geometría del drenaje no se ajustaba de manera óptima a la forma del colector y pudo generar una sobreestimación del volumen efectivamente captado por la malla.

Desde el punto de vista aerodinámico, los resultados refuerzan la hipótesis de que las geometrías convexas presentan ventajas frente a superficies planas. Los captadores cónicos



mostraron un desempeño más estable ante direcciones variables del flujo de niebla, lo cual sugiere un comportamiento más aerodinámico, posiblemente asociado a fenómenos como el efecto Coanda, mediante el cual el flujo de aire tiende a adherirse a superficies curvas. Adicionalmente, la presencia de inclinaciones continuas favorece el drenaje gravitacional del agua captada, guiando las gotas a lo largo de la malla hasta el sistema de recolección. En contraste, en el captador cúbico el proceso de drenaje depende en mayor medida del desprendimiento de gotas desde superficies verticales, lo que incrementa la probabilidad de evaporación o pérdida antes de su recolección efectiva.

La ubicación topográfica y el contexto microclimático se evidenciaron como factores críticos para la eficiencia del sistema. Si bien la geometría del captador influye en el proceso de captación, el experimento confirma que este tipo de tecnologías carecería de sentido en zonas donde no existan condiciones frecuentes de niebla. En el caso de estudio, la presencia de un cañón natural, la proximidad al cerro El Tablazo y la orientación del terreno favorecieron la canalización ascendente de masas de aire húmedo hacia la finca. Asimismo, la cercanía a un pequeño cuerpo de agua estancada pudo haber contribuido a la generación de microclimas locales con mayor disponibilidad de humedad, aunque este efecto no pudo cuantificarse de manera directa.

El entorno inmediato del captador demostró tener una influencia significativa. La vegetación cercana, particularmente los matorrales densos, se identificó como un factor potencialmente negativo, al actuar como superficies de interceptación previa de la niebla, reduciendo la fracción de microgotas disponible para el captador. Este aspecto resalta la importancia de seleccionar cuidadosamente el emplazamiento, evitando obstáculos vegetales inmediatos que puedan competir con el sistema de captación.

El evento de viento intenso ocurrido durante el periodo de estudio evidenció limitaciones importantes en el diseño estructural de los prototipos. Debido a restricciones de tiempo y recursos, los captadores instalados corresponden a un primer prototipo funcional, cuya estabilidad resultó inferior a la deseada. Las uniones de PVC presentaban cierta flexibilidad, y el sistema de anclaje inicial no fue suficiente para resistir eventos extremos. Este hecho pone de relieve la necesidad de un diseño estructural más robusto y específico para condiciones de alta montaña, así como la conveniencia de repensar el sistema de drenaje como un componente integral del diseño del captador, y no como un elemento accesorio.

En cuanto a la metodología de monitoreo, es necesario reconocer limitaciones asociadas a la logística del trabajo de campo. La imposibilidad de realizar visitas diarias y la dependencia de un observador local, si bien permitieron la continuidad del monitoreo, introducen posibles errores humanos y reducen el control sobre las condiciones exactas de cada medición. Estas restricciones, sumadas a la falta de registros sistemáticos de velocidad del viento y a la interferencia de eventos de lluvia, limitan el carácter concluyente de los resultados.

A pesar de estas limitaciones, el estudio aporta evidencia valiosa que sugiere que los captadores con geometrías convexas presentan un desempeño superior al de geometrías planas en condiciones reales; no obstante, la magnitud exacta de esta ventaja requiere investigaciones adicionales. Las diferencias marcadas entre los resultados de laboratorio y de campo indican



que la eficiencia relativa de cada geometría depende fuertemente del contexto ambiental y del diseño integral del sistema.

Finalmente, el trabajo con la comunidad local demostró ser un componente clave del éxito del estudio. La colaboración con la familia de Don Luis permitió no solo la recolección de datos, sino también el intercambio de conocimiento y la apropiación local del proyecto. Esta experiencia resalta el potencial de los sistemas de captación de niebla como soluciones tecnológicas con impacto social, siempre que se diseñen de manera sencilla, replicable y adaptada a las realidades rurales.

En conjunto, este caso de estudio constituye un primer acercamiento experimental que abre la puerta a investigaciones futuras más profundas, con mayor planificación en el diseño, instrumentación más completa y periodos de monitoreo prolongados. Con una inversión adecuada en diseño y validación, los captadores de niebla con geometrías convexas podrían convertirse en soluciones viables, económicas y replicables para el aprovechamiento de agua atmosférica en zonas de alta montaña.



6. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió analizar de manera sistemática la influencia de la geometría del captador, el tipo de malla y la inclinación del sistema en la eficiencia de recolección de niebla, combinando ensayos controlados en laboratorio con pruebas exploratorias en campo. La integración de ambas escalas experimentales constituye uno de los principales aportes del trabajo, ya que permite evaluar no solo el desempeño teórico del sistema, sino también su comportamiento bajo condiciones reales de operación. En este contexto, se reconoce que el desempeño de un captador no depende de un único factor, sino de la interacción entre distintas eficiencias del sistema, principalmente la eficiencia aerodinámica, la eficiencia de deposición y la eficiencia de drenaje, las cuales deben analizarse de manera conjunta.

A partir de las pruebas de laboratorio, se concluye que la geometría del captador tiene un efecto significativo en la eficiencia de recolección. Bajo condiciones controladas, las geometrías convexas tridimensionales presentaron un desempeño claramente superior al de la geometría plana tradicional. En particular, el captador en forma de reloj de arena mostró las mayores eficiencias y volúmenes recolectados, seguido por el cono y, finalmente, el cubo. En términos cuantitativos, las diferencias entre geometrías fueron sustanciales, alcanzando factores superiores a 2 en volumen recolectado y eficiencia entre el captador más eficiente y el menos eficiente, tanto para la malla negra al 80% como para la malla verde al 90%. Este comportamiento sugiere que las superficies convexas favorecen una mayor interacción entre el flujo de aire y la malla recolectora, al inducir que el aire se adhiera y rodee el captador, incrementando el tiempo y el área efectiva de contacto. Se sospecha que este fenómeno está relacionado con un efecto aerodinámico similar al efecto Coandă, lo cual contribuiría a un flujo más estable y guiado alrededor del captador, mejorando la deposición de gotas. Adicionalmente, estas geometrías presentan ventajas estructurales frente a vientos intensos, ya que su carácter aerodinámico reduce esfuerzos localizados sobre la malla, a diferencia de los colectores planos, que tienden a experimentar mayores tensiones, deformaciones y riesgo de rasgado bajo condiciones de viento elevado.

No obstante, los resultados de campo mostraron diferencias menos marcadas entre las geometrías, especialmente entre el cono y el cubo. Esta discrepancia pone en evidencia que los ensayos de laboratorio tienden a sobreestimar las diferencias relativas de desempeño entre captadores. Esto se explica principalmente por el alto nivel de control experimental del laboratorio: ausencia de variabilidad en la velocidad y dirección del viento, condiciones de humedad elevadas y constantes, flujo de niebla uniforme y un sistema de nebulización que garantiza una interacción repetitiva y homogénea entre el flujo y la superficie recolectora. En este contexto, las ventajas geométricas asociadas a la curvatura, la aerodinámica y el drenaje se manifiestan de manera más clara y amplificada.

En contraste, en condiciones reales de campo, el sistema está sujeto a múltiples fuentes de incertidumbre que tienden a reducir estas diferencias. La variabilidad del viento, la



intermitencia de la neblina, las pérdidas asociadas al drenaje, la evaporación y la influencia del entorno inmediato (vegetación, topografía y obstáculos) introducen efectos que pueden atenuar la ventaja teórica de una geometría sobre otra. Como resultado, aunque las geometrías convexas continúan mostrando un mejor desempeño general, la magnitud de esta diferencia es menor que la observada en laboratorio. En este sentido, el estudio de inclinaciones permitió evidenciar que, en ciertos casos, ajustar el ángulo de operación del captador mejora significativamente la eficiencia de drenaje, al facilitar la conducción de las gotas hacia el sistema de recolección, reduciendo pérdidas por retención o evaporación. Este efecto resulta particularmente relevante en mallas de mayor densidad, como la malla verde al 90%, donde el desprendimiento natural de las gotas es menor y el guiado gravitacional juega un papel determinante.

Asimismo, se observó que configuraciones verticales pueden resultar eficientes en escenarios específicos, especialmente durante periodos de alta saturación atmosférica y baja variabilidad en la dirección del viento, mientras que configuraciones inclinadas ofrecen un mejor desempeño bajo condiciones más dinámicas. Esto confirma que no existe una única configuración óptima, sino que el diseño del captador debe adaptarse a las condiciones locales y al tipo de malla empleada.

El estudio también permitió confirmar que el tipo de malla influye de manera significativa en la eficiencia del sistema. La malla verde al 90% de sombra presentó mayores eficiencias y una menor variabilidad entre pruebas en comparación con la malla negra al 80%, lo que sugiere que una mayor densidad de sombreado favorece la deposición de gotas y reduce pérdidas durante el proceso de captación. Sin embargo, este beneficio debe evaluarse en conjunto con aspectos prácticos como la manejabilidad, el peso, el drenaje y el comportamiento estructural de la malla en campo.

Desde el punto de vista metodológico, se concluye que los ensayos de laboratorio son una herramienta fundamental para identificar tendencias, comparar configuraciones y optimizar el diseño inicial de captadores de niebla. Sin embargo, estos resultados no deben extrapolarse directamente a condiciones reales sin una validación en campo, ya que el entorno natural introduce dinámicas complejas que no pueden reproducirse completamente en un sistema cerrado.

Finalmente, este trabajo demuestra que las geometrías convexas representan una alternativa prometedora para mejorar la eficiencia de los sistemas de captación de niebla, pero también pone de manifiesto que el desempeño óptimo se alcanza al combinar de manera adecuada la geometría, la inclinación, el tipo de malla y el diseño del drenaje. La integración de estos elementos abre la posibilidad de seguir explorando geometrías cada vez más complejas y adaptadas a contextos específicos, constituyendo una base sólida para futuras investigaciones orientadas a optimizar el desempeño del sistema, mejorar su robustez estructural y evaluar su viabilidad en aplicaciones reales de abastecimiento hídrico.



7. RECOMENDACIONES

7.1 Recomendaciones para el diseño experimental en el laboratorio

- En lo posible incorporar variabilidad controlada de la velocidad y dirección del viento en futuras pruebas de laboratorio, ya que la ausencia de este factor tiende a sobreestimar las diferencias de desempeño entre geometrías.
- Considerar el uso de un túnel de viento o una cámara de flujo con control direccional, que permita simular condiciones más cercanas a las encontradas en campo.
- Aumentar el volumen y el espacio del sistema de nebulización, reduciendo la saturación excesiva del ambiente y permitiendo un desarrollo más realista del flujo de niebla.
- Optimizar el sistema de drenaje del laboratorio, evitando posibles errores de medición por inexactitud.
- Implementar mediciones adicionales y más precisas de humedad relativa, temperatura y velocidad del aire durante cada prueba para caracterizar mejor las condiciones de operación.
- Mantener el periodo de pre-saturación del sistema, pero estandarizarlo rigurosamente para garantizar condiciones iniciales reproducibles.
- Evaluar el encerramiento en plástico y determinar la influencia de este en las mediciones.

7.2 Recomendaciones para el diseño de captadores de niebla

- Priorizar el uso de geometrías convexas tridimensionales, como el cono y el reloj de arena, debido a su mejor desempeño aerodinámico y de drenaje observado tanto en laboratorio como en campo.
- Diseñar captadores considerando siempre explícitamente las tres eficiencias del sistema:
 - eficiencia aerodinámica (interacción flujo–superficie),
 - eficiencia de deposición (adhesión de gotas),
 - eficiencia de drenaje (conducción de la gota hacia la canalera).
- Integrar inclinaciones variables en el diseño del captador, permitiendo ajustar el ángulo de operación según el tipo de malla y las condiciones climáticas locales.
- Optimizar la conducción del agua recolectada, asegurando trayectorias cortas y continuas que minimicen pérdidas por desprendimiento o evaporación.
- Evitar superficies planas extensas sin guía de drenaje, ya que favorecen la acumulación de gotas y aumentan las pérdidas.



7.3 Recomendaciones sobre el uso de mallas

- Priorizar mallas de mayor densidad de sombreado ($\approx 90\%$) en aplicaciones donde se busque maximizar la eficiencia de captación, especialmente cuando se combinan con geometrías convexas.
- Evaluar la malla no solo por su eficiencia hidráulica, sino también por su comportamiento estructural, peso y resistencia frente a viento y deformaciones.
- Diseñar el sistema de drenaje teniendo en cuenta que mallas más densas retienen más agua, por lo que requieren una conducción más eficiente de las gotas.
- Realizar estudios complementarios sobre propiedades superficiales de la malla (hidrofobicidad/hidrofilicidad) y su influencia en la formación y desprendimiento de gotas.

7.4 Recomendaciones para implementación en campo

- No extrapolar directamente los resultados de laboratorio sin una validación previa en campo, especialmente en términos de eficiencia absoluta.
- Adaptar la geometría, inclinación y tipo de malla a las condiciones locales de viento, humedad y topografía.
- Considerar diseños aerodinámicos que reduzcan esfuerzos sobre la estructura, minimizando el riesgo de daño, rasgado de la malla o levantamiento del sistema en eventos de viento intenso.
- Implementar sistemas modulares que permitan reemplazo rápido de mallas y ajustes geométricos sin comprometer la estructura principal.

7.5 Recomendaciones para futuras líneas de investigación

- Explorar geometrías más complejas que combinen curvaturas variables, gradientes de inclinación y superficies híbridas.
- Analizar el efecto de fenómenos aerodinámicos (como el posible efecto Coandă) mediante simulaciones CFD que complementen los ensayos experimentales.
- Investigar la interacción entre múltiples captadores dispuestos en arreglos, evaluando efectos de sombra, canalización del flujo y acoplamiento aerodinámico.
- Incorporar análisis de durabilidad, mantenimiento y costos, fundamentales para evaluar la viabilidad real del sistema.
- Desarrollar metodologías de diseño basadas en el equilibrio entre eficiencia hidráulica, eficiencia estructural y viabilidad operativa.
- Estudiar las comunidades y la adaptación de estos sistemas a ellas y al entorno.



8. REFERENCIAS

Agencia de Desarrollo Rural (ADR). (2024). *Resolución 124 de 2024*.

Bernal Pedraza, A. Y., & Licon Calpe, W. M. (2024, 26 de septiembre). *Desigualdad de acceso a agua potable en Colombia alcanza un 25 % entre zonas urbanas y rurales*. Ciudad y Territorio, Universidad Nacional de Colombia.

Carrasquilla-Batista, A., Anand, U., Broader, J. E., & Ochoa-Tapia, J. A. (2020). A CFD study of the aerodynamic efficiency of V-shaped fog water collectors. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 12(3), 3712–3722. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b16991>

Carrera Villacrés, D. V., Rodríguez Espinosa, F., & Toulkeridis, T. (2023). Potential solutions for the water shortage using towers of fog collectors in a high Andean community in central Ecuador. *Sustainability*, 15(12), 9237. <https://doi.org/10.3390/su15129237>

Carrera-Villacrés, F., Rodríguez-Espinosa, M., & Toulkeridis, T. (2023). Fog harvesting as an alternative source of water supply in high Andean communities of Ecuador. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, 72(3), 415–426. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.023>

Climate Technology Centre & Network. (2016). *Fog harvesting*. Retrieved from <https://www.ctc-n.org/technologies/fog-harvesting>

Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*. Diario Oficial No. 41.146.

Constitución Política de Colombia. (1991).

Decreto Distrital 806 de 2021.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2023). *Plan Nacional de Desarrollo 2022–2026: Colombia, potencia mundial de la vida*.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2025). *Gerencia de Proyectos Estratégicos de Agua y Saneamiento Básico*.

Flores Bazán, V. A. (2021). *Análisis comparativo de la eficiencia del captador de agua prismático optimizado del tradicional en la zona Alto Andina de Congas, Ancash en 2021* [Tesis de grado, Universidad Privada del Norte].



Frontiers. (2021). *Effect of Mesh Wettability Modification on Atmospheric and Industrial Fog Harvesting*. *Frontiers in Physics, Section Physics of Interfaces and Nanomaterials*.

Ghosh, R., Ray, T. K., & Ganguly, R. (2015). Cooling tower fog harvesting in power plants – A pilot study. *Energy*, 89, 1018–1028. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.050>

Goense, A. (2018). *Fog water collection efficiency: The influence of collector geometry* [Tesis de maestría, Delft University of Technology].

IDEAM. (2014). *Ecosistemas estratégicos de alta montaña en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

IDEAM. (2021). *Informe Nacional del Agua 2021*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. <https://www.ideam.gov.co/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2022). *Caracterización climática de la Sabana de Bogotá y municipios aledaños*. IDEAM. <https://www.ideam.gov.co>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2023). *Atlas geográfico de Colombia*. IGAC. <https://www.igac.gov.co>

Luteyn, J. L. (1999). *Páramos: A checklist of plant diversity, geographical distribution, and botanical literature*. New York Botanical Garden Press.

MDPI Coatings. (2022). *Influence of drop viscosity and surface wettability on impact outcomes*. *Coatings*, 12(4), 459.

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MinVivienda). (2024). *Ruta ComuniAgua: Programa de fortalecimiento para organizaciones comunitarias de agua y saneamiento básico*.

Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (6th ed.). John Wiley & Sons.

Mukhopadhyay, A., Datta, A., Dutta, P. S., & Ganguly, R. (2023). Droplet detachment from a horizontal fiber of a fog harvesting mesh. En B. Bhattacharyya & A. C. Benim (Eds.), *Fluid Mechanics and Fluid Power* (Vol. 2, pp. 485–490). Springer Nature Singapore.

Mukhopadhyay, A., Dutta, P. S., Datta, A., & Ganguly, R. (2024). Liquid droplet morphology on the fiber of a fog harvester mesh and the droplet detachment conditions under gravity. *arXiv preprint*, arXiv:2401.02479.



Sánchez Cabanillas, J. A. (2018). *Atrapanieblas: Tecnología para el atrapamiento de agua. Una experiencia exitosa en Villa María del Triunfo, Lima 2018* [Tesis de maestría, Universidad César Vallejo].

Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994). A proposed standard fog collector for use in fog water studies. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11), 1318–1328.
[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1994\)033<1318:APSFUC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1994)033<1318:APSFUC>2.0.CO;2)

Serje Martínez, L. (2021). *Fuentes de abastecimiento hídricas alternativas para la irrigación agrícola en zonas rurales dispersas de Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].

Serje Martínez, L. (2024). *Análisis comparativo de materiales para sistemas de captación de neblinas en zonas rurales dispersas de Colombia* [Tesis de pregrado, Universidad de los Andes].

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2024, 1 de febrero). *Estado y empresas deben reducir las brechas en el acceso al agua potable y saneamiento básico*.
<https://www.superservicios.gov.co>

Weather Atlas. (2024). *Climate of Subachoque, Colombia*. <https://www.weather-atlas.com>

WorldWideScience. (2024). *Project review: fogwater harvesting in Bolivia*. Retrieved from <https://www.munichre-foundation.org>