

**Diseño de una Metodología Sostenible y Replicable para la Selección de Sistemas no Convencionales de Captación de Agua en Zonas Rurales - Caso de Estudio: Vereda La Bogotana, Municipio El Carmen - Norte de Santander.**

Luisa Fernanda Saldarriaga Soler  
Estudiante Maestría en Construcción Sostenible

Trabajo de Grado

Directora  
Adriana Marcela Serrano Santiago



Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca  
Facultad de Ingeniería y Arquitectura  
Maestría en Construcción Sostenible  
Octubre 20 de 2025

## Resumen

La escasez de agua es un desafío socioambiental creciente que afecta las zonas rurales, donde la limitada infraestructura, la variabilidad climática y la débil gobernanza hídrica dificultan el acceso seguro al recurso. En este contexto, el objetivo de esta investigación fue diseñar una metodología sostenible y replicable para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua en zonas rurales, validada en la vereda La Bogotana, municipio El Carmen – Norte de Santander. El estudio empleó un enfoque mixto que integró análisis hidroclimático, hidrogeológico y socioambiental del territorio, apoyado en información satelital y cartografía especializada. Asimismo, se aplicó la metodología estratégica PESTEL, que permite evaluar factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ecológicos y legales que influyen en la gestión y disponibilidad del recurso hídrico.

A partir de una revisión bibliográfica se evaluaron seis sistemas no convencionales de captación de agua mediante una matriz comparativa con criterios técnicos, ambientales y sociales. Este análisis permitió descartar alternativas con baja viabilidad, como la recarga artificial de acuíferos, el aprovechamiento de aguas subterráneas y el uso de drenajes agrícolas, debido a la ausencia de acuíferos y los requerimientos de tratamiento. Posteriormente, se seleccionaron tres sistemas para un análisis detallado, destacándose la captación de agua lluvia como la opción más viable gracias a la elevada pluviosidad y las condiciones topográficas de la zona.

La metodología propuesta demostró ser una herramienta útil y replicable para apoyar la toma de decisiones en territorios rurales con características similares y para promover alternativas sostenibles de abastecimiento hídrico.

**Palabras Clave:** Sistemas no Convencionales, Zonas Rurales, Captación de Agua, Tecnologías Limpias, Hidroclimática

## Abstract

Water scarcity is a growing socio-environmental challenge affecting rural areas, where limited infrastructure, climate variability, and weak water governance hinder secure access to this resource. In this context, the objective of this research was to design a sustainable and replicable methodology for the selection of unconventional water collection systems in rural areas, validated in the village of La Bogotana, municipality of El Carmen, Norte de Santander. The study used a mixed approach that integrated hydroclimatic, hydrogeological, and socio-environmental analysis of the territory, supported by satellite information and specialized cartography. Likewise, the PESTEL strategic methodology was applied, which allows for the evaluation of political, economic, social, technological, ecological, and legal factors that influence the management and availability of water resources.

Based on a literature review, six unconventional water collection systems were evaluated using a comparative matrix with technical, environmental, and social criteria. This analysis made it possible to rule out alternatives with low viability, such as artificial aquifer recharge, groundwater use, and agricultural drainage, due to the absence of aquifers and treatment requirements. Subsequently, three systems were selected for detailed analysis, with rainwater harvesting standing out as the most viable option due to the high rainfall and topographical conditions of the area.

The proposed methodology proved to be a useful and replicable tool to support decision-making in rural areas with similar characteristics and to promote sustainable water supply alternatives.

**Keywords:** Unconventional Systems, Rural Areas, Water Collection, Clean Technologies, Hydroclimatic

## Tabla de Contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
1. Introducción.....	13
2. Planteamiento del Problema.....	16
3. Pregunta de Investigación.....	21
4. Objetivos.....	22
4.1 Objetivo General.....	22
4.2 Objetivos Específicos.....	22
5. Justificación.....	24
6. Marcos de Referencia.....	26
6.1 Estado del Arte.....	26
6.2 Marco Teórico y Conceptual.....	31
6.3 Marco Geográfico.....	33
6.4 Marco Normativo.....	35
6.5 Marco Institucional.....	35
7. Metodología.....	37
7.1 Enfoque.....	37
7.2 Alcances.....	38
7.3 Método.....	38
7.4 Técnicas.....	38
7.5 Instrumento.....	39

7.6	Matriz Metodológica .....	39
8.	Resultados.....	41
8.1	Caracterización de las Condiciones de la Zona de Estudio .....	41
8.1.1	Políticos .....	42
8.1.2	Económicos .....	43
8.1.3	Sociales .....	44
8.1.4	Tecnológicos.....	44
8.1.5	Ecológicos .....	45
8.1.5.1	Hidroclimatológicos .....	45
8.1.5.1.1	Precipitación .....	46
8.1.5.1.2	Temperatura Media.....	48
8.1.5.1.3	Temperatura Media de Rocío.....	50
8.1.5.1.4	Evapotranspiración .....	52
8.1.5.1.5	Velocidad del Viento .....	54
8.1.5.2	Hidrogeológico .....	57
8.1.5.2.1	Geología .....	58
8.1.5.2.2	Suelos.....	59
8.1.5.2.3	Topografía.....	60
8.1.5.2.4	Aguas Subterráneas .....	61
8.1.5.3	Hidrológico.....	62
8.1.5.3.1	Fuentes de Agua Superficiales.....	63

8.1.5.3.2	Cuencas.....	64
8.1.5.3.3	Oferta Hídrica Superficial (Caudales y Escorrentía) .....	66
8.1.6	Legales .....	68
8.2	Sistemas no Convencionales de Captación de Agua Eficientes y Sostenibles .	70
8.2.1	Sistema de Captación de Agua Lluvia (SCALL) .....	70
8.2.2	Sistema de Recolección de Agua por Rocío .....	73
8.2.3	Sistema de Recarga Artificial de Acuíferos .....	76
8.2.4	Sistema de Captación de Agua de Niebla (Atrapanieblas) .....	79
8.2.5	Sistema de Captación de Agua Subterránea .....	81
8.2.6	Sistema de Aprovechamiento de Agua de Drenaje Agrícola .....	83
8.3	Matriz de Comparación de los Sistemas de Captación de Agua no Convencionales.....	85
8.3.1	Factor Político – PESTEL.....	87
8.3.2	Factor Económico – PESTEL.....	88
8.3.3	Factor Social – PESTEL .....	90
8.3.4	Factor Tecnológico – PESTEL .....	90
8.3.5	Factor Ecológico – PESTEL .....	92
8.3.5	Factor Legal – PESTEL .....	93
8.4	Evaluación de los Tres Sistemas no Convencionales de Captación.....	96
8.4.1	Evaluación del Sistema de Captación de Agua Lluvia (SCALL) .....	97
8.4.2	Evaluación del Sistema de Captación de Agua de Rocío.....	102
	Tomado de elaboración propia .....	105

8.4.3	Evaluación del Sistema de Captación de Agua de Niebla .....	106
8.5	Metodología para la Selección de Sistemas no Convencionales de Captación de Agua	107
9.	Conclusiones .....	109
10.	Anexos.....	111
11.	Referencias .....	112

## Lista de Figuras

<b>Figura 1</b> .....	17
<b>Figura 2</b> Población mundial sin acceso a agua potable y saneamiento básico seguro en América Latina.....	18
<b>Figura 3</b> Cobertura de acueducto y alcantarillado en las cabeceras municipales y en las zonas rurales. ....	19
<b>Figura 4</b> Principales autores con contribuciones al componente 1.....	28
<b>Figura 5</b> Principales Autores con Contribuciones al componente 2.....	30
<b>Figura 6</b> Ubicación: Vereda La Bogotana, Municipio el Carmen, Norte de Santander..	34
<b>Figura 7</b> Polígono de ubicación vereda la Bogotana .....	35
<b>Figura 8</b> Comportamiento mensual de la precipitación vereda en la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.....	47
<b>Figura 9</b> Comportamiento anual de la precipitación vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.....	48
<b>Figura 10</b> Comportamiento mensual de la temperatura media vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024. ....	49
<b>Figura 11</b> Comportamiento anual de la temperatura media vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.....	50
<b>Figura 12</b> Comportamiento mensual de la temperatura media del punto de rocío vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024. ....	51
<b>Figura 13</b> Comportamiento mensual de la temperatura media del punto de rocío vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024. ....	52
<b>Figura 14</b> Comportamiento mensual de la evapotranspiración vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.....	53

<b>Figura 15</b> Comportamiento mensual de la evapotranspiración en vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024. ....	54
<b>Figura 16</b> Comportamiento mensual de la velocidad del viento en vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024. ....	55
<b>Figura 17</b> Comportamiento anual de la velocidad del viento en vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024. ....	56
<b>Figura 18</b> Comportamiento promedio anual dirección del viento municipio del Carmen, Norte de Santander.....	57
<b>Figura 19</b> <i>Geología vereda la Bogotana, municipio el Carmen, Norte de Santander. Indicar en un punto la ubicación de la vereda.</i> .....	58
<b>Figura 20</b> Distribución uso de suelos departamento Norte de Santander.....	60
<b>Figura 21</b> Topografía municipio el Carmen, Norte de Santander. ....	61
<b>Figura 22</b> Disponibilidad de aguas subterráneas municipio el Carmen, Norte de Santander. ....	62
<b>Figura 23</b> Disponibilidad de agua – índice de aridez municipio el Carmen, Norte de Santander. ....	64
<b>Figura 24</b> Cuencas hidrográficas departamento Norte de Santander.....	65
<b>Figura 25</b> Oferta Hídrica Total Superficial de la vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.....	68
<b>Figura 26</b> Sistema de Captación de Agua Lluvia en Cubierta. ....	71
<b>Figura 27</b> Sistema de Recolección de Agua de Rocío. ....	74
<b>Figura 28</b> Sistema de Recolección de Agua de Rocío en Techos Verdes.....	75
<b>Figura 29</b> Clasificación de Acuíferos Según Características Litológicas. ....	77
<b>Figura 30</b> Clasificación de Acuíferos Según Presión Hidrostática. ....	77
<b>Figura 31</b> Sistema de Recolección de Recarga Artificial de Acuífero por Piscinas de Infiltración. ....	78

<b>Figura 32</b> Estructura Sistema de Captación de Agua de Niebla.....	80
<b>Figura 33</b> Sistema de Captación de Agua Subterránea– Pozos Perforados. ....	82
<b>Figura 34</b> Sistema de drenaje agrícola superficial para la recolección de agua para reúso. .....	84
<b>Figura 35</b> Coeficiente de escorrentía para un periodo entre 2005 y 2024 .....	100
<b>Figura 36</b> Metodología para la selección de sistemas no convencionales de agua.....	108

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1</b>	Actores directos e indirectos de la investigación.....	36
<b>Tabla 2</b>	Matriz metodológica .....	39
<b>Tabla 3</b>	Oferta Hídrica Superficial de las la cuenca hidrográficas del Caribe.....	66
<b>Tabla 4</b>	Normativa legal aplicada a la investigación .....	69
<b>Tabla 5</b>	Matriz de Evaluación Sistemas de Captación de Agua.....	85
<b>Tabla 6</b>	Evaluación Sistemas de Captación de Agua no Convencionales. ....	94
<b>Tabla 7</b>	Dimensiones del sistema para la captación de agua lluvia en ladera .....	102
<b>Tabla 8</b>	Punto de rocío vereda la Bogatana para el año 2024.....	105

## Lista de Ecuaciones

<b>Ecuación 1</b> Escorrentía Superficial.....	67
<b>Ecuación 2</b> Coeficiente de escorrentía .....	99
<b>Ecuación 3</b> Precipitación de Diseño del Sistema Evaluado 1 .....	100
<b>Ecuación 4</b> $\beta$ : Parámetros de función.....	101
<b>Ecuación 5</b> $\alpha$ : Parámetros de función.....	101
<b>Ecuación 6</b> Área de captación en ladera .....	102
<b>Ecuación 7</b> Punto de Rocío .....	104
<b>Ecuación 8</b> $\alpha$ (T, RH):.....	104

## 1. Introducción

La escasez de agua se ha convertido en un desafío socio ambiental que influye en el desarrollo y la calidad de vida de la población (Karimidastenaie et al., 2022). A pesar de que el acceso al agua y la infraestructura de acueducto y alcantarillado es considerado como un derecho humano y se encuentra incluido en los Objetivos de Desarrollo Sostenible [ODS], específicamente el ODS- 6 Agua Limpia y Saneamiento, a nivel mundial, entre los años 2015 y 2022 aproximadamente 2000 millones de personas no contaron con acceso a agua potable y 3600 millones no tuvieron servicio de saneamiento básico seguro (CorfiColombiana, 2024).

El crecimiento acelerado de la población, el cambio climático, la alta demanda de agua para las actividades agrícolas, industriales y energéticas, son las causas principales del agotamiento del recurso hídrico (Salehi, 2022). La población más afectada por la escasez de agua se ubica en las zonas rurales, las cuales carecen de gobernanza para la gestión segura y continua (Omarova et al., 2019). Aunado a esto, en algunas zonas rurales los sistemas de abastecimiento de agua se gestionan a partir de modelos estructurados de forma comunitaria y basados en servicios públicos y privados tradicionales, amenazando la oferta hídrica y por consiguiente la calidad de vida (Toan et al., 2023).

El aumento de la variabilidad hidrológica y climática a nivel mundial ha generado desequilibrio tanto en la oferta como en la demanda de recurso hídrico, lo que ha impulsado a evaluar y variar los sistemas tradicionales por sistemas no convencionales, los cuales utilizan fuentes no comúnmente usadas como las aguas lluvias, residuales, salada o provenientes de las condiciones climáticas de la zona, permitiendo una mayor conservación del recurso, el uso de desarrollos tecnológicos para captación, la recirculación, reciclaje y la descentralización del agua (Quon y Jiang, 2023).

Actualmente en Colombia, como se menciona en el Estudio del Agua 2022, del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], la captación de agua provino principalmente de fuentes superficiales representando el 89% de la demanda total, estas aguas superficiales se conforman por ríos, lagos y embalses, pasando por un proceso de tratamiento de potabilización para el consumo humano (Chamat y Pinzón, 2022). En algunas zonas rurales del país se realiza el consumo de agua obtenida directamente de las fuentes superficiales sin ningún tipo de tratamiento, lo cual influye en la generación de enfermedades, especialmente en niños (Chamat y Pinzón, 2022).

La sobreexplotación del recurso hídrico para el año 2020, en Colombia provino de la agricultura y la post cosecha con un porcentaje del 43.3%, el siguiente sector con mayor participación porcentual es el hidroenergético con un 25.4%, y el uso doméstico representó un 8,8% (IDEAM, 2022). Departamentos como el Magdalena, la Guajira, Cesar, Guaviare y Norte de Santander han sido los territorios con mayor susceptibilidad al desabastecimiento de agua por sequías, alcanzando afectaciones a la población del 65% al 100% (IDEAM, 2022).

Conforme con lo anterior, el objetivo de esta investigación es el diseño de una metodología sostenible y replicable para la selección de sistemas no convencionales en zonas rurales, a partir de la aplicación de la metodología PESTEL, la cual es una herramienta de análisis estratégico que facilita la comprensión integral del entorno externo de un territorio, proyecto u organización. Su nombre corresponde a las siglas de seis dimensiones clave: Política, Económica, Social, Tecnológica, Ecológica y Legal. Este enfoque permite identificar factores contextuales que influyen en la disponibilidad, gestión y sostenibilidad de los recursos hídricos en zonas rurales, proporcionando una visión estructurada de las oportunidades y limitaciones presentes en el entorno (Yüksel, 2012). “. Su aplicación en este estudio permite fundamentar la selección de sistemas no convencionales de captación de agua desde una perspectiva holística

y replicable en territorios con características similares, que permitan reemplazar el uso de sistemas tradicionales para suplir la demanda del recurso hídrico.

Para el desarrollo del objetivo, la presente investigación centró su caso de estudio en la vereda La Bogotana, ubicada en el municipio el Carmen, Norte de Santander, debido a la ausencia de infraestructura de acueducto y alcantarillado, condición que impacta de forma negativa la calidad del recurso hídrico y la calidad de vida de la comunidad. Así mismo, los servicios ecosistémicos y las características ambientales presentes en el área de estudio son representativas para el análisis y la solución integral de la problemática.

Este proyecto contó con un enfoque metodológico mixto, desde lo cuantitativo se consideró el análisis de diferentes variables y por otro lado desde el enfoque cualitativo se abarcaron actividades enfocadas hacia análisis del contexto social y cultural por medio del Plan de Desarrollo Municipal y la revisión bibliográfica y sistemática para la identificación de sistemas no convencionales de captación de agua. Por otra parte, presenta tres tipos de alcances, descriptivo, explicativo y propositivo por medio de los cuales se realizó la identificación y la relación de las características de la zona y se identificaron sistemas no convencionales para el aprovechando de recursos alternativos, haciendo uso y aprovechamiento de los servicios ecosistémicos e implementación de la infraestructura sostenible, por medio de la integración de enfoques tanto tradicionales como innovadores. Todo esto, con el fin de mejorar el acceso de agua en regiones rurales y por lo tanto aportar en el cumplimiento del ODS 6.

## 2. Planteamiento del Problema

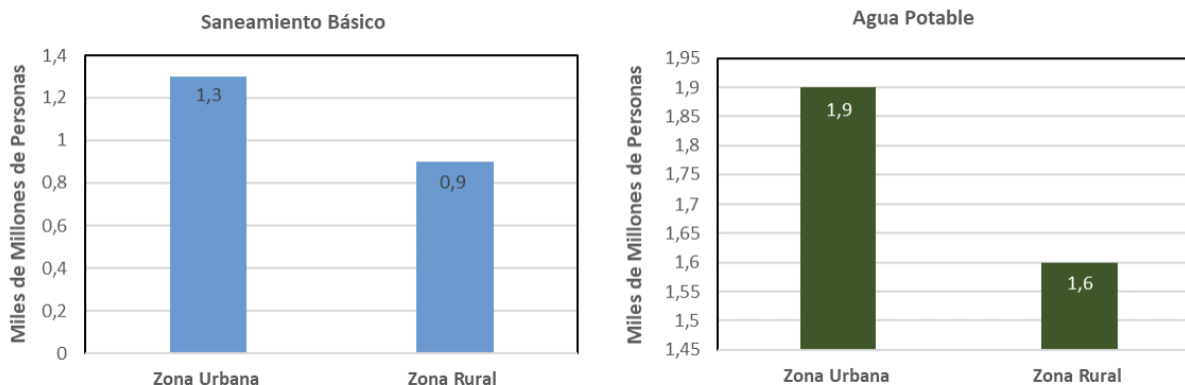
El acceso al agua se ha convertido en un desafío a nivel mundial, siendo fundamental para la reducción de la pobreza, debido a que impacta significativamente en el desarrollo de la población a nivel socioeconómico, energético, productivo, agrícola, de consumo humano, entre otros (Gómez, 2017). La falta de agua dulce ha causado estrés hídrico debido a factores como la sobreexplotación, el cambio climático y la sobrepoblación (Tzanakakis et al., 2020). Según la Organización Mundial de la Salud [OMS] (2023), para el año 2022 aproximadamente 2200 millones de personas no contaron con agua potable de calidad de las cuales 115 millones de personas consumen agua captada directamente de lagos, ríos y arroyos sin ningún tipo de tratamiento. El consumo de agua contaminada representa un riesgo significativo a la salud de la población, debido a que es la causa principal de enfermedades como diarrea, fiebre tifoidea, cólera y poliomielitis (Gómez, 2017; OMS 2023).

El 40% de la población a nivel mundial se encuentra ubicada en las zonas rurales siendo el área mayormente afectada por el desabastecimiento de agua potable principalmente a causa de dos factores: el primero es la falta de gobernanza, gestión y articulación institucional (Méndez, 2020), y el segundo es la contaminación del agua por actividades de agricultura y ganadería debido al uso de fertilizantes y pesticidas, además sobreexplotación del recurso hídrico para estas actividades (Madhav et al., 2023).

En la Figura 1 se evidencia la brecha del acceso al agua potable y saneamiento básico entre las zonas urbanas y rurales a nivel mundial (CorfiColombiana, 2024), donde se observa que las zonas más afectadas son las áreas rurales tanto en acceso como en saneamiento. Adicionalmente, se aprecia una tendencia a la disminución de la población que goza tanto de acceso al recurso hídrico como al saneamiento básico.

**Figura 1**

Población mundial sin acceso a agua potable y saneamiento básico seguro



Tomado de Investigaciones Económicas de CorfiColombiana, 2024.

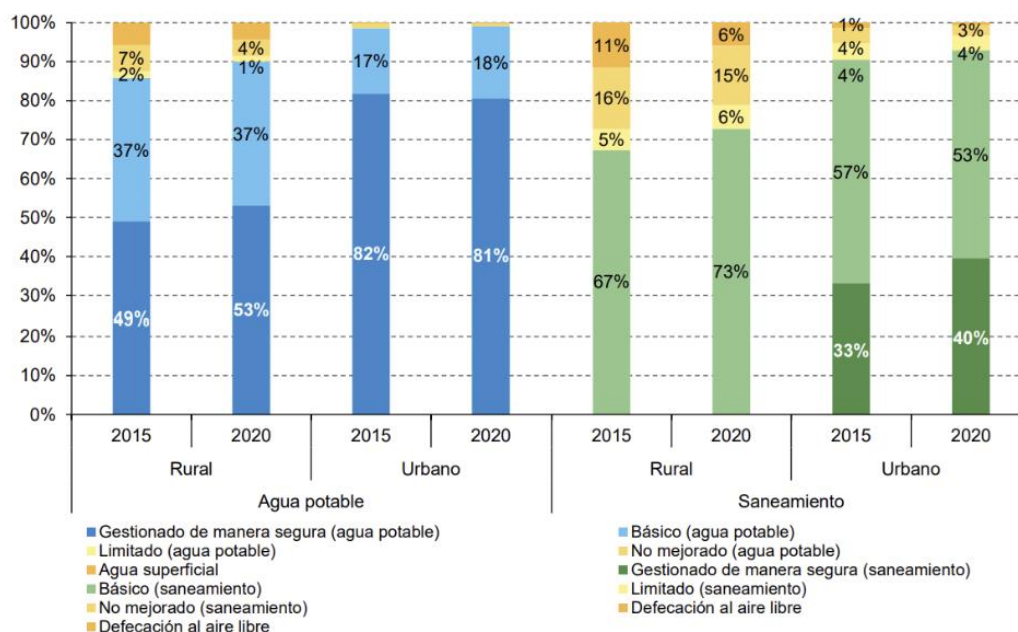
En Europa, para los años 2022 la escasez de agua afectó al 34% del territorio (Agencia Europea de Medio Ambiente [AEMA], 2024), ejemplo de eso son las zonas rurales de Ucrania, donde la situación de gestión del agua es compleja debido a que tan solo el 32,3% de la población cuenta con suministro de agua potable y el 67.7% de la población consume el agua proveniente de pozos, aljibes y ríos sin ningún tipo de tratamiento, lo que genera gran preocupación en virtud de dos factores importantes, primero Ucrania es uno de los países que cuenta con menos disponibilidad del recurso hídrico y segundo, la mala calidad del agua debido a la presencia de nitratos por actividades agrícolas (Yermolenko et al., 2021).

A su vez, América Latina enfrenta grandes retos para el cumplimiento del ODS 6 debido a la problemática de desigualdad y vulnerabilidad de la población, en especial la ubicada en la zona rural (CorfiColombiana, 2024). Para los años 2015 y 2020 aproximadamente 17 millones de personas no contaron con acceso a agua potable y 160 millones de personas no contaron con saneamiento básico seguro. En la Figura 2 se observan los porcentajes de la población con acceso a agua potable y saneamiento, donde se evidencia que para el año 2020 sólo el 53% de

la población de la zona rural obtuvo agua potable gestionada de forma segura y el 73% contó con servicio de saneamiento básico (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2023).

**Figura 2**

Población mundial sin acceso a agua potable y saneamiento básico seguro en América Latina.



Tomado de las necesidades de inversión en agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe: efectos en el empleo verde y el valor agregado bruto. Santiago (Chile): Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2023.

Según el Plan Nacional de Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento Básico Rural del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio [Minvivienda] (2021), para el 2019, el 73,3% de las zonas rurales de Colombia contaron con servicio de acueducto de agua potable. Sin embargo, una de las problemáticas principales del estado del agua en estas zonas es la continuidad del servicio y la calidad, esto debido a que tan solo el 4% de los recursos destinados para el sector de agua potable son ejecutados en las zonas rurales. Posteriormente, para el año 2021, el 88%

de la población colombiana contó con acceso a agua potable, en las cabeceras municipales el 97,4% y en las zonas rurales el 57,8%. Los departamentos con mayores dificultades para el acceso al servicio de acueducto son Guainía, la Guajira, Norte de Santander (Minvivienda, 2023, p.3). En la Figura 3 se puede observar la brecha que se presenta de cobertura de acueducto y alcantarillado en zonas rurales y en las cabeceras municipales.

### Figura 3

Cobertura de acueducto y alcantarillado en las cabeceras municipales y en las zonas rurales.



Tomado de Investigaciones Económicas de CorfiColombiana, 2024.

El departamento del Norte de Santander en el 2023 presentó una cobertura del 21% del servicio de agua potable en la zona rural y una continuidad del servicio de acueducto del 60% donde municipios como el Carmen presentan menos continuidad, registrando solo tres horas de servicio de agua potable al día, durante los siete días de la semana (Gobernación de Santander, 2023). Así mismo, en el Boletín de Vigilancia de Calidad de Agua para el Consumo Humano del Instituto Nacional de Salud para el 2024, reportó solo tres muestras del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua (IRCA) para el Norte de Santander, clasificando el riesgo de la calidad del agua en un rango entre 0% y 5%, la cual se considera apta para el consumo humano. Sin embargo, la

cantidad de muestras obtenidas no son suficientes para determinar la calidad de todo el departamento (Instituto Nacional de Salud [INS], 2024).

La falta de abastecimiento de agua potable y saneamiento básico impacta negativamente a la salud de la población, debido a que se generan diversas enfermedades derivadas de la calidad del agua influyendo en el desarrollo de las personas y en especial de los niños.

Para el año 2022 aproximadamente 1700 millones de personas consumieron agua de fuentes contaminadas a nivel mundial, es por eso que con el fin de reducir el impacto se requiere el uso de sistemas de captación y tratamiento de agua potable alternativos (OMS, 2023).

### **3. Pregunta de Investigación**

¿Qué metodología permite seleccionar sistemas no convencionales de captación de agua en zonas rurales con condiciones socioambientales similares a la vereda la Bogotana, considerando criterios de sostenibilidad, adaptabilidad y eficiencia?

## **4. Objetivos**

Con el propósito de responder a la pregunta de investigación, a continuación, se plantea el objetivo general y los objetivos específicos, los cuales orientan el proyecto de forma clara, alcanzable y medible.

### **4.1 Objetivo General**

Diseñar una metodología sostenible y replicable para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua en zonas rurales, fundamentada en la caracterización PESTEL y en el análisis comparativo de alternativas sostenibles, validada mediante su aplicación en el caso de estudio ubicado en la Vereda La Bogotana, Municipio El Carmen – Norte de Santander, con el fin de fortalecer la gestión y el abastecimiento hídrico en territorios con condiciones similares.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar las condiciones de la zona de estudio aplicando la herramienta estratégica PESTEL (Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Ecológicos y Legales), mediante el análisis de datos históricos, con el fin de comprender su influencia en el abastecimiento de agua durante los últimos veinte años.
- Identificar seis sistemas no convencionales de captación de agua que sean eficientes y sostenibles, a partir de una revisión documental, con el fin de establecer opciones viables para la zona de estudio.
- Diseñar una matriz de comparación basada en criterios técnicos, ambientales y sociales que permita relacionar los sistemas no convencionales de captación de agua basado en indicadores de eficiencia, adaptabilidad y sostenibilidad.

- Evaluar tres sistemas no convencionales de captación de agua con mayor potencial de implementación en la zona de estudio, con base en sus características físicas, sociales y ambientales, con el fin de determinar su viabilidad en el contexto local.
- Formular una metodología para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua, basada en los criterios y resultados obtenidos en el estudio, con el propósito de facilitar la toma de decisiones en comunidades rurales con condiciones similares a las de la vereda La Bogotana.

## 5. Justificación

La presente investigación propone una metodología que funcione como herramienta para facilitar la búsqueda y selección de estrategias y sistemas alternativos o no convencionales para la captación de agua. Además, permite determinar los criterios que se deben considerar en la fase inicial conforme con las dinámicas del ecosistema y así poder reducir el impacto ambiental generado por el uso de sistemas tradicionales.

Para el año 2022, en Colombia el sector productivo que presentó mayor demanda hídrica fue la agricultura y la poscosecha con un valor de 13984,1 m<sup>3</sup>/año, en cuanto al agua para uso doméstico se presentó una demanda de 2857,9 m<sup>3</sup>/año. Es importante resaltar que la mayoría de agua que se consume en Colombia proviene principalmente de fuentes superficiales tradicionales, como el agua de río, lagos y quebradas (IDEAM, 2022).

El uso de sistemas no convencionales para la captación de agua surge como una alternativa para la reducción del estrés hídrico y la conservación de las fuentes de agua. Actualmente existen diversas estrategias que permiten reemplazar los sistemas tradicionales de captación de agua por estrategias sostenibles, que se adaptan a las condiciones climáticas, hidrológicas y geológicas de zonas con diferentes condiciones y características.

Los sistemas de captación de agua lluvia, de niebla, de rocío, subterránea y la recarga artificial de acuíferos, son alternativas que permiten suplir la necesidad de agua en el territorio. Estos se pueden implementar tanto en zonas urbanas como rurales y son de fácil aplicación a pequeña y gran escala. Una de las ventajas de estas alternativas es el impacto social, debido a mejora el acceso al agua, promueve la participación ciudadana y fomenta la educación ambiental en la comunidad (Karimidastenaie et al., 2022).

El apropiado funcionamiento de estos sistemas depende de la selección adecuada del mismo, que se adapte a las condiciones del territorio, por lo cual es importante contar con las características climáticas, meteorológicas, higrológicas, hidrogeológicas, culturales y sociales de la zona de estudio.

La gestión responsable del recurso hídrico impacta de forma significativa en el desarrollo de la población, debido a que mejora la calidad de vida y reduce el riesgo de afectación a la salud. Es por esto que surge la necesidad de contar con una metodología que facilite la selección del sistema que se adapte a las condiciones de la zona considerando aspectos ambientales, económicos y sociales.

## 6. Marcos de Referencia

En este apartado de la investigación se consolidan los marcos de referencia enfocados en la herramienta estratégica PESTEL, considerando el estado del arte, el marco teórico – conceptual, el marco geográfico, marco normativo y marco institucional.

### 6.1 Estado del Arte

El desabastecimiento de agua potable y el saneamiento básico en las zonas rurales se ha convertido en un reto que busca ser enfrentado por medio de diferentes alternativas como es el uso de sistemas no convencionales de agua lluvia. Desde el Siglo XX a nivel mundial, se han aunado esfuerzos en la búsqueda de estrategias que permitan dar cumplimiento al ODS 6, por lo cual la pregunta de investigación que se busca resolver es: ¿Qué metodología permite seleccionar sistemas no convencionales de captación de agua en zonas rurales con condiciones socioambientales similares a la vereda la Bogotana, considerando criterios de sostenibilidad, adaptabilidad y eficiencia?

Con el fin de dar respuesta a esta pregunta y teniendo en cuenta la revisión de autores relacionados directa e indirectamente con la temática abordada, se plantearon los componentes que se enuncian a continuación y se detallan posteriormente:

**Componente 1:** Documentos que permitan evidenciar comportamiento y características principales del acceso al agua potable en zonas rurales a nivel nacional e internacional.

Entre los estudios que tienen un enfoque hacia las causas de la escasez de agua potable en zonas rurales, se encuentra el documento de Salehi, (2022) y el libro de Madhav et al. (2024), los cuales realizan un análisis cualitativo que permitió determinar que el suministro intermitente, la contaminación de agua y la ausencia de redes de distribución son las causas principales del desabastecimiento, llegando a la conclusión de que la gobernanza y participación del estado en

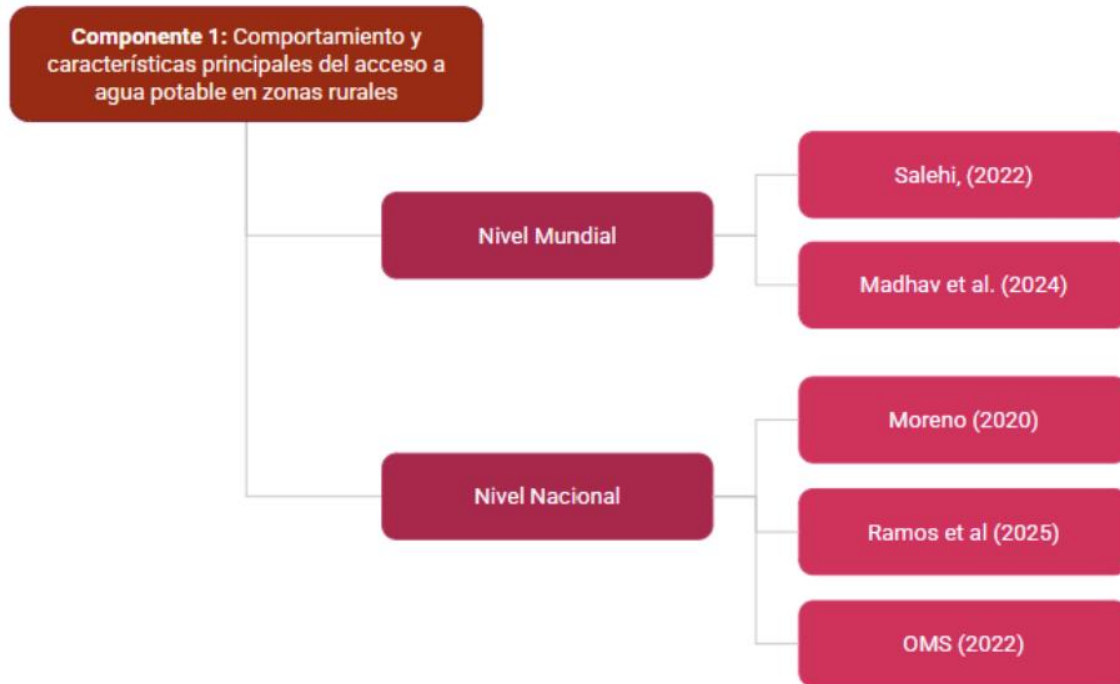
la gestión del agua es fundamental para el uso adecuado de cualquier estrategia propuesta, adicionalmente a la escasez y la contaminación de agua en zonas rurales, se le atribuye principalmente a actividades como el riego de cultivos, el uso de pesticidas, el consumo de ganadería, entre otros.

Otros autores importantes como Moreno (2020) y Ramos et al (2025), centran su investigación hacia la problemática en las zonas rurales de Colombia. En primer lugar, Moreno (2020) enfoca su investigación hacia una revisión de la literatura que permite identificar el papel que juega la política y las instituciones para el desarrollo hídrico de las zonas rurales. Por último, el estudio de Ramos et al. (2025), cuenta con un alcance experimental por medio del cual, se clasifican los principales riesgos asociados a la captación de agua y tomas, el pretratamiento y el tratamiento y las redes de distribución.

Adicionalmente, esta última investigación permite evidenciar la importancia de la implementación de Plan de Agua Potable o Plan de Seguridad del Agua, el cual brinda las directrices para la calidad del agua potable con el fin de garantizar el suministro a la población de zonas rurales (OMS, 2022). En la Figura 4 se plasman los textos que aportan a esta investigación, los cuales permiten conocer el estado actual tanto a nivel nacional como internacional de la problemática que se pretende abordar, considerando las principales causas y riesgos.

## Figura 4

Principales autores con contribuciones al componente 1



Tomado de autora

**Componente 2:** Sistemas no convencionales de captación de agua potable en zonas rurales.

Del análisis a nivel global de las estrategias propuestas en diferentes proyectos de investigación enfocados hacia la captación, se pudo observar que a nivel historiográfico la obtención de agua por medio de sistemas no convencionales se ha investigado desde el siglo XX. Los trabajos de Karimidastenaee et, al. (2022), Quon et, al. (2023) y García et, al. (2023) se basaron en la revisión sistemática bibliográfica que permitió analizar y comparar los principales sistemas estudiados. Estos tres trabajos, realizaron una labor cuantitativa que permitió plasmar la predominancia de las estrategias más utilizadas como el uso del agua lluvia, agua de recarga artificial, agua de niebla y agua de rocío, así mismo, señalaron la importancia de considerar

características climáticas del territorio, disponibilidad de recursos, la evaluación técnico económica y el análisis de ciclo de vida.

Los estudios entorno a sistemas de captación alternativos de agua, como los de Jarimi (2020) y Lord et al (2021), muestran el potencial que tienen estrategias como los colectores de niebla y rocío para el suministro de agua en zonas rurales, estudios como estos permiten conocer tanto los aspectos que se deben considerar para la implementación de estas estrategias como las características que debe tener la zona donde se quieren ubicar. Una de los referentes más significativos en la captación de agua por medio de rocío, es la Organización Internacional para la Utilización de Rocío [OPUR], la cual cuenta con diferentes investigaciones y publicaciones basadas en las dimensiones y lugares más estratégicos para la ubicación de estos sistemas.

Otros de los trabajos que se consideraron son los enfocados en sistemas de captación de agua lluvia, ejemplo de ello son las investigaciones de Hofman et, al. (2019), Judeh et, al. (2022) Angelova et, al. (2024) y Jain et, al. (2024), las cuales se centraron en explorar el potencial de estos sistemas, aplicando tecnologías antiguas de captación e integrando métodos tecnológicos actuales que permitan sistematizar los procesos contemplando la adaptación climática y el desarrollo sostenible.

Por otra parte, Toan et, al. (2023) proponen modelos de gestión y sostenibilidad para el abastecimiento de agua en las zonas rurales, por medio de su estudio plantea considerar la gestión pública directa, la pública delegada y la privada delegada, para que los sistemas anteriormente propuestos se implementen de manera apropiada. Por último, proponen la evaluación de la sostenibilidad de las estrategias considerando seis dimensiones, institucional, gerencial, social, financiera, técnica y ambiental. De igual forma, la OMS (2022) diseña la guía para el mejoramiento del suministro en zonas rurales, la cual brinda herramientas para la gobernanza del agua bien sea por la comunidad, el estado o el proveedor del servicio y así

garantizar tanto la continuidad como la calidad de la misma. Ejemplo de lo anterior, es la investigación de Ramos et al. (2025), los cuales aplicaron la guía de la OMS para identificar y mitigar los riesgos asociados al acceso de agua y saneamiento básico.

En la Figura 5 se plasman los estudios anteriormente mencionados que aportaron en esta investigación para el cumplimiento del objetivo 2, 3 y 4 debido a que permite en primera instancia identificar los sistemas de captación no convencionales y por último analizar qué sistema se adapta mejor a las condiciones climáticas e hidrológicas del caso de estudio.

### Figura 5

Principales Autores con Contribuciones al componente 2.



Tomado de autora

Es importante resaltar, que lo mencionado por los autores suma de forma significativa a la investigación debido a que permite seguir ahondando en un tema que no es ampliamente estudiado y que, si considera un impacto ambiental.

## **6.2 Marco Teórico y Conceptual**

Esta investigación se enfoca en la propuesta de metodología para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua en la vereda la Bogotana, siendo este un tema de gran importancia para la gestión del recurso hídrico en las zonas rurales. Es por esto que el presente marco teórico conceptual engloba cada una de las teorías y conceptos que sustentan la investigación, permitiendo comprender y analizar la problemática por medio de temas como lo es el desarrollo sostenible, la gestión ambiental, la gestión integral del recurso hídrico, los sistemas no convencionales de captación de agua, entre otros. A continuación, se describen cada uno de estos conceptos:

Desde el año 1960 la humanidad comenzó a tomar conciencia frente a la degradación ambiental a causa de las presiones antropogénicas, es por esto que surgen conceptos como el **Impacto Ambiental**, el cual se define como la alteración a la calidad del medio ambiente por las actividades humanas, causando la alteración y variabilidad de la temperatura y las variables climáticas definido como **Cambio Climático** (Cipponeri, 2024). En cuanto a la presente investigación, los impactos ambientales asociados a la problemática principal son la contaminación de cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneas, afectación a la biodiversidad por agotamiento y contaminación del recurso hídrico, generación de enfermedades por consumo de aguas contaminadas e impacto a la calidad de vida.

Conforme con lo anterior y con el fin de hacer un cambio frente a la insostenibilidad que presentaba el modelo económico y productivo de la época, por medio del informe de Brundtland, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en el año 1987, define el **Desarrollo**

**Sostenible** como la satisfacción de las necesidades básicas del presente sin comprometer la capacidad para suplir las necesidades de las generaciones futuras (López, p27, 2020).

A partir de este concepto, se considera la **Gestión Ambiental** como un proceso de acciones encaminadas al fortalecimiento del desarrollo sostenible por medio de la planificación y ejecución de estrategias y actividades que permitan la conservación y el uso racional de los recursos naturales (Valverde et al., 2020).

Teniendo en cuenta el concepto anterior, **La Gestión Integral de Recursos Hídricos (GIRH)** como lo menciona Marcillo y Cara, (2021) es una estrategia que busca el uso sostenible y equitativo del agua, por de la adaptación de los sistemas hídricos a las diferentes variables a causa del cambio climático, a partir de la planificación y la gestión del recurso. Según Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente], (2025), la GIRH se define como un proceso de promoción para la gestión y gobernanza del recurso hídrico por medio de la combinación de aspectos como el desarrollo económico, el desarrollo social y la conservación de los ecosistemas.

El **Acceso al Agua Potable** se define como la disponibilidad del agua potable para el consumo humano, garantizando el suministro continuo y de calidad. A partir de este concepto, se considera al **Saneamiento Básico** como las estrategias o medidas implementadas para garantizar la calidad del agua y la reducción de riesgos sanitarios (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2022). Considerando lo anterior, se hace necesario la **Captación de Agua**, la cual se define como la obtención o recolección de agua por medio de diferentes fuentes como lo son las aguas superficiales, las subterráneas y las demás que se deriven del ciclo hidrológico (Centro de Internacional de Acuicultura, 2015).

En zonas rurales, los **Sistemas Convencionales** de captación de agua, como acueductos veredales, pozos profundos o derivaciones superficiales, suelen ofrecer fiabilidad,

disponibilidad continua y mayor regulación sanitaria; sin embargo, presentan altos costos de infraestructura, requieren mantenimiento especializado y pueden generar presiones sobre las fuentes hídricas locales. Frente a estas limitaciones, se han desarrollado **Sistemas no Convencionales**, los cuales priorizan soluciones adaptativas basadas en la disponibilidad local, como la captación de aguas lluvias, micro-represas o tecnologías de recarga artificial, permitiendo una mayor conservación del recurso, el uso de desarrollos tecnológicos para captación y tratamiento de agua, la recirculación y reciclaje del agua y la descentralización (Quon y Jiang, 2023).

Aunque estos sistemas pueden ser sostenibles, de bajo costo y adecuados para comunidades dispersas, también presentan desventajas como variabilidad en la oferta, dependencia de condiciones climáticas, menor capacidad de almacenamiento y posibles riesgos de contaminación si no se implementan con criterios técnicos adecuados. La comparación de ambos enfoques permite comprender la necesidad de metodologías flexibles y replicables para seleccionar alternativas hídricas apropiadas para contextos rurales.

Ahora bien, los sistemas no convencionales suelen ser en su mayoría **Tecnologías Sostenibles**, las cuales buscan reducir los impactos ambientales y conservar los recursos naturales por medio de la creación de estrategias innovadoras que optimicen el uso de recursos generando alternativas de reemplazo y recuperación, reduciendo la pobreza y la desigualdad y beneficiando la economía con el ahorro en costos (Torres y Rubiano, 2020). Ejemplo de ello es la captación de agua de rocío, agua de drenaje agrícola, captación de agua de niebla, colectores de lluvia, entre otros.

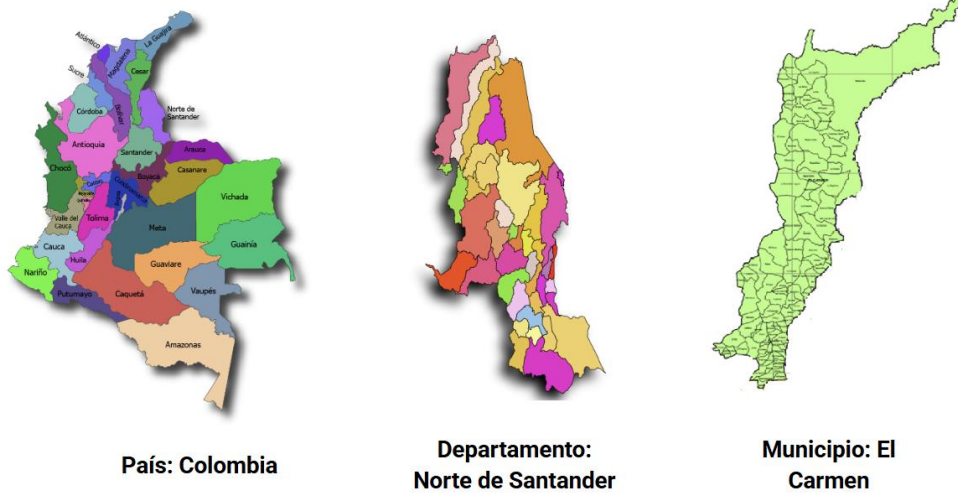
### **6.3 Marco Geográfico**

El área de estudio del proyecto se encuentra ubicada al noreste de Colombia, en la vereda la Bogotana en el municipio El Carmen del departamento de Norte de Santander como se

observa en la Figura 6. Se sitúa al oriente del casco urbano del municipio, limitando al norte con la vereda la Florida, al Sur con la vereda Llanos del Norte, al Occidente con las veredas Aguas Claras y Vegas del Norte (Alcaldía Municipal El Carmen, 2024). Cuenta con un clima cálido, altura entre 761 y 850 Metros Sobre el Nivel del Mar [msnm] y temperatura promedio de 21°C (Minvivienda, 2020). En la Figura 7 se plasma el polígono de la ubicación de la vereda la Bogotana obtenida de Google Earth, y sus respectivas coordenadas (8.857554 y -73.325874).

### Figura 6

Ubicación: Vereda La Bogotana, Municipio el Carmen, Norte de Santander



Tomado de Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], (2018).

## Figura 7

Polígono de ubicación vereda la Bogotana



Tomado de Google Earth, (2018).

### 6.4 Marco Normativo

Se incluyó el marco normativo que aplica para esta investigación, tales como la Constitución Política de Colombia 1991 - Art 79, la Ley 9 de 1979, la Ley 99 de 1993, la Ley 115 de 1994, la Ley 1777 de 2019 y el Decreto 2372 de 2010, el Decreto 1575 de 2007, los cuales serán descritos en el capítulo 8, apartado 8.1.6 factor legal.

### 6.5 Marco Institucional

En la Tabla 1 se relacionan los actores directos e indirectos que influyen en la investigación, considerando como actor principal a la comunidad, la cual participará frecuentemente en la toma de decisiones.

**Tabla 1**

Actores directos e indirectos de la investigación.

<b>Entidad</b>	<b>Funciones</b>	<b>Influencia</b>
Comunidad	Participar, consultas populares, procesos de formación en educación ambiental y conservación del recurso hídrico	Directo
Junta de acción	Promover del desarrollo sostenible en la vereda. Apoyar en la formulación de estrategias que se adapten a las necesidades de la comunidad y a las condiciones del territorio.	Directo
Alcaldía	Apoyar iniciativas sostenibles para el acceso al agua potable y el saneamiento básico. Realizar labores de seguimiento y monitoreo de las condiciones del agua de consumo humano.	Directo
Gobernación de Santander	Apoyar en la inclusión de alternativas sostenibles en el municipio y la vereda, con el fin de fomentar el desarrollo sostenible y así garantizar la conservación de los recursos naturales.	Indirecto
Corporación Autónoma Regional de la frontera nororiental - CORPONOR	Cuidar y conservar los recursos naturales, por medio del establecimiento de programas y el apoyo de la implementación de nuevas tecnologías que fomenten el desarrollo sostenible.	Indirecto
Plan de Desarrollo Municipal	Establecer y diseñar estrategias que permitan mejorar la calidad de vida de la población en el caso de la investigación busca garantizar el acceso a agua potable y el saneamiento básico.	Indirecto

Tomado de Elaboración Propia

## 7. Metodología

A continuación, se presentan los diferentes apartados de la metodología que permitió cumplir los objetivos trazados.

### 7.1 Enfoque

El presente estudio adoptó un **enfoque mixto**, ya que busca integrar el análisis técnico de variables relacionadas con el recurso hídrico y con la comprensión del contexto ambiental y social de la vereda La Bogotana.

La combinación de los enfoques cualitativo y cuantitativo proporcionó una visión integral del problema, al articular datos objetivos con la comprensión de factores sociales, culturales y territoriales. Según Hernández Sampieri et al. (2014), el enfoque mixto es especialmente útil cuando se busca comprender fenómenos complejos en contextos reales, ya que permite analizar múltiples dimensiones de un mismo problema y fortalecer la validez de los resultados a través de la triangulación metodológica. Esta integración sustenta la toma de decisiones para una solución sostenible, pertinente y contextualizada.

Desde lo **cuantitativo**, se analizaron datos climatológicos y meteorológicos del municipio, como la precipitación, humedad relativa, punto de rocío, nivel freático y temperatura con base en lo registrado en la información satelital disponible teniendo en cuenta que en la zona de estudio no se cuenta con estaciones meteorológicas cercanas. Esto permitió realizar una evaluación comparativa entre diferentes sistemas no convencionales de captación de agua con el fin de establecer cuál es el más eficiente bajo criterios de sostenibilidad.

Respecto a lo **cualitativo**, se tuvo en cuenta la percepción frente al servicio de agua potable, identificando sus prácticas locales de gestión del recurso, lo cual permitió evaluar el comportamiento de los sistemas, considerando no sólo su viabilidad técnica, sino también su adaptación al entorno social y ambiental de la región.

## 7.2 Alcances

La investigación tiene tres alcances: **descriptivo, explicativo y propositivo**. En la fase descriptiva se identificaron las condiciones hidroclimáticas de la zona de estudio. Desde lo explicativo, se analizaron las relaciones entre variables técnicas, sociales y ambientales que influyen en el desempeño de los sistemas de abastecimiento. Finalmente, en lo propositivo, se plantearon alternativas tecnológicas no convencionales viables y sostenibles, ajustadas a las condiciones del contexto local. Este tipo de estudio, según Hernández et al., (2018), permite no sólo describir y comprender fenómenos complejos, sino también generar propuestas orientadas a resolver problemáticas reales en contextos específicos.

## 7.3 Método

El estudio se desarrolló bajo un **diseño no experimental**. Se abordó una situación real sin modificar variables, observando y analizando el comportamiento de diferentes sistemas de captación de agua en su contexto natural. Este método permitió examinar a fondo las características físicas, técnicas y sociales del abastecimiento en la vereda, lo que facilitó un análisis integral. Yin (2018) destaca que el estudio de caso es adecuado para investigaciones que buscan comprender fenómenos complejos en profundidad, especialmente cuando están estrechamente ligados a su contexto.

## 7.4 Técnicas

Se aplicaron diversas **técnicas de recolección de información** tanto cualitativas como cuantitativas. Entre las cualitativas se emplearán la revisión sistemática de la existencia y comportamiento de los sistemas no convencionales y en la cualitativas se realizó un análisis de las condiciones climáticas, meteorológicas, hidrológicas, hidrogeológicas e hídricas del territorio. Flick (2012) afirma que la combinación de técnicas permite capturar la complejidad de los fenómenos sociales y técnicos, y que su aplicación debe responder a los objetivos específicos del estudio.

## 7.5 Instrumento

Los **instrumentos** que se utilizaron, estuvieron diseñados para recoger información pertinente y confiable. Se desarrollaron matrices para consolidar y sistematizar literatura técnica y normativas, documentos institucionales como el Plan de Desarrollo Municipal y mapas hidrogeológicos para registrar aspectos del sistema hídrico, sanitario y las condiciones del servicio de agua, software de análisis de condiciones climatológicas. De acuerdo con Taylor y Bogdan (1992), los instrumentos en la investigación deben adaptarse al contexto del estudio y garantizar la validez de la información recolectada mediante estrategias diversificadas.

## 7.6 Matriz Metodológica

A continuación, en la Tabla 2 se presenta la matriz metodológica donde se describen el enfoque, alcance, método, técnica e instrumentos de cada uno de los objetivos específicos, considerando que el objetivo general de la investigación es diseñar una metodología sostenible y replicable para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua en la vereda La Bogotana, municipio El Carmen - Norte de Santander, basada en la caracterización PESTEL y el análisis comparativo de alternativas sostenibles, que permita optimizar la gestión y el abastecimiento hídrico en zonas rurales con características similares.

**Tabla 2**

Matriz metodológica

Objetivos Específicos	Enfoque	Alcance	Método	Técnica	Instrumento
Caracterizar las condiciones de la vereda la Bogotana aplicando la herramienta estratégica PESTEL (Políticos, Económicos, Sociales, Tecnológicos, Ecológicos y Legales), mediante el análisis de datos históricos,	Mixto	Descriptivo		Técnicas de recolección mixta - revisión documental y obtención de datos	Herramientas satelitales CHIRPS, Terraclimate, mapas hidrogeológicos

<b>Objetivos Específicos</b>	<b>Enfoque</b>	<b>Alcance</b>	<b>Método</b>	<b>Técnica</b>	<b>Instrumento</b>
con el fin de comprender su influencia en el abastecimiento de agua durante los últimos veinte años.			Método de estudio de caso - Diseño No Experimental		
Identificar seis sistemas no convencionales de captación de agua que sean eficientes y sostenibles, a partir de una revisión documental, con el fin de establecer opciones viables para la vereda La Bogotana.	Cualitativo	Explicativo		Técnicas de recolección de información - revisión sistémica de la literatura	Documentos de investigación, matrices de evaluación
Diseñar una matriz de comparación basada en criterios técnicos, ambientales y sociales que permita relacionar los sistemas no convencionales de captación de agua basado en indicadores de eficiencia, adaptabilidad y sostenibilidad.	Cuantitativo	Propositivo		Técnicas de recolección de información - revisión sistémica de la literatura	Documentos de investigación, matrices de evaluación
Evaluar tres sistemas no convencionales de captación de agua con mayor potencial de implementación en la vereda La Bogotana, con base en sus características físicas, sociales y ambientales, con el fin de determinar su viabilidad en el contexto local.	Mixto	Propositivo		Técnicas de recolección de información - revisión sistémica de la literatura	Matriz de evaluación
Formular una metodología para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua, basada en los criterios y resultados obtenidos en el estudio, con el propósito de facilitar la toma de decisiones en comunidades rurales con condiciones similares a las de la vereda La Bogotana.	Cualitativo	Propositivo		Análisis documental	Metodología

Tomado de Elaboración Propia

## **8. Resultados**

Este capítulo de la investigación contiene los resultados obtenidos por cada uno de los objetivos específicos, los cuales permitieron determinar la metodología para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua en la vereda La Bogotana, municipio El Carmen - Norte de Santander, con el fin de replicar dicha metodología en zonas con características similares. La investigación contó con un enfoque mixto que facilitó la recopilación y el análisis de datos de variables mediante la aplicación de la metodología PESTEL de la zona de estudio. Además, se recopiló información asociada a los sistemas no convencionales de captación de agua. El estudio tuvo un alcance descriptivo, explicativo y propositivo, lo cual permitió plantear alternativas sostenibles, no convencionales y adaptadas al contexto local para la captación de agua.

Los resultados obtenidos evidenciaron la importancia de conocer las características de la zona de estudio para poder seleccionar los sistemas de mayor eficiencia para la captación de agua que se adapten a la zona de estudio, además, a partir de los resultados se logró evidenciar la existencia de gran variedad de sistemas no convencionales que se adaptan a diferentes condiciones climáticas. Así mismo, se identificó que el sistema de mayor adaptabilidad a las condiciones es el de recolección de agua lluvia. Los sistemas de recarga artificial de acuíferos y de aprovechamiento de aguas subterráneas presentaron menor potencial por ausencia de acuíferos cerca de la zona.

### **8.1 Caracterización de las Condiciones de la Zona de Estudio**

La caracterización de la zona de estudio constituyó es un componente fundamental en la investigación, ya que permitió obtener un panorama integral del contexto local mediante la aplicación de la herramienta estratégica PESTEL considerando criterios climáticos, demográficas, sociales, económicos y ambientales. Esta caracterización facilitó la comprensión

de las dinámicas y el comportamiento hidrológico de la zona, aspectos fundamentales para la selección adecuada de sistemas no convencionales de captación de agua. Este apartado aborda cinco factores de análisis por medio de los cuales se hace la descripción del territorio, los cuales se enuncian a continuación:

### **8.1.1 Políticos**

El factor político, dentro de la herramienta estratégica PESTEL, tiene una influencia significativa en la presente investigación, debido a que incide en la toma de decisiones, la asignación de recursos para el financiamiento de los proyectos, y el cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS-6), entre otros. A continuación, se presentan los principales aspectos políticos que aportan al desarrollo y aplicación de la investigación.

En primera instancia, el departamento del Norte de Santander cuenta con la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental [CORPONOR], la cual se encarga de la ejecución de programas enfocados hacia el cuidado, la protección del medio ambiente y la gestión sostenible de los recursos naturales. En esta investigación, la participación de CORPONOR se ve asociada a su función número 3, que promueven actividades o programas que protejan y manejen de forma adecuada los recursos naturales (CORPONOR, 2024)

Asimismo, la Alcaldía municipal de El Carmen (Norte de Santander), desempeña un papel clave mediante el Plan de Desarrollo Municipal que cuenta con una línea estratégica enfocada hacia la sostenibilidad ambiental. Este plan contempla la creación de programas que permitan la protección y recuperación de nacederos y fuentes hídricas que abastecen de agua al municipio y sus veredas, todo esto armonizado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (Alcaldía Municipal de El Carmen, 2024).

Por último, la vereda la Bogotana cuenta con la conformación de la Junta de Acción Comunal (Auto No. 1 085). Sin embargo, no se cuenta con información que permita identificar la creación de planes o políticas que promuevan el acceso al agua potable.

### **8.1.2 Económicos**

La economía del municipio de El Carmen y 98 sus veredas se basan principalmente en el sector agropecuario y de servicios, representando para el año 2022 un valor de 85.32 y 61.62 miles de millones de pesos, respectivamente, generados en su mayoría con medianos y pequeños productores. Teniendo en cuenta el inventario pecuario realizado por la Unidad para el Desarrollo Rural Agropecuario (UPRA), el municipio centra su mayor actividad económica en la ganadería bovina de la cual producen y comercializan productos derivados como la leche, el cuero, y otros subproductos. Los cultivos de mayor producción son yuca, plátano, cacao, cebolla, entre otros (Alcaldía Municipal de El Carmen, 2024). Es importante aclarar que el sector agrícola es uno de los sectores que más demanda agua. En Colombia se consumen aproximadamente 16 mil millones de metros cúbicos de agua destinados para la agricultura (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022), lo cual resalta la necesidad de implementar sistemas de captación eficientes y sostenibles en zonas rurales como La Bogotana

Teniendo en cuenta, la ficha demográfica del municipio, para el año 2020 el Índice de Pobreza Multidimensional (IMP) fue del 36.8% de la población total, así mismo el 48.7% de la población presentó necesidades básicas y el 24.8% se encontraban en miseria extrema. Una de las variables que aporta en el aumento del índice de la pobreza, es el acceso a servicios públicos, ejemplo de ello se presenta en las zonas rurales donde para el 2022 la cobertura de acueducto y alcantarillado rural alcanzó apenas el 16.3% (Alcaldía Municipal de El Carmen, 2024), evidenciando una brecha significativa en el acceso al agua potable.

### **8.1.3 Sociales**

Según el Plan de Desarrollo municipal, El Carmen para el año 2024 contó con 15.080 habitantes de los cuales el 51.7% son hombres y el 48.3% son mujeres. Del total de los habitantes el 82.4% se encuentra ubicado en las zonas rurales y el 17.6% en zona urbana. La vereda la Bogotana cuenta con un total de 480 habitantes (Yenedith Cuellar, 11 de febrero de 2025).

La vereda la Bogotana cuenta con un centro educativo rural el cual tiene la capacidad de 140 estudiantes (Yenedith Cuellar, 11 de febrero de 2025).

Conforme con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, en su publicación sobre la Captación y el Almacenamiento de Agua Lluvia para la Agricultura en América Latina (2013), los usos de agua para fincas o zonas rurales se divide en agua de consumo familiar para consumo doméstico, agua para consumo animal y agua vegetal, así mismo, se establece que la necesidad de agua al día se encuentra entre 25 y 80 litros al día. Sin embargo, teniendo en cuenta que el clima de la zona de estudio es cálido se tomó como referencia 80 litros de agua al día por persona, para un total de 14016 m<sup>3</sup> al año.

### **8.1.4 Tecnológicos**

En materia tecnológica, tanto en infraestructura como en servicio, se puede evidenciar que el 037% de los hogares del municipio de El Carmen cuenta con acceso a banda ancha, así mismo, en las zonas rurales la cobertura de energía eléctrica alcanza el 75% para el año 2019 (Alcaldía Municipal de El Carmen, 2024).

En cuanto a sistemas para la gestión de agua, el municipio cuenta con una planta de potabilización de agua. Sin embargo, en el informe de gestión del Plan de Desarrollo Municipal 2024 se menciona la necesidad de mejorar la calidad del agua, por lo cual hacen la reposición del desarenador (Alcaldía Municipal de El Carmen, 2024).

La vereda la Bogotana no cuenta con una planta de tratamiento de agua potable, la captación de agua se hace por medio de gravedad de la caída del agua de la quebrada La Cristalina, la cual pasa a un tanque con filtro de sólidos de gran tamaño, posteriormente pasa a un tanque por medio redes de tubería de distribución y finalmente se recolecta para el consumo humano (Yenedith Cuellar, 11 de febrero de 2025).

### **8.1.5 Ecológicos**

Con el fin de realizar el análisis del factor ecológico del PESTEL se realizó una clasificación de los componentes que determinan las condiciones del territorio de la siguiente forma:

#### **8.1.5.1 Hidroclimatológicos**

Con el propósito de contribuir a una mejor la gestión hídrica en la comunidad rural de la vereda la Bogotana, se llevó a cabo un análisis hidroclimático que permitió comprender la interacción entre fenómenos hidrológicos como fuentes de agua superficiales, cuencas, precipitación, entre otros) y factores climáticos tales como temperatura, punto de rocío, evapotranspiración, evaporación, velocidad del viento).

El análisis climatológico de la zona de estudio se realizó, conforme con los criterios establecidos en la Guía de Prácticas Climatológicas de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2018), la cual recomienda un periodo mínimo 30 años para para la recolección de datos de precipitación y al menos 10 años para las demás variables climáticas. Sin embargo, para la presente investigación se seleccionó un periodo de 20 años comprendido entre el 2005 y 2024, debido a la disponibilidad de información proveniente de los productos satelitales como CHIRPS y Terraclimate (Abatzoglou et al.,2018), empleados para el análisis.

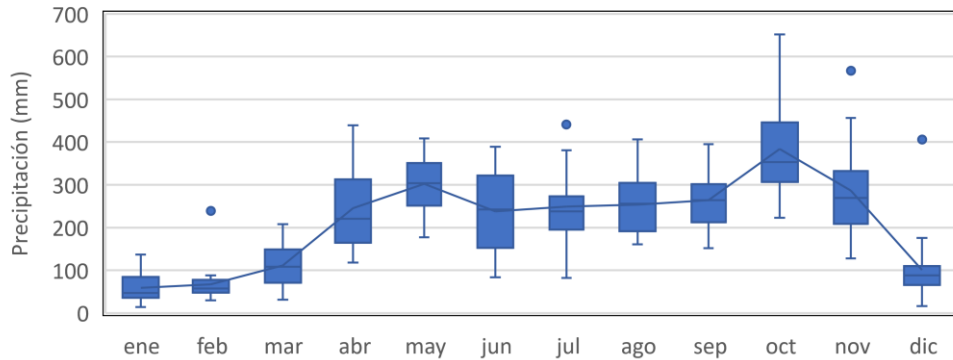
#### **8.1.5.1.1 Precipitación**

Para la obtención de los datos de precipitación, se consideró como fuente el producto satelital Terraclimate, un conjunto de datos mensuales que proporciona información sobre el clima y el balance hídrico para superficies terrestres a escala global. Este producto emplea una técnica de interpolación asistida por el clima, que combina las normales climatológicas de alta resolución espacial con otros datos de menor resolución, pero con variación temporal. Además, integra diversas fuentes, como **CHIRPS, ERA5 y FLDAS**, lo que permite generar estimaciones confiables de variables meteorológicas, climatológicas y de balance hídrico (Abatzoglou, et, al. 2018). Para el análisis de la precipitación en esta investigación, se seleccionaron los datos diarios suministrados por el producto CHIRPS, en el polígono presentado en la figura 7, con una resolución espacial de 4.8 km debido a su cobertura global en especial en zonas tropicales y subtropicales. Según Rivas (2016) este es uno de los productos de precipitación más recomendados, ya que combina datos de estaciones pluviométricas con estimaciones de sensores satelitales, lo que mejora su precisión.

En la figura 8 se observa el comportamiento mensual de la precipitación en la zona de estudio durante el periodo analizado. Se evidencia que entre los meses de diciembre a marzo se presenta menor pluviosidad entre 20 y 120 mm considerándose como la época seca. En contraste, el periodo entre los meses de abril y noviembre se considera la época de lluvias registrándose precipitaciones entre 150 y 400 mm. Según la gráfica, octubre es el mes de mayor precipitación registrando valores entre 300 y 400 mm mensuales. Adicionalmente, los meses de febrero, julio, noviembre y diciembre se presentaron comportamientos atípicos en comparación con los patrones esperados, lo cual podría estar asociado a fenómenos climáticos locales o globales como El Niño o La Niña.

### Figura 8

Comportamiento mensual de la precipitación vereda en la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.

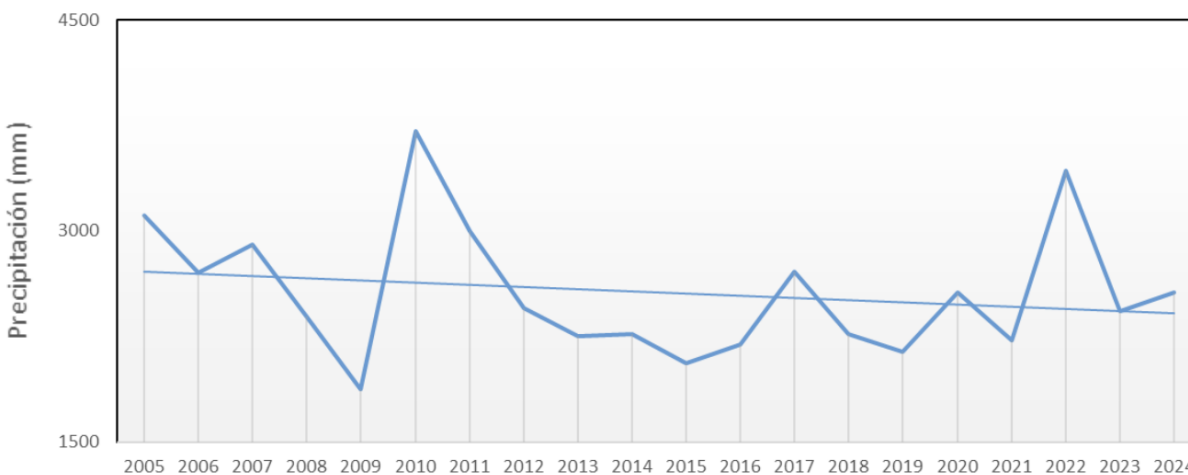


Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

En la Figura 9 se representa el comportamiento de la precipitación anual durante el periodo comprendido entre los años 2005 y 2024 con un valor promedio de 2562 mm, así mismo se evidencia una leve tendencia de disminución de lluvias a lo largo del tiempo. El año de mayor pluviosidad fue el 2010 con un valor de 3713 mm y el más seco fue el 2009 con un valor de 1874 mm.

## Figura 9

Comportamiento anual de la precipitación vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.



Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

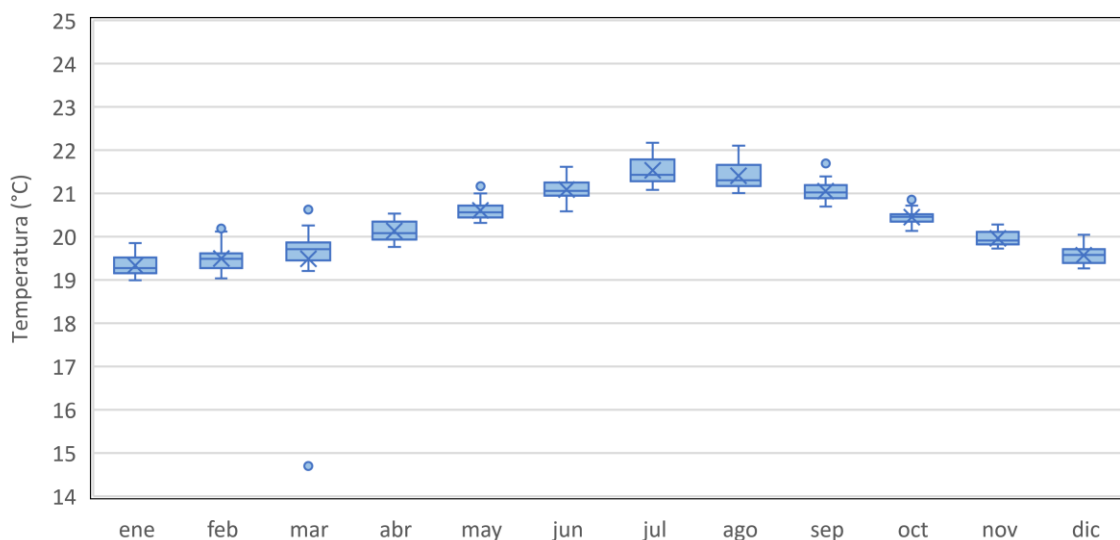
### 8.1.5.1.2 *Temperatura Media*

La temperatura fue una de las variables clave en la presente investigación, debido a que influye directamente en procesos como la evapotranspiración y el ciclo hidrológico (Monterroso & Gómez, 2021). Para su análisis, se utilizaron datos del producto Terraclimate, específicamente del conjunto ERA5 con una resolución espacial de 9,6 km. ERA5 es un producto de re análisis que combina datos obtenidos de satélites, proyecciones climatológicas y estaciones meteorológicas desde 1940 (ECMWF, 2025). Se seleccionó este producto debido a que permite obtener datos de temperatura a nivel global incluyendo las zonas rurales, así como identificar comportamientos climáticos y tendencias del cambio climático, adicionalmente el estudio realizado por Sánchez (2024) permitió evidenciar que para variables como la temperatura se recomienda el uso del ERA5 debido a su buen desempeño.

En la Figura 10 se presenta el comportamiento mensual de la temperatura media, donde se evidencia que los meses con temperaturas más altas son julio y agosto con temperaturas de 22,8 °C y 22,6 °C respectivamente, de igual forma los meses con menores temperatura se encuentran entre diciembre y marzo por debajo de los 20 °C. Es importante resaltar que, la mediana de la temperatura se mantiene relativamente constante a lo largo del año, No obstante, se identificó, aunque en el mes de marzo se obtuvo un dato atípico de 14,7 °C significativamente inferior al promedio mensual, posiblemente asociado a un evento climático puntual.

### Figura 10

Comportamiento mensual de la temperatura media vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.

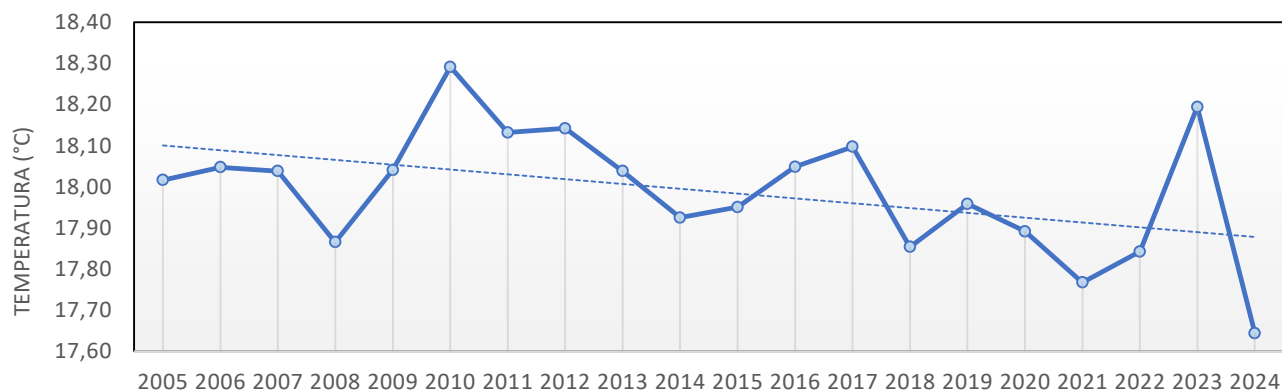


Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

En la Figura 11 se representa el comportamiento anual de la temperatura media durante los años 2005 y 2024, donde se evidencia la tendencia casi lineal, sin embargo, del 2012 al 2017 se presentaron temperaturas más altas con valores entre 20,3 °C y 20,65 °C, en el 2024 se presentó una variación inferior con un valor de 20,03 °C.

## Figura 11

Comportamiento anual de la temperatura media vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.



Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

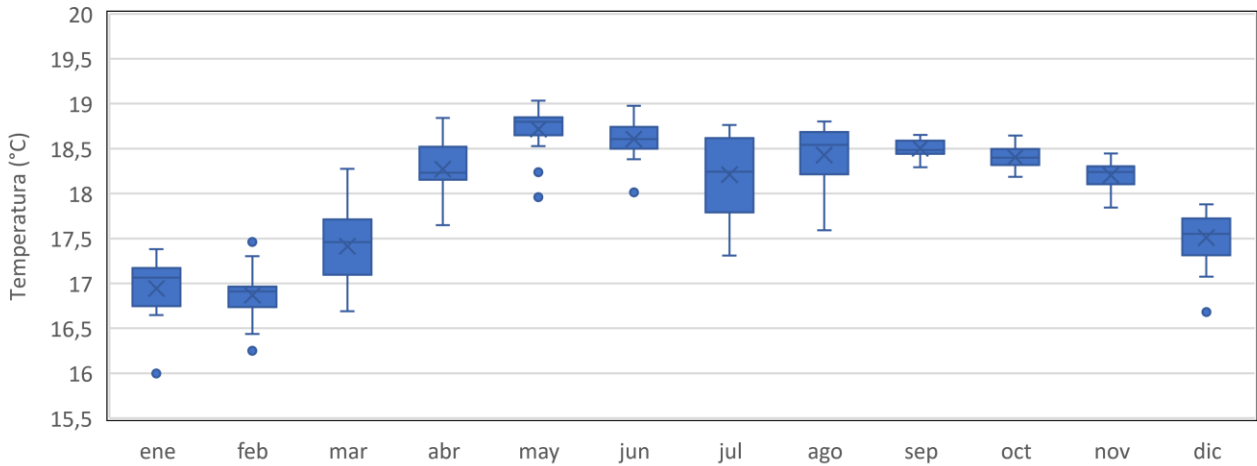
### 8.1.5.1.3 Temperatura Media de Rocío

La temperatura de rocío es una variable que permite identificar el punto en el que el vapor de agua se empieza a condensar y se crean gotas de agua sobre diferentes superficies. Esta variable es importante para la caracterización y el análisis hidroclimático de la zona de estudio debido a que es un factor incidente en la humedad del aire y en la hidrología (Ernesto, 2020). Así como la temperatura media, para esta variable se obtuvo la información de Terraclimate por medio del conjunto de datos de producto ERA5 a una escala de 9,6 km.

En la Figura 12 se presenta el comportamiento mensual de la temperatura media del punto de rocío donde se observa que los meses más secos son diciembre, enero, febrero y marzo con temperaturas entre los 16°C y los 18°C, los meses con mayor cantidad de vapor de agua o de mayor humedad se presentan entre abril y noviembre con temperaturas entre los 18°C y los 19°C.

## Figura 12

Comportamiento mensual de la temperatura media del punto de rocío vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.

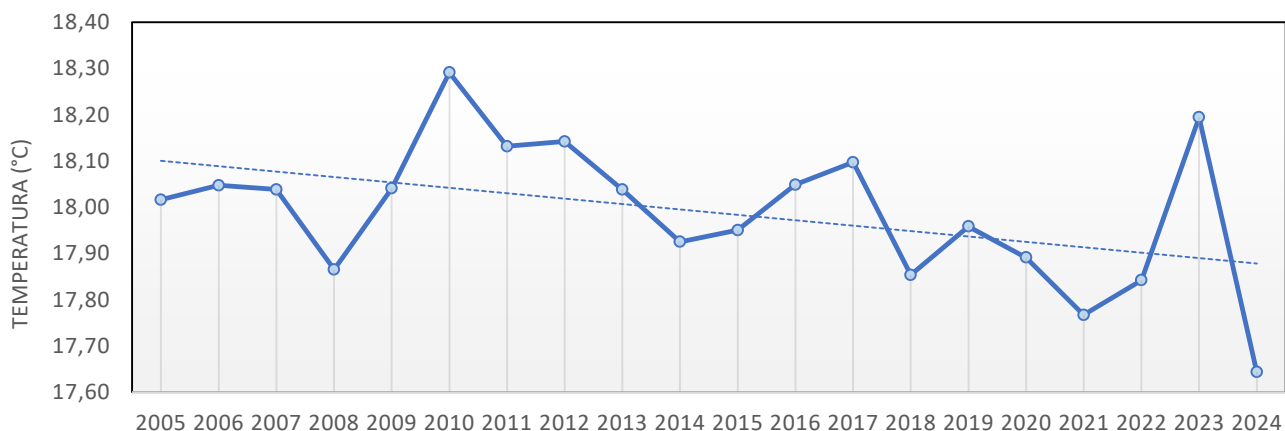


Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

Así como las variables anteriores, el comportamiento anual de la temperatura media del punto de rocío tiende a disminuir con el pasar de los años, en la Figura 13 se observa una tendencia casi lineal, con comportamientos atípicos altos en los años 2010 con 18,29 °C y 2023 con 18,19 °C, y temperatura de rocío bajas en el 2008 y 2024 con valores de 17,87 °C y 17,64 °C respectivamente, la temperatura de rocío se encuentra entre los 17°C y los 18°C.

**Figura 13**

Comportamiento mensual de la temperatura media del punto de rocío vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.



Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

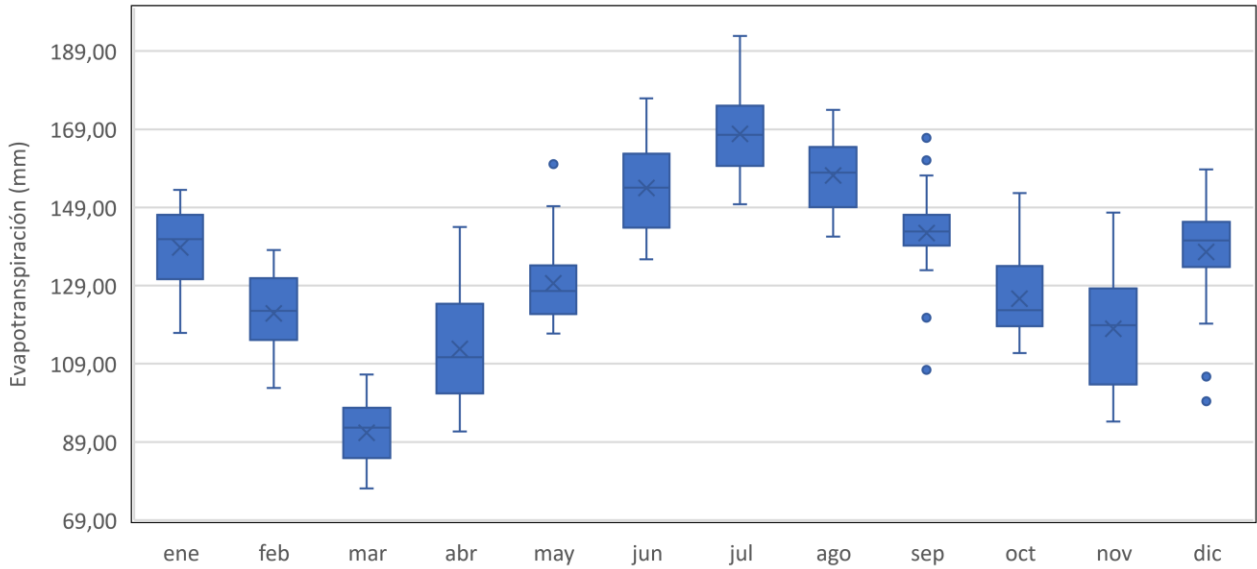
#### **8.1.5.1.4 Evapotranspiración**

La evapotranspiración es la cantidad de agua que se pierde durante el proceso de evaporación del suelo o de fuentes superficiales y la transpiración o liberación de agua por medio de las plantas, esta variable es crucial en el análisis hidrológico debido a que es incidente en la infiltración, escorrentía y el balance hídrico y energético del agua, así mismo influye en la vegetación y la agricultura (Muñoz, 2023). Los datos de evapotranspiración se obtuvieron de Terraclimate por medio del conjunto de datos de producto FLDAS a una escala de 9,6 km.

Conforme con los datos obtenidos de la evapotranspiración para la zona de estudio se puede observar en la Figura 14 que el mes de mayor evapotranspiración es julio con 175 mm, el mes de menor valor es marzo con datos entre 80 mm y 100 mm. Esta variable, durante el periodo analizado presentó un comportamiento de picos altos entre los meses de mayo y octubre con valores entre 120 mm y 175 mm y picos bajos entre febrero, abril y noviembre con un rango de 110 mm a 80 mm.

**Figura 14**

Comportamiento mensual de la evapotranspiración vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.

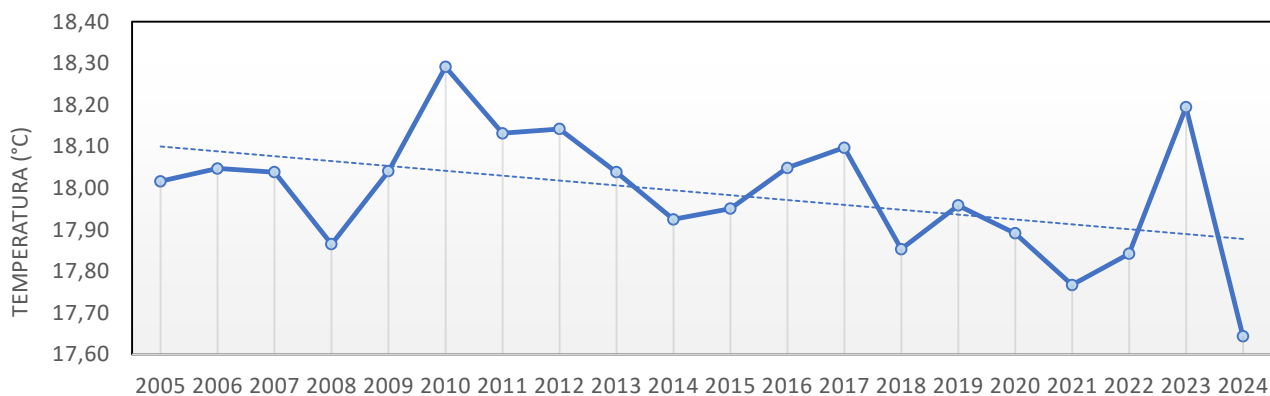


Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

El comportamiento anual de la evapotranspiración en la zona de estudio presenta una tendencia casi lineal, sin embargo, en la Figura 15 se observa un comportamiento atípico altos en el año 2021 con 144,1 mm y un atípico bajo en el 2010 con 121,28 mm y en el 2011 con un valor de 124,71 mm.

**Figura 15**

Comportamiento mensual de la evapotranspiración en vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.



Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

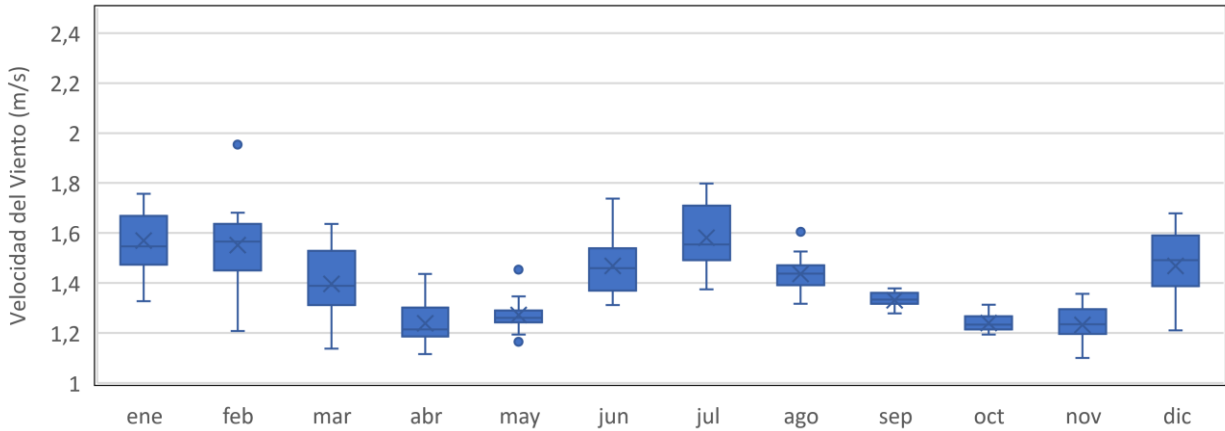
#### **8.1.5.1.5 Velocidad del Viento**

La velocidad del viento influye directamente en el comportamiento de algunas condiciones hidroclimáticas de la zona de estudio, como lo es la evapotranspiración debido a que a mayor velocidad del viento es mayor tanto la evaporación de agua como la remoción de la humedad en plantas (Flores, 2018). Los datos de la velocidad del viento se obtuvieron de Terraclimate por medio del conjunto de datos de producto ERA5 a una escala de 9,6 km.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de la velocidad del viento, para la zona de estudio se obtuvo que la velocidad anual promedio es de 1,40 m/s, en la Figura 16 se puede observar que los meses de mayor velocidad fueron enero, febrero, julio y diciembre con velocidades entre 1,75 m/s y 1.67 m/s, los meses en los que se presentó menor velocidad fueron abril, mayo, octubre y noviembre con valores entre 1,09 m/ y 1,20 m/s, en el mes de febrero se presentó un valor atípico en febrero logrando una velocidad de 2 m/s.

**Figura 16**

Comportamiento mensual de la velocidad del viento en vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.

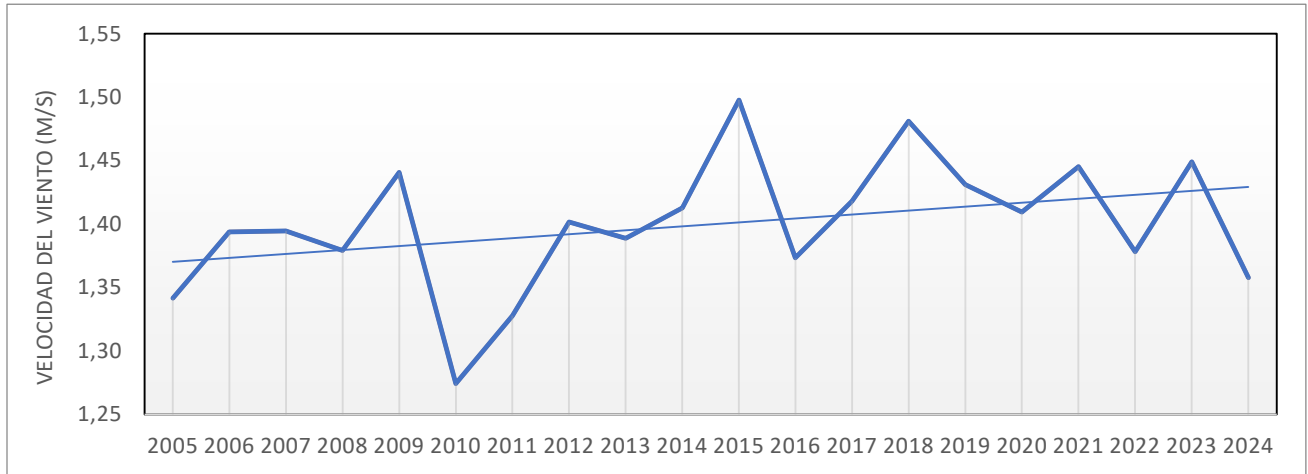


Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

En la Figura 17 se puede observar el comportamiento anual de la velocidad del viento en la zona de estudio, donde se presenta una tendencia casi lineal que aumenta mínimamente con el pasar de los años, así mismo, se puede evidenciar comportamiento atípico bajos en el año 2010 con 1,27 m/s y un valor atípico alto en el 2015 con 1.50 m/s.

### Figura 17

Comportamiento anual de la velocidad del viento en vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.

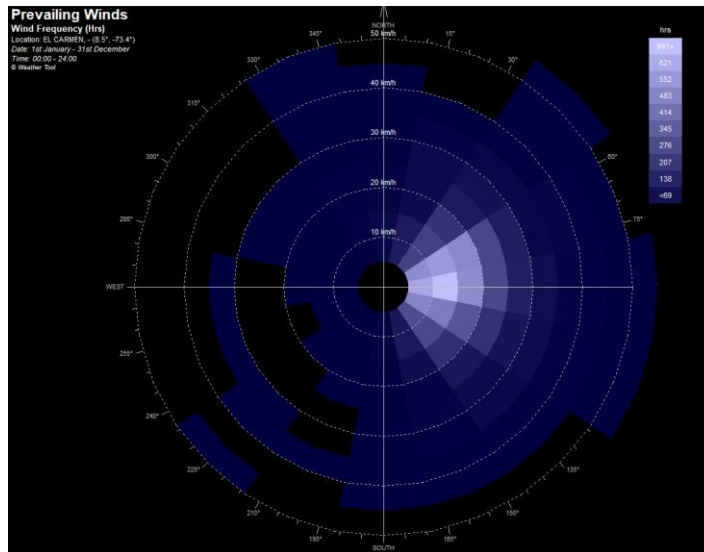


Elaborado a partir de la base de datos de Abatzoglou et al.,2018.

En la Figura 18 se plasma la rosa de los vientos del municipio del Carmen, Norte de Santander, donde se observa que la dirección del viento proviene principalmente del occidente con direcciones de noroccidente y suroccidente hacia nororiente y suroriente. Es importante resaltar que la velocidad del viento se mantiene en un rango entre 1,25 m/s y 1,50 m/s.

## Figura 18

Comportamiento promedio anual dirección del viento municipio del Carmen, Norte de Santander



Tomado de Weather Tool

### 8.1.5.2 Hidrogeológico

En la presente investigación, el análisis hidrogeológico fue fundamental, debido a que permitió estudiar y analizar la topografía y geología en relación con el agua subterránea de la zona de estudio, considerando aspectos clave como las propiedades químicas y físicas, la profundidad del nivel freático, tipo de acuífero, la estructura geológica y el tipo de suelo. De igual forma, el estudio hidrogeológico de la zona facilitó, en primera instancia determinar si la disponibilidad de agua permite su aprovechamiento y así evaluar la posibilidad de procesos como infiltración y recarga artificial de acuíferos (Ccahuana, 2025).

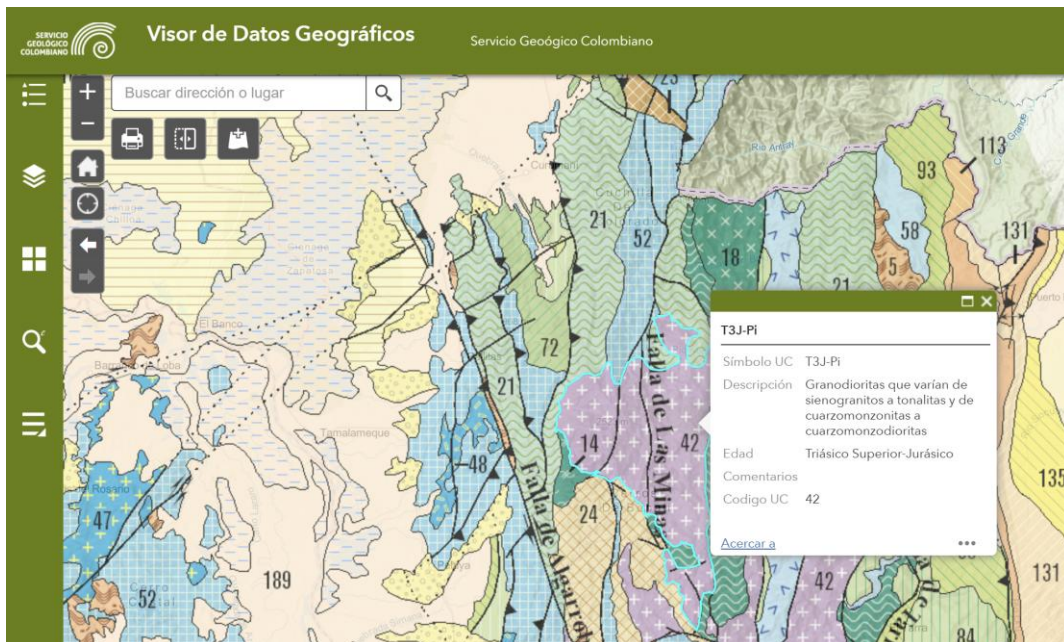
La información necesaria para este análisis se obtuvo a través de portales interactivos y estudios técnicos desarrollados por entidades oficiales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, el Servicio Geológico de Colombia y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

### 8.1.5.2.1 Geología

El análisis geológico de la zona de estudio se realizó por medio del Visor de Datos Geográficos y del Atlas Geológico de Colombia del 2023, plancha 5-04 a escala 1:500 000, del Servicio Geológico Colombiano. En la Figura 19 se puede observar que la vereda la Bogotana se ubica cerca a la falla geológica de las Minas la cual influye en el flujo y la distribución del agua subterránea, así mismo, se encuentra conformada en su mayoría por rocas ígneas plutónicas de composición intermedia y unidades cronoestratigráficas constituidas por granodioritas, presentando baja porosidad y permeabilidad, lo que dificulta el almacenamiento y flujo de agua subterránea (IGAC, 2022) y (Gómez et al., 2015), ver anexo 2 Atlas Geológico de Colombia plancha 5-04.

#### Figura 19

Geología vereda la Bogotana, municipio el Carmen, Norte de Santander. Indicar en un punto la ubicación de la vereda.



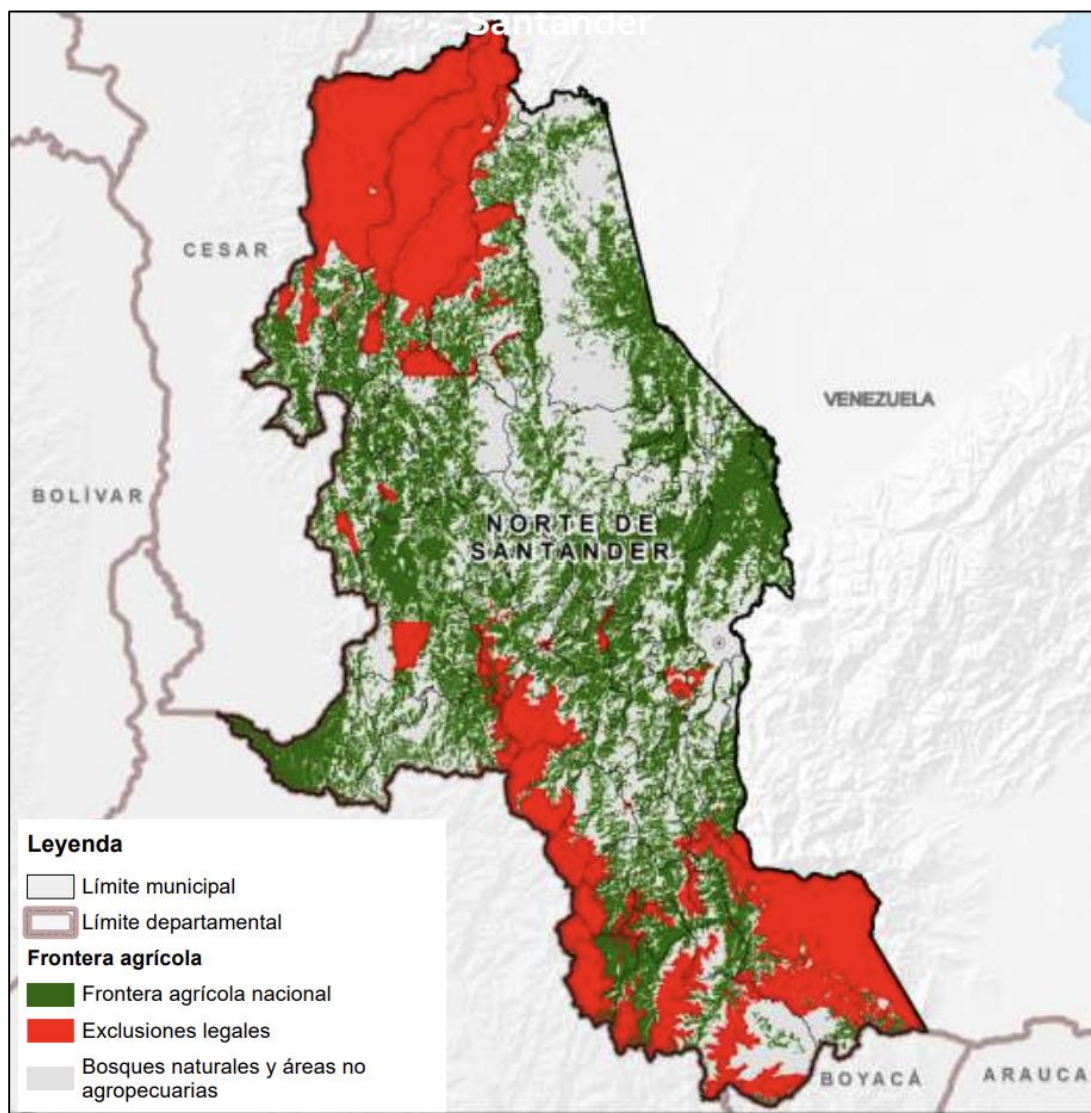
Tomado de (Gómez et al., 2015)

#### **8.1.5.2.2 Suelos**

El departamento del Norte de Santander presenta en su mayoría de municipios suelos de ordenes Inceptisoles característicos de ecosistemas forestales y tierras agrícolas, y Entisoles en suelos para cultivos cortos, cuenta con texturas franco arcillosas y franco arenosas las cuales presentan gran capacidad de retención de agua y son ideales para la agricultura (Castellanos et al., 2021). En la Figura 20 se pueden observar los principales usos del suelo según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), 2023, donde se evidencia que el departamento centra su uso del suelo en la agricultura, así mismo cuenta con las siguientes zonas de exclusión legal: parque natural regional 2,85%, zonas de reserva forestal tipo A 8,3%, áreas del sistema de parques nacionales naturales 9,8%, páramo 6,4%, distritos de manejo integrado 1,34% y reserva forestal protectora 0,6%.

**Figura 20**

Distribución uso de suelos departamento Norte de Santander.



Tomado de UPRA, 2023 (Agrandar).

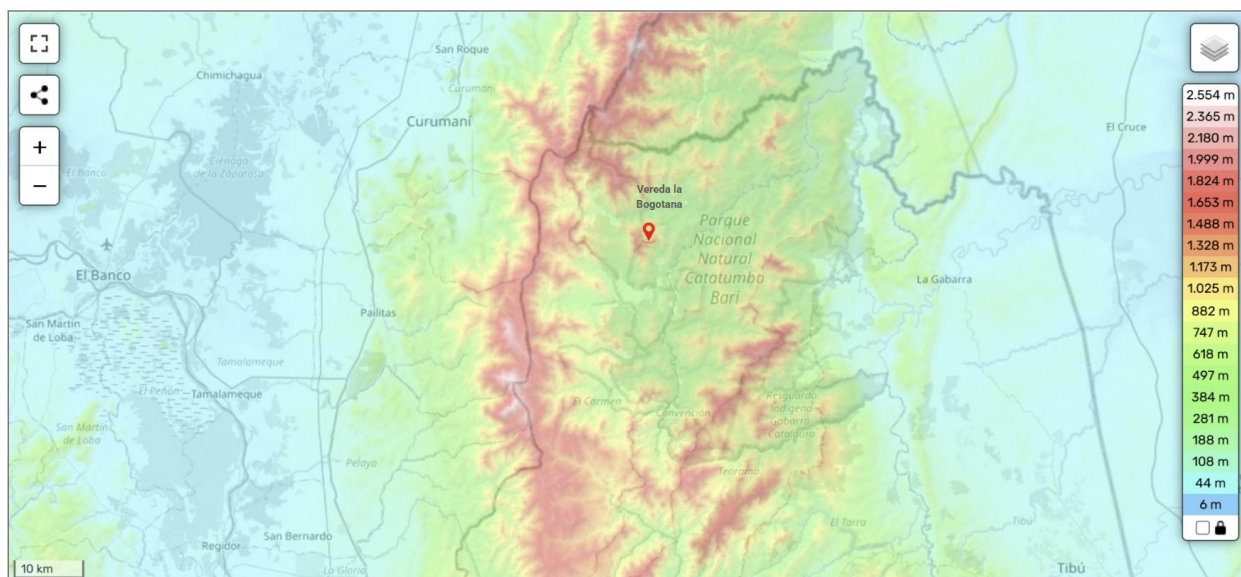
### **8.1.5.2.3 Topografía**

El análisis topográfico se realizó con base en la información obtenida del IGAC a partir de la plancha cartográfica a escala 1:1.200.000 y del visor geográfico Topographic. El municipio de El Carmen presenta una topografía con altitud media, alcanzando alturas aproximadas de 1000

msnm debido a que se encuentra ubicada sobre la cordillera oriental de los Andes. En la Figura 21 se presenta el relieve del municipio el cual está compuesto principalmente de zonas montañosas, serranías y valles fluviales, entre los cuales se destaca el **valle del río** Catatumbo (IGAC,2006).

**Figura 21**

Topografía municipio el Carmen, Norte de Santander.



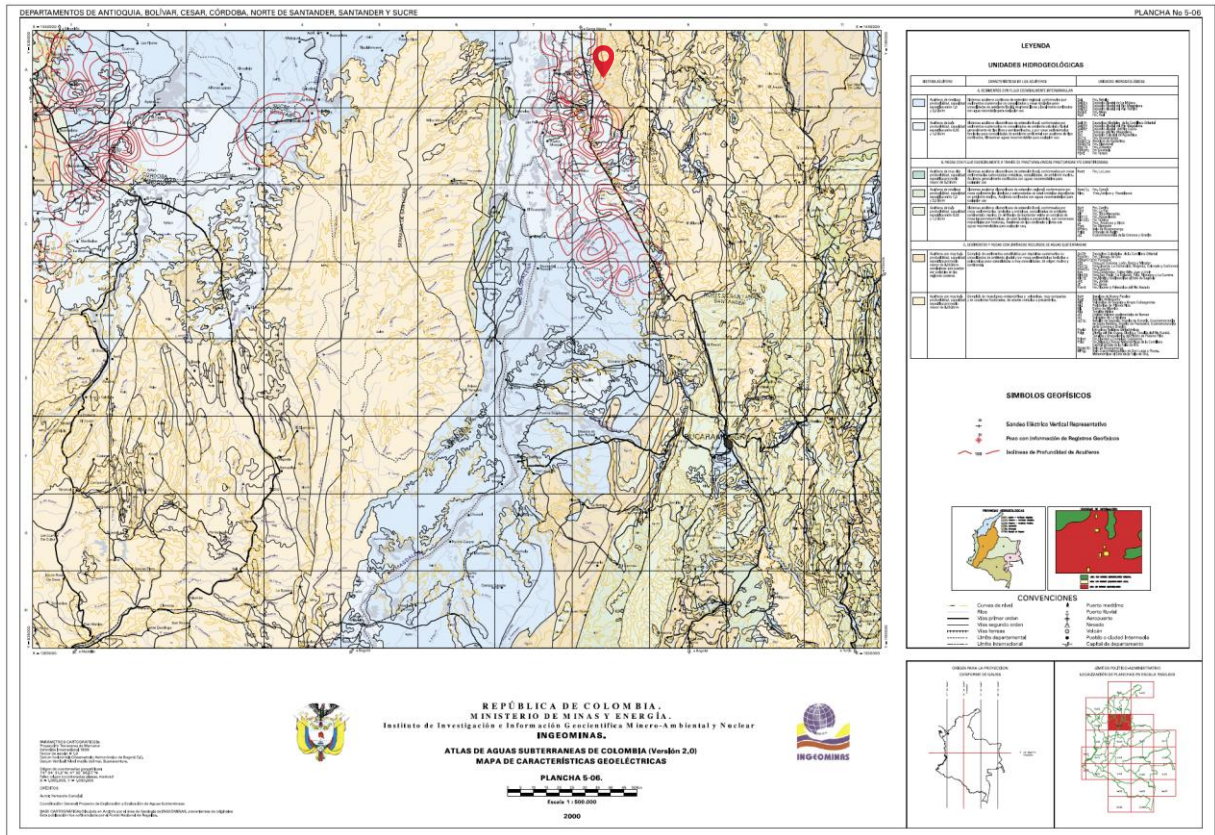
Tomado de <https://es-co.topographic-map.com/map-f9q7zs/El-Carmen/>

#### **8.1.5.2.4 Aguas Subterráneas**

La descripción de las aguas subterráneas de la zona de estudio se obtuvo del atlas de aguas subterráneas de Colombia del Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero – Ambiental y Nuclear (INGEOMINAS) en su plancha 5-06 a escala 1: 500.000. En la Figura 22 se plasma las unidades hidrogeológicas, donde se puede evidenciar que el municipio del Carmen, presenta un sistema de acuíferos con muy baja productividad con una capacidad inferior a 0,05 l/s y profundidad de 175 m (INGEOMINAS, 2000). Así mismo presenta ambientes ígneos metamórficos con posibilidades hidrogeológicas restringidas.

**Figura 22**

Disponibilidad de aguas subterráneas municipio el Carmen, Norte de Santander.



Tomado de INGEOMINAS, 2000.

### 8.1.5.3 Hidrológico

Con el fin de analizar y evaluar el componente hídrico de la zona de estudio, se llevó a cabo una caracterización hidrológica, la cual permite comprender las dinámicas del agua conforme con el entorno físico y ambiental. Este análisis facilita la identificación de la disponibilidad de fuentes hídricas superficiales cercanas, el comportamiento de la escorrentía superficial, caudales presentes en la zona y la delimitación de las cuencas (Soto et al., 2026). La información hidrológica utilizada para esta caracterización se obtuvo del Estudio Nacional de

Agua (ENA) 2022 elaborado por el IDEAM, así como de estudio realizados en el departamento del Norte de Santander que aportan datos específicos sobre las condiciones hidrológicas locales.

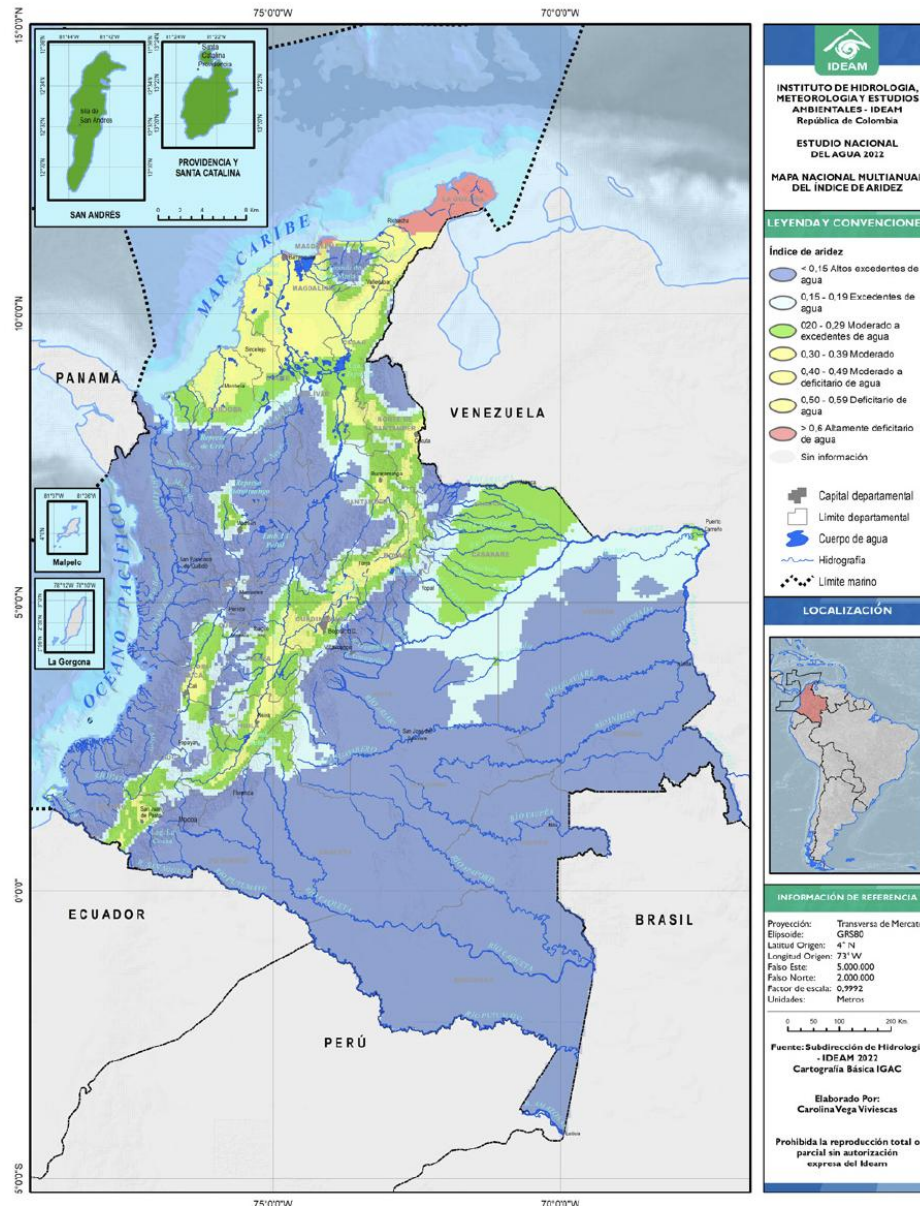
#### **8.1.5.3.1 Fuentes de Agua Superficiales**

Colombia posee gran riqueza hídrica ya que el 90% del territorio presenta altos excedentes de agua, sin embargo, en departamentos como Sucre, Córdoba y Norte de Santander se concentran áreas hídricas de alta complejidad. La variable que permite describir la disponibilidad o escasez de agua es el índice de aridez el cual mide los excesos de agua considerando la precipitación promedio, la evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real (IDEAM, 2022).

El municipio del Carmen se encuentra ubicado dentro de la zona hidrográfica del caribe donde el 50,3% del territorio ubicado en esta zona cuenta con altos excedentes de agua. En la Figura 23 se plasma el índice de aridez de Colombia, donde se puede observar que el municipio del Carmen presenta índices entre 0,15 y 0,29 logrando presentar altos excedentes de agua en la zona superior del municipio y moderados excedentes de agua hacia la parte inferior (IDEAM, 2022). Por el municipio pasa el río Catatumbo y el Magdalena los más representativos en el país.

**Figura 23**

Disponibilidad de agua – índice de aridez municipio el Carmen, Norte de Santander.



Tomado del IDEAM, 2022 (Agrandar).

### 8.1.5.3.2 Cuencas

El municipio de el Carmen Norte de Santander pertenece a la zona hidrográfica del Caribe y cuenta con 3 cuencas hidrográficas cercanas, el Catatumbo, Magdalena y Orinoco. Sus ríos

principales son el Catatumbo, Tarra, Sardinata, Zulia y Pamplonita. En la Figura 24 se puede observar la distribución hidrográfica del departamento del Norte de Santander, el municipio del Carmen cuenta con diversidad hídrica, con la presencia de diferentes ríos y quebradas (Secretaría de Planeación y Desarrollo Territorial, 2009).

**Figura 24**

Cuencas hidrográficas departamento Norte de Santander.



Tomado de Secretaría de Planeación y Desarrollo Territorial (Agrandar), 2009.

### 8.1.5.3.3 Oferta Hídrica Superficial (Caudales y Escorrentía)

Para identificar y determinar la oferta hídrica superficial natural de la zona de estudio, se tomó como referencia el Estudio Nacional de Aguas, 2022 realizado a las zonas y subzonas hidrográficas para un periodo entre 1991-2020. Este estudio evaluó los n valores medios multianuales de la oferta hídrica considerando variables como la escorrentía superficial, precipitación, evapotranspiración real, entre otros. Como se mencionó anteriormente, el municipio de El Carmen se encuentra ubicado en la zona hidrográfica del Caribe, la cual presenta un área de 102.768 km<sup>2</sup>, una escorrentía de 1825 mm y un caudal medio de 5946 m<sup>3</sup>/s. Esta región registra la oferta hídrica más baja en comparación de las otras zonas hidrográficas del país (IDEAM, 2022). En la Tabla 3 se observa la oferta hídrica de la cuenca hidrográfica del Caribe, la cual presenta un caudal medio de 5946 m<sup>3</sup>/s.

**Tabla 3**

Oferta Hídrica Superficial de la cuenca hidrográficas del Caribe

Área Hidrográfica	Área (Km <sup>2</sup> )	Escorrentía (mm)	Oferta Total (mm <sup>3</sup> )	Caudal Medio (m <sup>3</sup> /s)	Rendimiento (l/s/km <sup>2</sup> )	
1	Caribe	102.768	1825	187.513	5946	57,9

Tomado del IDEAM, 2022.

Con el fin de determinar la oferta hídrica total superficial de la zona de estudio, se aplicó la ecuación usada por el IDEAM en el Estudio Nacional de Agua, esta variable de calculó en términos de escorrentía considerando el ciclo natural del agua sin influencia de actividades humanas.

## Ecuación 1

Escorrentía Superficial

$$Esc = P - ETR$$

Donde:

**Esc:** escorrentía superficial (mm/año)

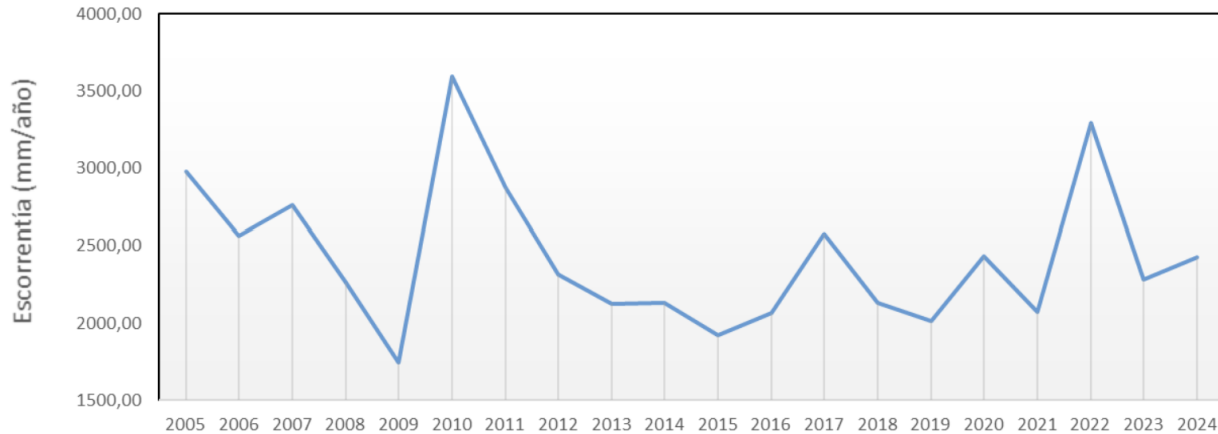
**P:** Precipitación (mm/año)

**ETR:** Evapotranspiración real (mm/año)

Conforme con la ecuación mencionada anteriormente y los valores de la precipitación y la evapotranspiración real obtenidas en el producto satelital Terraclimate y el conjunto de datos de CHIRPS y FLDAS, se realizó el cálculo de la oferta hídrica total superficial durante un periodo comprendido entre los años 2005 y 2024. En la Figura 25 se puede observar que los años de mayor oferta fueron los años 2010 y 2022 con valores de 3591,68 mm/año y 3293,88 mm/año respectivamente, los años de menor escorrentía fueron el 2009 y 2015 con valores de 1741,26 mm/año y 1924,29 mm/año respectivamente. En promedio la zona de estudio presenta una escorrentía de 2428,54 mm/año.

## Figura 25

Oferta Hídrica Total Superficial de la vereda la Bogotana para el periodo comprendido entre 2005 y 2024.



Tomado de IDEAM, 2022.

### 8.1.6 Legales

El componente legal del análisis PESTEL recopila las principales leyes, decretos, normas y documentos legislativos que tienen relación directa con el objeto de esta investigación. Este marco jurídico proporciona el soporte normativo necesario para la selección e implementación de sistemas no convencionales de captación de agua. En la Tabla 4 se consolida la normativa aplicable, organizada jerárquicamente. Se inicia con la normativa más representativa de orden internacional seguida por la legislación nacional vigente en Colombia que regula aspectos ambientales, hídricos y de ordenamiento territorial vinculados al acceso, uso y gestión del recurso hídrico.

**Tabla 4**

## Normativa legal aplicada a la investigación

<b>Normativa</b>	<b>Objeto</b>	<b>Aplicación a la Investigación</b>
Constitución Política de Colombia 1991 - Art 79	Establece que todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano, con la ley garantizando la participación de la comunidad en decisiones que puedan afectarlo.	Por medio del artículo 79 se busca garantizar a la comunidad el acceso al agua potable y la conservación del recurso hídrico.
Ley 9 de 1979	Por medio del cual se establece el Código sanitario nacional, se dicta medidas para el control sanitario de los usos del agua. Así mismo, establece medidas sanitarias relacionadas con la potabilización y suministro de agua para consumo humano.	Con el fin de proponer y establecer estrategias de captación y tratamiento de agua es necesario tener en cuenta los requisitos establecidos en el código sanitario en materia del recurso hídrico.
Ley 99 de 1993	Por la cual se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental —SINA— y se dictan otras disposiciones.	Por medio de la ley 99 se establecen los fundamentos en materia ambiental en Colombia y se establecen las entidades reguladoras.
Ley 115 de 1994	Por medio de la cual se expide la Ley General de Educación	Esta ley exige la educación ambiental la cual es necesaria para la conservación y el uso adecuado de los sistemas a investigar.
Ley 1777 de 2019	Se modifica parcialmente la ley 1176 de 2007 en lo que respecta a la evaluación del uso y ejecución a los recursos del Sistema General de Participaciones para Agua Potable y Saneamiento Básico en los distritos y municipios.	Es importante considerar esta ley debido a que exige y evalúa el seguimiento, control y monitoreo del agua en los municipios, garantizando que el uso y la implementación de los sistemas no convencionales cuenten con el debido monitoreo.
Decreto 2372 de 2010	Por medio del cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente	Con el fin de realizar la gestión adecuada del recurso hídrico es necesario considerar los criterios y requisitos establecidos en el código nacional de recursos naturales renovables.
Decreto 1575 de 2007	En la cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano	Esta normativa aplica a la investigación debido a que es necesario monitorear, prevenir y controlar los riesgos para la salud humana causados por su consumo.

Nota: La tabla 4 muestra la normativa más relevante en la investigación. Tomado del Normograma del Ministerio de Salud y Protección Social.

## **8.2 Sistemas no Convencionales de Captación de Agua Eficientes y Sostenibles**

Tradicionalmente, la captación de agua se ha venido realizando, por medio de sistemas convencionales basados en la recolección de agua proveniente de fuentes hídricas superficiales como ríos y quebradas. Sin embargo, estos sistemas pueden resultar insuficientes en contextos de estrés hídrico o escasa disponibilidad hídrico. En este contexto, los sistemas no convencionales de captación de agua permiten reducir el estrés hídrico al usar fuentes alternativas para la obtención, ejemplo de ello es el agua lluvia, agua de rocío, agua de niebla, recarga artificial de acuíferos, el agua subterránea, mediante tecnologías adaptadas a las condiciones locales.

En este apartado de la investigación se seleccionan seis sistemas no convencionales se seleccionaron por su eficiencia, viabilidad y sostenibilidad en contextos rurales similares al de la vereda La Bogotana. La selección se realizó a partir de la revisión y el análisis de diferentes referentes teóricos que evaluaron por medio del análisis comparativo cada una de las estrategias, resaltando los de mayor relevancia para zonas de estudios con características similares. A continuación, se presenta la descripción detallada de cada uno de estos sistemas:

### **8.2.1 Sistema de Captación de Agua Lluvia (SCALL)**

Son sistemas que permiten la recolección y el aprovechamiento del agua proveniente de la precipitación, para diversos usos, como el riego agrícola, actividades domésticas, descarga de inodoros y procesos industriales en los que no se requiera un tratamiento previo. Estos sistemas cuentan con tres componentes principales, el primero es la zona de captación, que puede estar conformada por cubiertas, techos o zonas amplias de ladera; el segundo es el sistema de conducción de agua o redes de distribución, , que transporta el agua desde la captación hasta el almacenamiento; y por último el tanque de almacenamiento o hidroacumulador, , donde se

conserva el agua recolectada, a estos tres elementos se puede agregar un proceso de tratamiento en caso de que se requiera Pool y Carrera, (2021) y Ertop et al., (2023).

Para la adecuada implementación de sistemas de captación de agua lluvia se debe considerar las condiciones hidrológicas de la zona de estudio, siendo precipitación la variable más relevante. Esta puede obtenerse de estaciones pluviométricas o sistemas satelitales que proporcionan datos climatológicos y de balance hídrico. Además, dependiendo de la zona que se vaya a destinar para la captación de agua, es necesario contar con el área de la cubierta o si se realiza en zona de ladera es importante tener en cuenta el coeficiente de escorrentía que influye directamente en el volumen de agua recolectada (Pool y Carrera, 2021) y (Miranda et al., 2022). En la Figura 26 se observa un sistema de captación de agua lluvia en cubierta el cual cuenta con un tanque de almacenamiento subterráneo, con el fin de obtener agua para la descarga de sanitarios, lavado y riego de plantas.

### Figura 26

Sistema de Captación de Agua Lluvia en Cubierta.



Tomado de la asociación española de empresas del sector de agua.

<https://www.premiertechaqua.com/es-es>

El aprovechamiento de agua lluvia tiene como ventaja el ahorro de agua, reducción del impacto en el recurso hídrico, reducción de la huella de carbono, mejora de la escorrentía superficial, reducción de costos, entre otros. Sin embargo, tiene como desventaja la dependencia de las condiciones climáticas para la eficiencia del sistema, requiere sistemas de tratamiento de agua, costos altos inicialmente y mantenimiento periódico (Duque et al., 2023) y (Ertop et al., 2023).

El uso de sistemas de captación de agua lluvia en zonas con difícil acceso al recurso hídrico ha sido una alternativa para suplir la necesidad. Sin embargo, su diseño e implementación requieren la consideración de criterios técnicos específicos que permitan evaluar la eficiencia. Un ejemplo de ellos es el estudio realizado por Pool y Carrera (2021), quienes diseñaron un sistema de captación de agua lluvia en las zonas de ladera de Valparaíso y Maule en Chile. Su investigación identificó que la eficiencia del sistema depende de determinar y analizar adecuadamente los parámetros hidrológicos de la zona aplicando funciones de distribución de probabilidad para obtener la precipitación. Además, concluyeron para la implementación de sistemas en zonas de ladera el material influye en el coeficiente de escorrentía, lo que impacta el volumen de agua recolectada.

Otro ejemplo es la investigación de Miranda et al. (2022), en la cual se evaluó la sostenibilidad de un sistema de captación de aguas lluvias de una vivienda ubicada en la zona rural de Suquinapi, Perú, para un abrevadero de ganado. El estudio concluyó que conforme con la precipitación de la zona y las dimensiones de diseño del sistema, este permitiría abastecer seis meses del año, por lo cual tendrían que recurrir el resto del año al uso de agua del sistema convencional de agua potable.

Por otra parte, el análisis de viabilidad de un sistema de recolección de agua de lluvia para la producción de agua potable en una vivienda de la zona rural de Werrington, Australia, realizado por Alim et al. (2020), dio cuenta de la importancia de considerar criterios de diseño

como las dimensiones de techos y cubiertas, el tamaño y material del tanque, la demanda de agua y los datos meteorológicos de la zona. La evaluación permitió comprobar la eficiencia del sistema supliendo entre el 90% y el 97% del agua que se requiere durante todo el año, y que el periodo de retorno de la inversión para ese diseño oscila entre 1 y 6 años con una vida útil de 25 años.

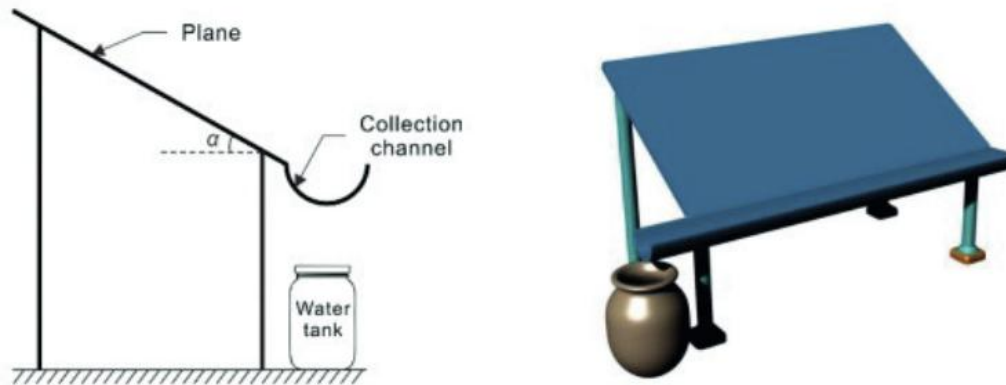
### **8.2.2 Sistema de Recolección de Agua por Rocío**

Los colectores de agua de rocío funcionan a partir del principio de condensación del vapor de agua atmosférica utilizando diferentes superficies que se enfrían hasta alcanzar temperaturas inferiores a la del punto de rocío. Existen dos tipos de sistemas de captación de agua de rocío: los sistemas pasivos, los cuales dependen principalmente de procesos físicos haciendo uso de las condiciones de la zona y de materiales que no requieran energía adicional para su enfriamiento, y los sistemas activos, las cuales requieren fuentes de energía adicionales como electricidad o enfriadores) para inducir o acelerar el proceso de condensación (Khalil et al., 2016).

El funcionamiento de un sistema pasivo de recolección de agua de rocío depende diversos factores, en primera instancia se encuentran las variables climáticas como la temperatura del aire, la velocidad del viento, la humedad relativa y la presión de aire (Parra, 2024). Así mismo, requiere de una superficie condensadora radiactiva con alta emisividad que permita el enfriamiento rápido durante la noche, donde se debe considerar la inclinación, la sombra y la exposición que facilite la retención de gotas y recolección la recolección de agua, por último, es necesario el uso de materiales que con propiedades hidrófilas y de alta emisividad (Khalil et al., 2016). En la Figura 27 se puede apreciar la estructura de un captador de agua de rocío.

## Figura 27

Sistema de Recolección de Agua de Rocío.



Tomado de la Arias et al., (2022).

Al momento de analizar y evaluar la implementación del sistema es importante tener en cuenta los aspectos positivos y negativos que impactan su ejecución. Las ventajas más significativas de esta alternativa es su estructura, ya que es sencilla e incluso portable, el costo es reducido siempre y cuando se use como estrategia pasiva. Así mismo, es sostenible debido a que depende únicamente de las condiciones climáticas de la zona y se hace un uso eficiente de los recursos al ser una alternativa no convencional. Una de las ventajas del sistema es la dependencia a las condiciones climáticas lo que hace que el sistema no llegue a ser tan eficiente como se espera, por otro lado, la generación de agua puede verse limitada en zonas en las que la demanda sea muy alta (Hernández et al., 2025).

La investigación de la eficiencia de los sistemas de captación de agua de rocío se ha realizado a nivel mundial. Ejemplo de ello es el estudio realizado por Pirouz et al., (2021), donde se analizó la implementación de sistemas de captación de agua de rocío y de niebla con el fin de abastecer de agua los techos verdes y así evaluar su eficiencia. En la Figura 28 se plasma la ubicación y distribución de las estrategias de captación en la cubierta, de la cual se pudo concluir que para un colector de rocío activo con panel fotovoltaico se logró obtener el 25% del agua requerida en clima húmedo, 15% en clima mediterráneo y 26% en climas áridos. De igual forma, el uso de paneles fotovoltaicos se considera una de las mejores opciones para el uso de los colectores de rocío debido a que su emisividad promedio está entre el 75% y el 90%.

### Figura 28

Sistema de Recolección de Agua de Rocío en Techos Verdes.



Tomado de la Pirouz et al., (2021).

Otro estudio observado se presentó en Colombia, realizado por Acosta y Herrera (2021) en el que se realizó un caso de estudio en la Guajira, donde se diseñó una metodología para el uso de colectores de agua de Rocío, se concluyó que el tipo de colector de lámina plana en aluminio es ideal para zonas áridas y con escasez de recurso hídrico, adicionalmente el

condensador se debe ubicar aislado del suelo con el fin de garantizar un adecuado enfriamiento radioactivo.

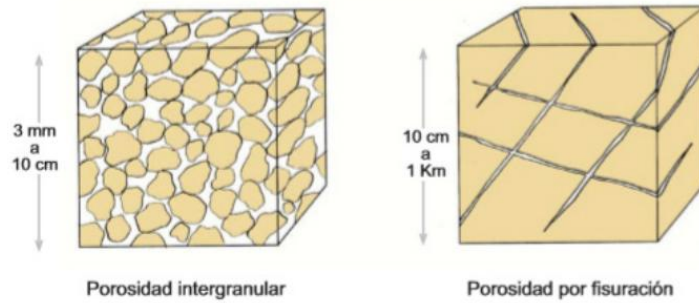
### **8.2.3 Sistema de Recarga Artificial de Acuíferos**

Los sistemas de recarga artificial de acuíferos son estrategias no convencionales que buscan el aumento en la disponibilidad de agua por medio de la intervención directa o indirecta del acuífero y así incrementar la capacidad de almacenamiento de agua. Adicionalmente, esta estrategia permite compensar las pérdidas de agua por actividades antrópicas, reducir el descenso o pérdida del nivel freático, sirve como depósito de agua, entre otros. Esta intervención se realiza a partir la infiltración o inyección de agua por medio de diferentes infraestructuras (Martínez, 2021).

Para realizar la implementación adecuada de este sistema, es necesario conocer el tipo de acuífero con el que cuenta la zona de estudio, estos se encuentran clasificados por medio de 2 criterios. El primero se basa en sus características litológicas considerando 3 tipos: acuíferos detríticos los cuales están conformados por partículas de rocas con permeabilidad variable (porosidad intergranular). Acuíferos fisurados compuestos de rocas carbonatadas con grandes fracturaciones y alta permeabilidad (porosidad por fisuración) ver Figura 29. Acuíferos mixtos los cuales presentan características de los dos anteriores. El segundo criterio se basa en la presión hidrostática clasificándolos en no confinados los cuales son superficiales y carecen de capa confinante de baja permeabilidad. Confinados los cuales en la parte superior cuentan con una capa de permeabilidad baja y los semiconfinados que cuentan con una capa confinante semipermeable y un acuitardo ver figura 30 (Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth [CSIRO], 2020).

**Figura 29**

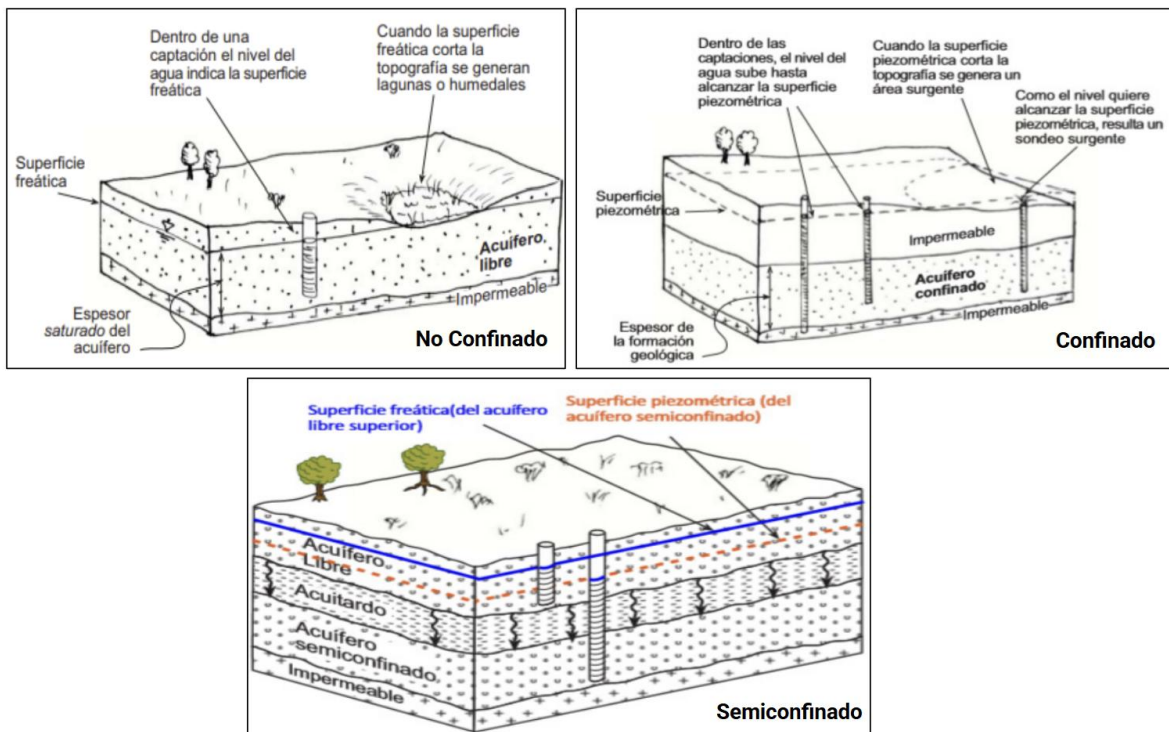
Clasificación de Acuíferos Según Características Litológicas.



Tomado de CSIRO (2020).

**Figura 30**

Clasificación de Acuíferos Según Presión Hidrostática.



Tomado de CSIRO (Agrandar) (2020)

Según la Guía Metodológica – Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial de Acuíferos del Ministerio de Agricultura del Gobierno de Chile, la recarga artificial de acuíferos se puede realizar por diferentes métodos teniendo en cuenta tres grupos basados en la infiltración para acuíferos no confinados: Infiltración fuera del cauce, dentro del cauce y pozos secos. Ejemplo del sistema de recarga artificial de acuíferos fuera del cauce son las piscinas de infiltración, las cuales se construyen a partir de la desviación del agua superficial para su recolección en piscinas de poca profundidad. Los principales elementos para la implementación este tipo de sistemas son una zona de captación de agua bien sea de lluvia o de desviación de cauce del agua superficial, sistema de tratamiento, piscinas infiltración y sistema de recuperación del agua almacenada como se representa en la Figura 31 (Gobernación de Chile).

### Figura 31

Sistema de Recolección de Recarga Artificial de Acuífero por Piscinas de Infiltración.



Tomado de la Gobernación de Chile.

En países mediterráneos es frecuente el estrés hídrico, es por eso que se implementan este tipo de estrategias para la optimización del recurso y así suplir la necesidad. En Túnez para la recarga artificial de acuíferos usualmente se usa agua dulce, sin embargo, también se hace

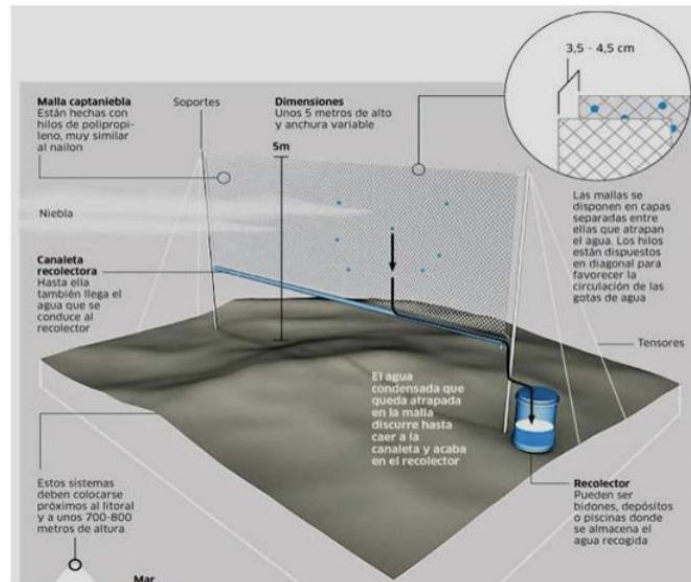
uso de aguas residuales tratadas y de agua salada. Ejemplo de eso es el acuífero Korba ubicado al noreste de Túnez, el cual utiliza aguas residuales municipales tratadas y agua salada para la recuperación del almacenamiento. Según la investigación de Jarraya y Benabdallah (2020) realizada en el acuífero Korba, el uso de agua salada impacta significativamente en el nivel freático y en la salinidad, donde se logró demostrar a partir de las simulaciones que la recarga con una tasa de 1500 m<sup>3</sup> al día se tendría una recuperación del nivel freático hasta 2,7 m y una reducción de salinidad de 5,7 g/L.

#### **8.2.4 Sistema de Captación de Agua de Niebla (Atrapanieblas)**

Los sistemas de captación de agua de niebla se basan en la recolección de partículas de agua proveniente de la neblina, las cuales son captadas por medio de una malla. El funcionamiento de este sistema depende de la altura de la zona, la humedad del aire y el viento. La estructura para este sistema se compone de cuatro elementos principales, soporte bidimensional metálico, plástico o en madera, malla de polipropileno, tubería y tanque de recolección y almacenamiento. Este sistema presenta grandes ventajas como lo es el costo debido a que no requiere mantenimientos complejos, no requiere del uso de energía para su mantenimiento y puede ser gestionada fácilmente por la comunidad. (Caballero et al., 2021). En la Figura 32 se observa la estructura de un captador de niebla sencillo.

## Figura 32

### Estructura Sistema de Captación de Agua de Niebla.



Tomado de Pascual et al., 2011.

Los colectores de niebla funcionan principalmente en zonas montañosas y de ladera, para el funcionamiento eficiente del sistema el diseño de la estructura y la velocidad del viento es crucial. En el estudio de Kanooni y Kohan, (2024), se realiza la comparación del rendimiento de tres colectores con estructura convencional y dos de estructura cilíndrica por medio de una metodología experimental, de lo cual se pudo concluir que la estructura cilíndrica aumenta la eficiencia debido a que no presenta obstrucción, así mismo, a grandes velocidades del viento aumenta la cantidad de agua recolectada, logrando una eficiencia del 50% en comparación con el sistema tradicional que logró una eficiencia del 28%, por lo cual se afirma que la estructura cilíndrica presenta mejores resultados en comparación con la tradicional, además es más resistente a grandes velocidades del viento.

Otro de los aspectos importantes para el funcionamiento del sistema es la selección adecuada es el tipo de malla. Ortiz et al., (2024), realizó el análisis y la comparación de la

resistencia de dos materiales para la malla, el primero fue plástico PET reciclado y el segundo plástico PET virgen, estos dos fueron sometidos a un ciclo de evaporación y condensación en una cámara durante diez minutos, donde se registró la temperatura, humedad relativa y la velocidad del viento. La malla con PET reciclado presentó un menor porcentaje de deformación a comparación de la malla con PET virgen, así mismo, es importante considerar las condiciones climáticas de la zona para la selección del material de la malla.

En las zonas rurales, la implementación de este sistema funciona como alternativa para el abastecimiento de agua, ejemplo de ello es la investigación realizada por Rodríguez, (2025), donde se diseñó y se construyó un prototipo en la zona rural de Bogotá, el cual generó grandes volúmenes de agua presentando un suministro constante con valores de recolección de 16 litros al día en épocas de lluvias constantes. Es importante resaltar que la eficiencia del sistema depende de la altura a la que se ubique la estructura, para el caso de estudio la altura superó los 3000 msnm. La implementación del sistema representó para la comunidad un ahorro de \$15.000 pesos y una tasa de retorno de 6 años.

### **8.2.5 Sistema de Captación de Agua Subterránea**

Los sistemas de captación de agua subterránea funcionan a partir del aprovechamiento del volumen de agua de los acuíferos (IDEAM, 2024). Para hacer uso del agua subterránea es necesario tener en cuenta las características geológicas, hidrogeológicas e hidrodinámicas de los acuíferos y del suelo, las cuales permiten determinar las zonas adecuadas para ubicación del sistema. La captación de agua subterránea se puede hacer por medio de diferentes métodos como los pozos, zanjas, sondeos y drenajes. El aprovechamiento de este recurso tiene como ventaja la disponibilidad dependiendo la zona, reducción del estrés hídrico, calidad del agua, entre otros. Sin embargo, también se cuenta con desventajas, como el costo en maquinaria e

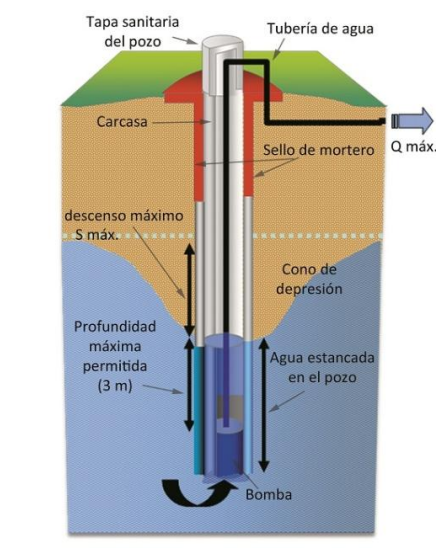
infraestructura, riesgos de contaminación del acuífero, afectación y pérdida del acuífero.(Ibáñez y Sandoval, 2015).

El método más usado para la captación de agua son los pozos perforados, para su aplicación es necesario realizar un estudio hidrogeológico con el fin de analizar las características litológicas, la profundidad y calidad del agua de la zona. Así mismo, se requiere el diseño del sondeo y elección del sistema de perforación y por último, el trámite de permisos, en caso de que aplique (Asociación Internacional de Hidrogeólogos, 2022).

En la Figura 33 se puede apreciar la estructura de un sistema de captación de agua subterránea a partir de pozos perforados, sus principales componentes son tubería de agua, tapa sanitaria de pozo, carcasa, cono de depresión y la bomba.

### Figura 33

Sistema de Captación de Agua Subterránea– Pozos Perforados.



Tomado de fibras y normas de Colombia

<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/aguas-subterranas-definicion-importancia-formas-de-extraccion-tipos-de-contaminacion-y-recomendaciones/>

La investigación de Aragón et al., (2022), tuvo como objetivo identificar y determinar el uso de agua subterránea y el riesgo a contaminación en Oaxaca, México. La metodología se estructuró en tres etapas, primero se realizó la identificación de los pozos o manantiales a partir de la geolocalización de las fuentes de abastecimiento. Posteriormente, con el fin de determinar el riesgo de contaminación se hizo el diagnóstico aplicando criterios de evaluación de calidad generados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Finalmente, se aplicó el marco lógico a partir de talleres participativos de los actores del proyecto. Conforme con lo anterior, se pudo concluir que la aplicación de este sistema en la zona de estudio impacta positivamente a la comunidad, sin embargo, es importante valorar las causas de la contaminación.

#### **8.2.6 Sistema de Aprovechamiento de Agua de Drenaje Agrícola**

El sector de la agricultura consume altas cantidades de agua, en Colombia para el año 2022 se presentó una demanda aproximada de 13984,1 millones de m<sup>3</sup>/año, siendo uno de los sectores de mayor consumo de agua (IDEAM, 2022). Es importante resaltar que el sector genera grandes impactos ambientales no solo con el consumo excesivo de agua si no la utilización de fertilizantes y pesticidas que contaminan tanto las aguas subterráneas como las superficiales (Lara y Hernández, 2003). Conforme con lo anterior, es necesario implementar sistemas que permitan el ahorro y aprovechamiento del recurso hídrico para dicha actividad.

Un sistema de aprovechamiento de agua de drenaje agrícola permite la recolección y gestión del agua a partir de la evacuación de excesos, por medio de un sistema de canales que apoyan el drenaje. Uno de los propósitos de este sistema es la recolección de los excesos de agua para reúso, además trae como beneficio el cuidado del suelo y el aporte para el adecuado crecimiento de las plantas (Gavilánez, 2020).

Los sistemas de drenaje agrícola se pueden realizar por medio de tres alternativas, en primera instancia se encuentra el drenaje superficial el cual se encarga de evacuar y recolectar

el agua que se encuentra en la superficie del suelo agrícola o del terreno a partir de canales poco profundos. Posteriormente, se encuentran los drenajes subterráneos, los cuales se encargan de remover los excesos de agua en el perfil del suelo o en la zona de las raíces. Por último, se tiene el drenaje por bombeo, logrando remover los excesos a nivel superficial y subterráneo (Gavilánez, 2020). En la Figura 34 se puede observar un ejemplo de drenaje superficial para la recolección de agua.

### **Figura 34**

Sistema de drenaje agrícola superficial para la recolección de agua para reúso.



Tomado de EcuRed [https://www.ecured.cu/Riego\\_y\\_Drenaje](https://www.ecured.cu/Riego_y_Drenaje)

La investigación de Morán (2024), tuvo como objetivo realizar la caracterización de los sistemas de drenaje de cultivos de banano en Ecuador, donde se pudo determinar que el sistema impacta de forma positiva en el manejo adecuado del agua al realizar el drenaje de los excesos de agua y la recolección para su reúso. Así mismo, durante la investigación lograron identificar que los métodos más usados son las zanjas de drenaje, los sistemas de bombeo y filtración.

### 8.3 Matriz de Comparación de los Sistemas de Captación de Agua no Convencionales

Con el fin de realizar el análisis comparativo de los seis sistemas seleccionados anteriormente, se diseñó la Tabla 5, en la cual se plasman los criterios de evaluación considerando los 6 factores de la herramienta PESTEL, la cual incluye los tres aspectos de la sostenibilidad (Social, económico y ambiental), es importante resaltar que los factores del PESTEL se evaluaron a partir de diferentes criterios tomados de la Guía del Consejo Colombiano de Construcción Sostenible [CCCS].

**Tabla 5**

Matriz de Evaluación Sistemas de Captación de Agua

Factor PESTEL	Criterios	Criterios de Evaluación	Puntaje	Sistemas No Convencionales					
				Agua lluvia	Agua de Rocío	Agua de niebla	Agua de drenaje de actividades agrícola para reuso	Agua subterránea	Recarga artificial de acuíferos
Político	Apoyo Institucional de la Región	No Cuenta con Apoyo	1						
		Cuenta con Apoyo Parcial	2						
		Cuenta con Apoyo	3						
	Incentivos Económicos	No se Otorgan	1						
		Se Otorgan	2						
	Gestión y Gobernanza Local	No Cuenta con Participación de los habitantes de la región.	1						
		Cuenta con Participación de los habitantes de la región.	3						
	Cumplimiento ODS 6	No Cumple	1						
Cumple		3							
Económico	Costo de instalación por m3	Más que el Sistema Convencional	1						
		Igual que el Sistema Convencional	2						
		Menos que el Sistema Convencional	3						
	Costo de Mantenimiento	Alto	1						
		Medio	2						
		Bajo	3						
	10 a 15 años	1							

Factor PESTEL	Criterios	Criterios de Evaluación	Puntaje	Sistemas No Convencionales					
				Agua lluvia	Agua de Rocío	Agua de niebla	Agua de drenaje de actividades agrícola para reúso	Agua subterránea	Recarga artificial de acuíferos
	Tasa de Retorno	5 a 10 años	2						
		0 a 5 años	3						
Social	Número de personas beneficiadas	20% de los habitantes	1						
		50% de los habitantes	2						
		100% de los habitantes	3						
	Generación de empleo local	20% de los empleados	1						
		50% de los empleados	2						
		100% de los empleados	3						
	Acceso a la Capacitación de la comunidad	20% de población local capacitada	1						
		50% de población local capacitada	2						
		100% de población local capacitada	3						
	Aceptación cultural del sistema - impacto social	Si	1						
		No	3						
	Tecnológico	Durabilidad o vida útil	Menos de un año	1					
Entre 1 a 5 años			2						
Más de 10 años			3						
Innovación en Colombia		Sistema implementado en Colombia	1						
		Sistema No implementado en Colombia	3						
Eficiencia del Sistema respecto al sistema tradicional		Menos del 20%	1						
		Entre el 20% y el 70%	2						
		Más del 70%	3						
Ecológicos		Materia prima y Manufactura Regional	No	1					
	Parcialmente		2						
	Si		3						
	Consumo de Energía	Requiere	1						
		No requiere	3						
	Impacto a fuentes naturales	Bajo	3						
		Medio	2						
		Alto	1						
	Adaptación a Condiciones Hidroclimáticas	No	1						
		Parcialmente	2						
		Si	3						
	Adaptación a Condiciones	No	1						
Parcialmente		2							

Factor PESTEL	Criterios	Criterios de Evaluación	Puntaje	Sistemas No Convencionales					
				Agua lluvia	Agua de Rocío	Agua de niebla	Agua de drenaje de actividades agrícola para reúso	Agua subterránea	Recarga artificial de acuíferos
	Hidrogeológicas	Si	3						
	Huella de Carbono	Alta	1						
		Media	2						
		Baja	3						
Legal	Existe Normativa Aplicable en Colombia	No	1						
		Si	3						
	Inclusión de actores locales en la toma de decisiones	No	1						
		Si	3						
<b>Puntaje Total</b>									

Elaboración propia

Teniendo en cuenta la matriz diseñada, se realizó la evaluación de los 6 sistemas aplicando los factores del PESTEL por medio de un enfoque mixto. Inicialmente se realizó la evaluación por medio del análisis cualitativo, posteriormente a partir del análisis cuantitativo se realizó el consolidado y la sumatoria de los valores obtenidos a partir del análisis cualitativo. A continuación, se realiza el análisis de cada uno de los factores del PESTEL por medio de los criterios seleccionados. En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos.

### 8.3.1 Factor Político – PESTEL

El primer factor del PESTEL que se evaluó fue el político, donde se consideraron 4 criterios de evaluación. En primera instancia se propuso y evaluó el criterio de “**Apoyo Institucional de la Región**”, donde se consideró el puntaje más alto (3) para los 3 sistemas, debido a que la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – CORPONOR, cuenta con la resolución 1126 del 2022, la cual se acoge al Plan Nacional de Negocios Verdes, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, ofreciendo acompañamiento y

capacitación para el fortalecimiento de proyectos sostenibles. Así mismo, por medio de esta resolución se evalúa el segundo criterio de evaluación **“Incentivos Económicos”** con un valor máximo (2) para los 6 sistemas, debido a que allí se establecen los requisitos para que los proyectos sostenibles puedan acceder a los incentivos económicos. Dentro de los requisitos más significativos se encuentran: el impacto ambiental positivo, uso eficiente y sostenible de los recursos, responsabilidad social hacia el exterior, entre otros (Resolución 1126 del 2022 - CORPONOR).

En tercer lugar, se evaluó la **“Gestión y Gobernanza Local”** con un puntaje de 3 para los 6 sistemas, ya que se pretende que el sistema sea gestionado por la junta de acción comunal con participación de la ciudadanía. Finalmente, se consideró el criterio del **“Cumplimiento del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6”** donde se evaluaron los 6 sistemas con el mayor puntaje (3), debido a que el Plan de Desarrollo Municipal del municipio El Carmen, encamina el cumplimiento de sus objetivos y metas por medio de acciones que fortalezcan el equilibrio social, económico y ambiental, apoyando proyectos y estrategias que permitan la conservación del recurso hídrico (Alcaldía Municipal del Carmen, 2024).

### **8.3.2 Factor Económico – PESTEL**

El segundo factor de la herramienta estratégica PESTEL es el económico, el cual se estimó a partir de 3 criterios. En primer lugar, se evaluó de forma cualitativa el **“Costo de la Instalación por m<sup>3</sup>”**, considerando aspectos como infraestructura requerida, sistema tecnológico para su funcionamiento, tipo de tratamiento que requiere y disponibilidad del recurso; del cual se obtuvo que los sistemas de mayor costo son la recarga artificial de acuíferos y la obtención de agua subterránea, puesto que requieren de infraestructura de alto costo para la remoción y perforación de suelos, sistemas de bombeo y la disponibilidad del recurso en la zona de estudio es baja. Otro de los sistemas de mayor costo es el de drenaje agrícola, ya que requiere

una estructura de media complejidad, pero un tratamiento avanzado para la remoción de sedimentos y sustancias contaminantes provenientes del proceso agrícola. El sistema de recolección de agua lluvia en ladera se considera un sistema de mediano costo, porque requiere adecuación de terreno y grandes cantidades de materiales para su construcción, sin embargo, el tratamiento que se necesita no es avanzado y la disponibilidad del recurso pluvial es alto. Por último, los dos sistemas de menor costo son los de captación de agua niebla y agua de rocío, debido a que no requieren de estructuras tan complejas, las cuales pueden ser con materiales reciclables, no requieren de un tratamiento avanzado y la disponibilidad del recurso es alta.

Posteriormente, se analizó el criterio del “**Costo de Mantenimiento**” de cada una de las estrategias conforme con el criterio anterior. Considerando que, a mayor estructura, sistemas adicionales y un tratamiento avanzado, se necesita un mayor mantenimiento. En cuanto a la recarga artificial de acuíferos, al sistema de captación de agua subterránea y al sistema de drenaje agrícola, el costo de mantenimiento es elevado porque se requiere el cambio frecuente de filtros, el mantenimiento de partes para los equipos de bombeo y la remoción de sedimentos para el tratamiento de agua, para los tres sistemas restantes, el mantenimiento es más sencillo al requerir solo limpieza de la infraestructura y cambio de las partes en caso de que se necesite.

Finalmente, se evaluó de forma cualitativa el criterio de la “**Tasa de Retorno**” considerando aspectos como la efectividad, los costos de instalación y mantenimiento, la complejidad del sistema, entre otros; de donde se obtuvo que el sistema de mejor tasa de retorno es el de captación de agua lluvia debido a la alta precipitación que se presenta en la zona, a la infraestructura de mediana complejidad y al bajo mantenimiento. Los cinco sistemas restantes presentan una tasa de retorno más alta, para el caso de la obtención de agua de niebla y de rocío, el valor alto se debió principalmente a que la efectividad del sistema en algunos periodos del año es baja, para la recarga artificial de acuíferos, el agua de subterránea y el agua de drenaje

agrícola, el valor fue alto debido a la complejidad del sistema, ya que requieren de elementos adicionales para su funcionamiento, así como un tratamiento de agua avanzado.

### **8.3.3 Factor Social – PESTEL**

El tercer factor de la herramienta estratégica es el social, el cual se evaluó por medio de 4 criterios, el primero fue el **“Número de Personas Beneficiadas”**, para los 6 sistemas donde se obtuvo el puntaje más alto gracias a que se pretenden diseñar para suplir la necesidad completa de agua de uso doméstico. En segunda instancia se analizó el criterio de **“Generación de Empleo Local”** para el cual, se tuvo un valor medio (2) para las 6 estrategias, debido a que para el proceso de construcción del sistema se requiere personal preparado y calificado, sin embargo durante el desarrollo del proyecto se pretende capacitar a la comunidad y así poder aumentar tanto el porcentaje de generación de empleo local como aumentar el **“Acceso a la Capacitación”**, aportando al tercer criterio.

Finalmente, se evaluó el criterio de **“Aceptación Cultural del Sistema – Impacto Social”** desde el punto de vista de la responsabilidad social empresarial, donde se consideró por cada uno de los sistemas la mejora del acceso al agua, que permitan fortalecer la promoción de la sostenibilidad en el territorio, mejorar la equidad, igualdad y participación de la ciudadanía por medio de la implementación de tecnologías diseñadas para la conservación y el cuidado de los recursos naturales, por lo cual, las 6 se evaluaron con el puntaje más alto.

### **8.3.4 Factor Tecnológico – PESTEL**

El factor tecnológico es el cuarto del PESTEL y está conformado por 3 criterios. El primero es la **“Durabilidad o Vida Útil”**, la cual se evaluó conforme con el tipo de infraestructura y los materiales requeridos. Los sistemas de mayor durabilidad son captación de agua lluvia en ladera, recarga artificial de acuíferos y captación de agua subterránea, debido a que se encuentran

menos expuestos a las condiciones ambientales de la zona de estudio, teniendo una durabilidad entre 20 y 40 años, a diferencia del sistema de niebla y de rocío, los cuales se encuentran expuestos directamente a las condiciones como la radiación, acumulación de suciedad, fuertes vientos, entre otros, afectando tanto la superficie del captador de rocío, como la malla del atrapaniebla. Así mismo, sucede con el sistema de captación de agua de drenaje agrícola, el cual se puede ver afectado por las sustancias químicas provenientes de pesticidas los cuales pueden generar corrosión y otros daños en la estructura.

La **“Innovación en Colombia”** es otro de los criterios del factor tecnológico, el cual permitió identificar que los sistemas de menor uso en Colombia son los atrapanieblas y el captador de rocío, debido a la falta de conocimiento técnico e investigación, a las condiciones geográficas, el análisis hidrológico y climático, que se requieren para su implementación. Así mismo sucede con el sistema de captación de agua subterránea y recarga artificial de acuíferos los cuales son poco usados en Colombia a pesar de que el 78% de la población podría hacer uso de esta agua, sin embargo, en el país no se tiene conocimiento del sistema de acuíferos (Minambiente, 2023). Por último, los sistemas de mayor uso son la recolección de agua lluvia y el reúso del agua.

Por último, el criterio **“Eficiencia del Sistema Respecto al Tradicional”** se evaluó de igual forma para los 6 sistemas, teniendo en cuenta que la vereda la Bogotana no cuenta con un acueducto que permita suplir la necesidad de agua a la comunidad. Actualmente, el recurso es obtenido directamente de una cascada, pero no es de fácil acceso para toda la población. El diseño de los sistemas propuestos se plantea de forma que permita mejorar el acceso del agua a toda la población de la vereda de forma segura y continua.

### **8.3.5 Factor Ecológico – PESTEL**

El ecológico es el quinto de la herramienta estratégica PESTEL, el cual permitió evaluar la relación de la implementación de los sistemas con el ambiente que lo rodea, esto se realizó a partir del análisis de 6 criterios descritos a continuación. En primer lugar, se determinó el criterio de **“Materia Prima y Manufactura Regional”** el cual se dio un valor inferior a los sistemas como la recarga artificial de acuíferos, agua de drenaje agrícola y agua subterránea, ya que necesitan de equipos o elementos adicionales a la estructura como bombas, equipos de limpieza, entre otros, que requieren ser traídos desde otras regiones de Colombia o incluso fuera del país. Para los sistemas restantes, se dio un valor medio debido a que en la zona de estudio no se extraen ni fabrican los materiales requeridos para la construcción, sin embargo, se pueden adquirir en la zona urbana del municipio El Carmen.

El siguiente criterio, es el **“Consumo de Energía”** para su funcionamiento. Los sistemas de agua lluvia y los atrapaniebla obtuvieron el valor más alto debido a que para su funcionamiento, no requieren el uso de energía, a diferencia, de los sistemas restantes que requieren de energía para su funcionamiento, bien sea para la captación, como para el tratamiento adicional. El captador de agua de rocío se puede usar con o sin energía, sin embargo, su efectividad se ve afectada si se usa o no, por lo cual, para la evaluación se consideró el sistema sin uso de energía.

Posteriormente, se evaluó el **“Impacto a Fuentes Naturales”**, de lo que se pudo concluir que los sistemas que podrían generar impacto negativo a las fuentes hídricas, son la recarga artificial de acuíferos debido a que dependiendo el tipo de recarga y de donde se obtenga el agua se puede agotar el recurso hídrico y la obtención de agua subterránea, debido a que, se puede presentar afectación o agotamiento de acuífero. Para el caso del sistema de drenaje agrícola se obtuvo una evaluación media, debido a que el manejo adecuado del agua obtenida puede

generar contaminación en las fuentes hídricas. Por último, los sistemas restantes presentan menos probabilidad de impacto a fuentes naturales ya que el tipo de captación no altera las fuentes hídricas.

Los criterios de **“Adaptación a Condiciones Hidroclimáticas”** y **“Adaptación a Condiciones Hidrogeológicas”**, se evaluó, conforme al recurso que se requiere para la implementación del sistema, para el caso del captador de rocío y el atrapanieblas, el criterio de adaptación a condiciones hidrogeológicas se evaluó como 0 debido a que no se requiere para su funcionamiento, sin embargo en cuanto a la adaptación a condiciones hidroclimáticas se obtuvo un valor medio debido a que la eficiencia del sistema se puede ver afectada por las condiciones climáticas de la zona en algunos periodos del año. La recolección de agua lluvia tuvo el valor más alto para el primer criterio debido a que la zona de estudio presenta abundantes precipitaciones, el coeficiente de escorrentía adecuado y la pendiente requerida para la captación de agua en ladera. Por último, los tres sistemas restantes presentaron un valor de 0 para el primer criterio debido a que no se requiere para su funcionamiento, sin embargo, en cuanto a las condiciones hidrogeológicas se tuvo una evaluación baja, debido a que la zona de estudio no presenta un acuífero cerca.

Por último, se tiene el criterio **“Huella de Carbono”**, el cual se evaluó por medio de análisis y la sumatoria de los valores obtenidos en los 6 criterios anteriores los cuales influyen directamente en el aumento o no de la huella de carbono, por lo cual, se atribuye la alta huella de carbono a los sistemas que su acumulado sea inferior a 7,5, y baja huella de carbono a los que se presenten un valor superior a 8.

### **8.3.5 Factor Legal – PESTEL**

El último factor del PESTEL es el legal y se evaluó por medio de 2 criterios. En primera instancia se consideró el criterio **“Existe Normativa Aplicable en Colombia”**, del cual se obtuvo

lo siguiente: para los sistemas de captación de agua de niebla, de rocío y la recarga artificial de acuíferos en Colombia, no se cuenta con normativa que regule este tipo de estrategias. Para la captación de agua lluvia se cuenta con el Decreto 2811 de 1974 por medio del cual se menciona que cualquier persona puede hacer uso del agua lluvia que se recolecte en su predio siempre y cuando este no afecte o perjudique a un tercero. Para el uso del agua subterránea, Colombia cuenta con diferente normativa que hace alusión a este tipo de sistemas, como lo es el Decreto 2811 de 1974 y el Decreto 155 de 2004 los cuales resaltan la posibilidad de hacer uso del recurso para uso doméstico, sin embargo, el uso para otros fines requerirá de un proceso de concesión y pago. Por último, para el reúso del agua se cuenta con la Resolución 1256 de 2021 la cual señala que se permite el reúso del agua para fines domésticos siempre y cuando cuenten con las condiciones y características (Resolución 1256 de 2021)

Finalmente, el criterio de la **“Inclusión de Actores Locales en la Toma de Decisiones”** la cual se evaluó para los seis sistemas con el puntaje más alto, teniendo en cuenta que se pretende que la gestión del sistema se realice con participación de la ciudadanía a través de la junta de acción comunal.

**Tabla 6**

Evaluación Sistemas de Captación de Agua no Convencionales.

Factor PESTEL	Criterios	Criterios de Evaluación	Puntaje	Sistemas No Convencionales					
				Agua lluvia	Agua de Rocío	Agua de niebla	Agua de drenaje de actividades agrícola para reúso	Agua subterránea	Recarga artificial de acuíferos
Político	Apoyo Institucional de la Región	No Cuenta con Apoyo	1	3	3	3	3	3	3
		Cuenta con Apoyo Parcial	2						
		Cuenta con Apoyo	3						
	Incentivos Económicos	No se Otorgan	1	2	2	2	2	2	2
		Se Otorgan	2						
			No Cuenta con Participación de los	1	3	3	3	3	3

Factor PESTEL	Criterios	Criterios de Evaluación	Puntaje	Sistemas No Convencionales					
				Agua lluvia	Agua de Rocío	Agua de niebla	Agua de drenaje de actividades agrícola para reúso	Agua subterránea	Recarga artificial de acuíferos
	Gestión y Gobernanza Local	habitantes de la región.							
		Cuenta con Participación de los habitantes de la región.	3						
	Cumplimiento ODS 6	No Cumple	1	3	3	3	3	3	3
		Cumple	3						
Económico	Costo de instalación por m3	Más que el Sistema Convencional	1						
		Igual que el Sistema Convencional	2	2	3	3	2	1	1
		Menos que el Sistema Convencional	3						
	Costo de Mantenimiento	Alto	1						
		Medio	2	2	3	2	1	1	1
		Bajo	3						
	Tasa de Retorno	10 a 15 años	1						
		5 a 10 años	2	3	1	1	1	1	1
		0 a 5 años	3						
Social	Número de personas beneficiadas	20% de los habitantes	1						
		50% de los habitantes	2	3	3	3	3	3	3
		100% de los habitantes	3						
	Generación de empleo local	20% de los empleados	1						
		50% de los empleados	2	2	2	2	2	2	2
		100% de los empleados	3						
	Acceso a la Capacitación de la comunidad	20% de población local capacitada	1						
		50% de población local capacitada	2	3	3	3	3	3	3
		100% de población local capacitada	3						
	Aceptación cultural del sistema - impacto social	Si	1						
		No	3	3	3	3	3	3	3
	Tecnológico	Durabilidad o vida útil	Menos de un año	1					
Entre 1 a 5 años			2	3	2	2	2	3	3
Más de 10 años			3						
Innovación en Colombia		Sistema implementado en Colombia	1						
		Sistema No implementado en Colombia	3	1	3	3	1	3	3
Eficiencia del Sistema		Menos del 20%	1						
		Entre el 20% y el 70%	2	3	3	3	3	3	3

Factor PESTEL	Criterios	Criterios de Evaluación	Puntaje	Sistemas No Convencionales					
				Agua lluvia	Agua de Rocío	Agua de niebla	Agua de drenaje de actividades agrícola para reúso	Agua subterránea	Recarga artificial de acuíferos
	respecto al sistema tradicional	Más del 70%	3						
Ecológicos	Materia prima y Manufactura Regional	No	1	2	2	2	1	1	1
		Parcialmente	2						
		Si	3						
	Consumo de Energía	Requiere	1	3	3	3	1	1	1
		No requiere	3						
	Impacto a fuentes naturales	Bajo	3	3	3	3	2	1	1
		Medio	2						
		Alto	1						
	Adaptación a Condiciones Hidroclimáticas	No	1	3	2	2	NA	NA	2
		Parcialmente	2						
		Si	3						
	Adaptación a Condiciones Hidrogeológicas	No	1	2	NA	NA	3	1	1
		Parcialmente	2						
		Si	3						
	Huella de Carbono	Alta	1	3	3	3	2	1	1
Media		2							
Baja		3							
Legal	Existe Normativa Aplicable en Colombia	No	1	3	1	1	3	3	1
		Si	3						
	Inclusión de actores locales en la toma de decisiones	No	1	3	3	3	3	3	3
		Si	3						
<b>Puntaje Total</b>				<b>58</b>	<b>54</b>	<b>53</b>	<b>47</b>	<b>45</b>	<b>45</b>

Tomado de: Autora

#### 8.4 Evaluación de los Tres Sistemas no Convencionales de Captación

Teniendo en cuenta la evaluación realizada anteriormente se puede determinar que conforme con las condiciones y características hidroclimáticas, hidrogeológicas e hídricas de la zona de estudio y los requerimientos de los seis sistemas planteados en el objetivo específico 2, se seleccionaron los sistemas de mayor puntuación del objetivo anterior, de los cuales se realizó

un análisis cuantitativo considerando el consumo anual de agua para el total de la población de la vereda la Bogotana.

Considerando el análisis del contexto local donde se ubicará el proyecto y de la evaluación comparativa realizada anteriormente, se consideró evaluar el sistema de captación de agua lluvia, agua de rocío y de niebla, analizando criterios ambientales, sociales, económicos y técnicos como se resaltan a continuación.

#### **8.4.1 Evaluación del Sistema de Captación de Agua Lluvia (SCALL)**

Los sistemas de captación de agua lluvia son una alternativa no convencional para el abastecimiento de agua a la población. Para la implementación de este sistema se cuenta con diferentes métodos o alternativas de diseño como los tanques modulares, tanques subterráneos, en cubiertas, ladera, entre otros. Para el análisis técnico, se consideró el sistema de captación de agua lluvia de ladera, el cual se justifica a continuación:

En cuanto al aspecto ambiental se consideró este sistema con el fin de aprovechar las condiciones hidrogeológicas e hidroclimáticas de la zona de estudio. En primera instancia el área cuenta con una precipitación promedio anual de 2562 mm, entre los años 2005 y 2024, lo cual según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO, en su publicación sobre la Captación y el Almacenamiento de Agua Lluvia para la Agricultura en América Latina (2013), se clasifica la precipitación como abundante cuando se superan los 1.200 mm de precipitación anual, por lo cual la precipitación generada en promedio anual en la vereda la Bogotana es ideal para el aprovechamiento del agua lluvia.

Por otra parte, la presencia de rocas ígneas con baja porosidad y permeabilidad, favorecen la capacidad de escorrentía al limitar la infiltración del agua a gran profundidad, así mismo los suelos franco-arcillosos y franco-arenosos presentes en la zona poseen gran

capacidad para la retención de agua en las capas superficiales, lo que permite la regulación de la escorrentía y la reducción de la velocidad del escurrimiento del agua. Estas características facilitan el aprovechamiento del agua lluvia en ladera, al permitir una escorrentía más controlada, una mayor retención superficial y una disponibilidad del recurso hídrico más constante, generando una mejor regulación del flujo del agua hacia el sistema y los cuerpos de agua superficiales cercanos. En cuanto a la pendiente, es importante resaltar que la zona de estudio cuenta con zonas de gran inclinación debido a su topografía, logrando pendientes mayores a 10%, siendo ideal para la ubicación del sistema de captación de agua en ladera.

En cuanto al aspecto económico, la implementación de sistemas de captación de agua lluvia en cubierta, podría generar un costo adicional debido a que las viviendas de la vereda son construcciones artesanales y limitadas, por lo cual, se requeriría hacer la adecuación la estructura y la cubierta que soporte el sistema. Adicionalmente, la selección del sistema de captación de agua lluvia en ladera permite centralizar la captación de agua haciendo aprovechamiento de una zona más amplia otorgada por la Alcaldía Municipal y generando mayor capacidad de almacenamiento, así mismo, la gestión, el mantenimiento y los costos iniciales de la implementación del sistema se realizarían a través de la junta de acción comunal con aportes de la alcaldía municipal y diferentes entidades. De igual forma por medio de esta estrategia se reducirían cantidades y costos elevados de materiales que ya no se requerirían para el cambio de cubiertas.

Respecto al componente social, la comunidad de la vereda la Bogotana se beneficiaría con la implementación del sistema de ladera, debido a que mejora el acceso al agua, fortalece la participación de la comunidad a partir de la gestión comunitario del sistema a través de la junta de acción comunal, genera e incentiva la educación ambiental en el territorio y la generación de empleo local.

Finalmente, con el fin de evaluar las dimensiones del sistema de captación de agua lluvia por ladera (SCALL), se tomó como referencia el proceso establecido en el artículo de investigación de Pool y Carrera, (2021) para calcular el área de captación que requiere el sistema para suplir la necesidad de la vereda, así mismo, se consideraron como base los datos de la precipitación y escorrentía obtenida mediante el producto satelital Terraclimate. A continuación, se plasman los cálculos y resultados obtenidos:

1. **Coefficiente de escorrentía:** esta variable se obtiene a partir de la siguiente ecuación (Pool y Carrera, 2021)

## **Ecuación 2**

Coefficiente de escorrentía

$$C = \frac{Esc}{P \text{ anual}}$$

Donde:

**C:** Coeficiente de escorrentía

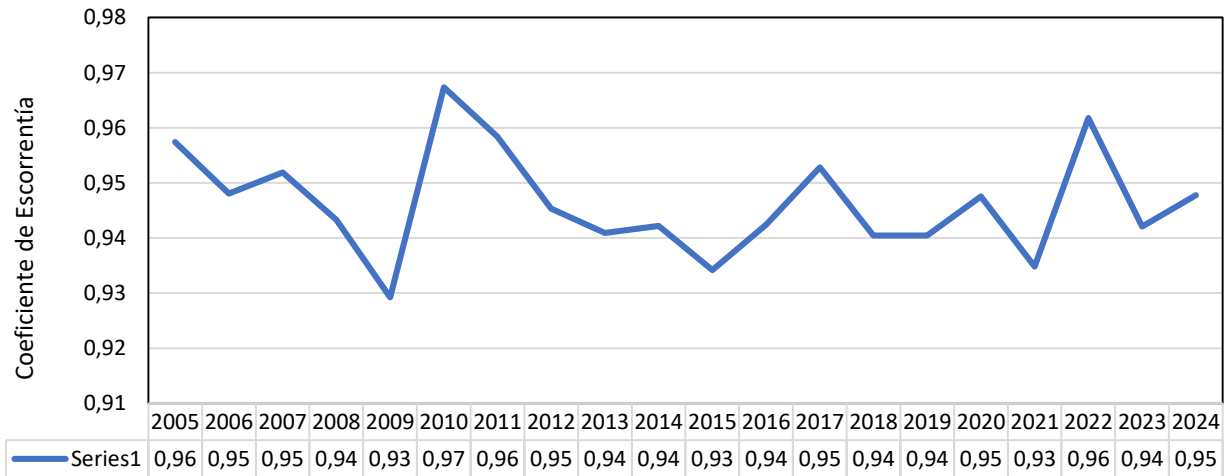
**Esc:** escorrentía superficial (mm/año)

**P anual:** Precipitación acumulada anual (mm/año)

En la Figura 35 se puede observar el comportamiento del coeficiente de escorrentía en el periodo comprendido entre 2005 y 2024 para la vereda la Bogotana, donde se evidencia que el año de menor valor fue 2009 con 0,93 y el año de mayor valor fue el 2010 con 0,97. El coeficiente de escorrentía para todos los años se encuentran por debajo de 1, lo que lo hace ideal ya que permite una mayor tasa de escorrentía superficial para su almacenamiento (Pool y Carrera, 2021). Conforme con lo anterior y con el fin de realizar el cálculo del área de captación en ladera se tomó como coeficiente de escorrentía el valor promedio de 0,95.

**Figura 35**

Coefficiente de escorrentía para un periodo entre 2005 y 2024



Tomado de TerraClimate - Abatzoglou et al.,2018.

- 2. Precipitación de Diseño:** con el fin de determinar los valores en los que las lluvias son más intensas o que el valor de la precipitación sea excedido, es necesario aplicar funciones de distribución de probabilidad, para esta investigación se aplicó la función de distribución acumulada de Gumbel tomando como referencia a Pool y Carrera, 2021, debido a que es la función que presenta mejores resultados para eventos hidrológicos.

### Ecuación 3

Precipitación de Diseño del Sistema Evaluado 1

$$P_d = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln(-\ln(1 - \frac{1}{Tr}))$$

Donde:

**Pd:** Precipitación máxima o de diseño (mm)

**β:** Parámetros de función

Tr: Periodo de retorno (años)

#### Ecuación 4

$\beta$ : Parámetros de función

$$\beta = \bar{x} - 0,451 \cdot S$$

Donde:

$\bar{x}$  : Promedio de la precipitación

S: Desviación estándar

#### Ecuación 5

$\alpha$ : Parámetros de función

$$\alpha = \frac{1,2826}{S}$$

Donde:

S: Desviación estándar

El periodo de retorno que se tomó para la aplicación de la función de Gumbel fue 5 años que es el periodo que se considera para proyectos de pequeña escala. El valor de la precipitación de diseño Pd fue de 2899 mm (Pool y Carrera, 2021).

- 3. Área de Captación de ladera:** Con el fin de determinar el área de captación que se requiere para el abastecimiento de agua en la vereda se tomó como referencia el consumo de agua anual para uso doméstico de 14016m<sup>3</sup> bajo las condiciones actuales de población y uso doméstico (Pool y Carrera, 2021)..

## Ecuación 6

Área de captación en ladera

$$A_{cap} = \frac{V_c}{P * C}$$

Donde:

**A<sub>cap</sub>**: Área de captación en ladera ( $m^2$ )

**V<sub>c</sub>**: Volumen de agua a capturar por año ( $m^3$ )

**P**: Precipitación de diseño m

**C**: Coeficiente de escorrentía del área de captación

En la Tabla 7 se plasman los resultados obtenidos con la aplicación de las ecuaciones anteriormente mencionadas, donde se puede evidenciar que el área que se requiere para la captación de 14016  $m^3$  de agua es de 582,8  $m^2$ .

**Tabla 7**

Dimensiones del sistema para la captación de agua lluvia en ladera

Zona de estudio	Precipitación de diseño (mm)	Precipitación de diseño (m)	Volumen de agua a capturar anual ( $m^3$ )	Coeficiente de escorrentía	Área de captación en ladera ( $m^2$ )
Vereda la Bogotana	2899,62	28,19	14016	0,95	582,8

Tomado de autora

### 8.4.2 Evaluación del Sistema de Captación de Agua de Rocío

La eficiencia de los sistemas de captación de agua de rocío depende de diversos factores. En primer lugar, influyen las condiciones climáticas y meteorológicas, como la temperatura, la

humedad relativa, la velocidad del viento y el punto de rocío. Otro aspecto importante es el tipo de diseño o de estructura del captador, debido a que influye en la cantidad de agua recolectada, entre los diseños más usados se encuentran los planos, cónicos y cilíndricos, es fundamental considerar el ángulo de inclinación adecuado que facilite el escurrimiento del agua. Finalmente, el material de la superficie es un factor fundamental, por lo que se deben seleccionar materiales que tengan alta capacidad de enfriamiento (Castillo y Cabeza, 2016).

Para el sistema de captación de agua de rocío se realizó una evaluación del aspecto ambiental a través del análisis de las condiciones climáticas y meteorológicas de la zona, con el objetivo de determinar si dichas variables favorecen el funcionamiento del sistema. En la vereda la Bogotana, la humedad relativa presenta valores comprendidos entre 65% y 85% (Climate Consultant, 2025), mientras que la velocidad del viento se mantiene en un rango entre 1,25 m/s y 1,50 m/s, rangos considerados óptimos para mejorar la eficiencia del sistema. Así mismo, la temperatura media registrada para el año 2024 osciló entre 19°C y 20°C.

Teniendo en cuenta los valores de la humedad relativa y la temperatura obtenidos, se realizó el cálculo del punto de rocío el cual indica la temperatura a la que el aire se debe enfriar para que el calor de agua pase por su proceso de condensación y así poder determinar la eficiencia del sistema para las condiciones ambientales de la vereda la Bogotana. Teniendo como referencia a Polanco (2023), se aplicó la fórmula de Magnus-Tetens para realizar el cálculo del punto de rocío debido a que es la ecuación más usada en meteorología para la estimación de este factor, a continuación, se plasma la fórmula:

## Ecuación 7

Punto de Rocío

$$T_d = \frac{b \cdot \alpha(T, RH)}{a \cdot \alpha(T, RH)}$$

Donde:

**Td:** Punto de rocío (°C)

**T:** Temperatura del aire (°C)

**RH:** Humedad relativa (%)

**a y b:** Coeficientes de Mangus

**a:** 17,625

**b:** 243,04 °C

**$\alpha(T, RH)$ :** Se obtiene a partir de la siguiente ecuación

## Ecuación 8

$\alpha(T, RH)$ :

$$\alpha(T, RH) = \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{aT}{b + T}$$

En la Tabla 8 se plasman los resultados obtenidos con la aplicación de la fórmula de Magnus anteriormente mencionada, donde se pudo evidenciar que el valor obtenido del punto de rocío para los 12 meses del año fue de 13.790 °C.

**Tabla 8**

Punto de rocío vereda la Bogatana para el año 2024.

Zona de estudio	Mes	Temp °C	Humedad Relativa	Coeficiente a	Coeficiente b	$\alpha(T, RH)$	Punto de Rocío °C
Vereda la Bogatana	Enero	19,619	75%	17,625	243,04	-3,576	13,790
	Febrero	19,591				-3,578	13,790
	Marzo	14,698				-3,888	13,790
	Abril	20,534				-3,520	13,790
	Mayo	20,971				-3,493	13,790
	Junio	21,078				-3,486	13,790
	Julio	21,658				-3,451	13,790
	Agosto	21,275				-3,474	13,790
	Septiembre	20,941				-3,495	13,790
	Octubre	20,516				-3,521	13,790
	Noviembre	19,857				-3,562	13,790
	Diciembre	19,608				-3,577	13,790

Tomado de elaboración propia

Los resultados obtenidos evidencian que el punto de rocío se encuentra por debajo de la temperatura del aire, condición que limita la generación de agua por condensación. Este comportamiento se debe a que un mayor valor de temperatura de punto de rocío implica una mayor concentración de vapor de agua en el aire, lo que a su vez favorece la condensación (Alfaro, 2023). Por lo tanto, considerando los resultados y con el objetivo de mejorar la eficiencia del sistema, se recomienda incorporar fuentes de energía que asistan o potencien el proceso de condensación. La incorporación de energía al sistema se puede realizar por medio de energía renovable, ejemplo de ello es la investigación de Liu et al., (2022), los cuales realizaron el análisis del rendimiento de un captador de agua de rocío asistido por una rueda desecante a partir de fuentes renovables como la energía solar y el aire ambiente, consiguiendo el aumento de la eficiencia del sistema.

Otra de las estrategias para aumentar la condensación es el material de la superficie, Khalil et al., (2016) recomiendan el uso del aluminio debido a su alta conductividad térmica. Así

mismo, señalan que la forma de la estructura que tiene mayor influencia en el rendimiento son las huecas simples tipo embudo, ya que esta forma reduce el flujo de aire caliente al interior y detiene el paso del aire frío, evitando así el proceso de convección. Por último, es importante considerar la posición con ángulo de 30°, ya que permite minimizar el intercambio causado por la velocidad del viento y así aumentar la recolección de agua.

Desde el enfoque económico, la evaluación de este sistema se orienta en el análisis de los costos asociados a la incorporación de fuentes de energía. El costo de inversión del sistema pasivo de captación de agua de rocío se considera bajo, dado que su estructura constructiva presenta un nivel bajo de complejidad. No obstante, la necesidad de la incorporar el suministro de energía conlleva a un aumento en los costos tanto de inversión inicial como de mantenimiento, incluso en casos que se empleen fuentes energías renovables.

El sistema permite mejorar el acceso al agua y reducir el estrés hídrico, y por ende permite mejorar la calidad de vida de la población. Así mismo, genera empleo y fomenta la educación ambiental por medio de capacitaciones sobre el uso y mantenimiento de estos sistemas, así como de la importancia del cuidado y ahorro del agua.

#### ***8.4.3 Evaluación del Sistema de Captación de Agua de Niebla***

El funcionamiento del sistema de captación de agua de niebla, depende de la ubicación y las condiciones climáticas y meteorológicas de la zona. Para evaluar este sistema se requiere contar con el valor del contenido de la niebla, sin embargo, para la presente investigación no se cuenta con el valor, por lo cual se realizará la evaluación y los cálculos de forma teórica con datos aproximados obtenidos de la revisión bibliográfica. Este sistema se evaluará desde los aspectos de la sostenibilidad.

Desde el aspecto ambiental se realizó el análisis de tres factores incidentes en la producción de agua de niebla. En primera instancia se determinó el valor de la humedad relativa el cual se encuentra en un rango entre 65% y 85%. Posteriormente, se determinó la velocidad del viento en un rango entre 1,25 m/s y 1,50 m/s y la dirección del viento de occidente a oriente. Por último, la altura de la vereda la Bogotana se encuentra en un rango entre 761 msnm y 850 msnm (Climate Consultant, 2025). Teniendo en cuenta el estudio realizado por Mora (2020) los valores anteriormente mencionados se pueden considerar para la implementación del sistema.

Desde el punto de vista económico, se evaluó el sistema teniendo en cuenta su diseño, estructura y materiales. En cuanto al material, el costo es reducido teniendo en cuenta que solo se requiere de una malla, una estructura metálica, plástica o de madera y una tubería. En la investigación de Ortiz et al., (2024) se pudo determinar que el material para la malla de plástico PET virgen se adapta mejor a diferentes condiciones atmosféricas además presentó un valor inferior de deformidad, así mismo en comparación con la malla Raschel, su valor es mucho más bajo. En cuanto al diseño y la estructura, Mora (2020), recomienda diseñar el sistema de forma cilíndrica toda vez que debido a su geometría puede recolectar agua en todas las direcciones y así aumentar su eficiencia y desempeño.

El aspecto social se ve impactado con el sistema debido a que es de fácil acceso e instalación por lo cual se puede aplicar directamente en cada vivienda, mejorando en primera instancia al acceso de agua y generando conciencia a partir de la educación ambiental.

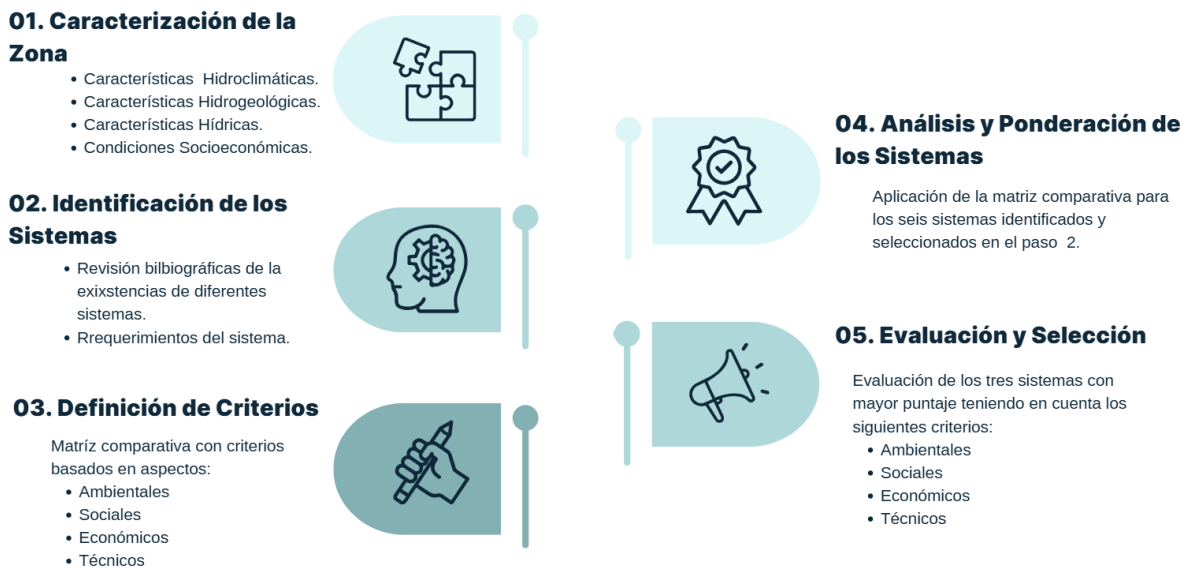
## **8.5 Metodología para la Selección de Sistemas no Convencionales de Captación de Agua**

La metodología para la selección de sistemas no convencionales de captación de agua se dividió en cinco pasos, caracterización de la zona de estudio, identificación de diferentes sistemas de captación no convencional de agua, definición de criterios de evaluación a partir de

matrices de comparación, análisis y ponderación de cada uno de los sistemas y por último evaluación y selección. En la Figura 36 se describen cada uno de los pasos de la metodología que sirve como herramienta para la selección del sistema que mejor se adapte a las condiciones de la zona.

**Figura 36**

Metodología para la selección de sistemas no convencionales de agua



Elaboración Propia

## 9. Conclusiones

En la presente investigación se diseñó una metodología para la selección de sistemas no convencionales de agua, a partir del caso de estudio ubicado en la vereda la Bogotana, del municipio El Carmen, Norte de Santander.

En primer lugar, se realizó la caracterización hidroclimática, hidrogeológica, hidrológica, socioeconómicas y culturales del área de estudio. Los resultados evidenciaron que la zona presenta alto potencial para el aprovechamiento de agua lluvia, dado que registra una precipitación promedio anual de 2562 mm. Así mismo, se determinó que la vereda la Bogotana no cuenta con un acuífero que permita el aprovechamiento de aguas subterráneas, y que, además no existen estudios sobre el nivel freático ni del estado actual del recurso.

Durante la revisión bibliográfica de los sistemas no convencionales de captación de agua, se identificó una amplia variedad, algunos orientados al aprovechamiento de recursos atmosféricos, hídricos del suelo y del mar. A partir de este análisis, se seleccionaron los seis sistemas más investigados y los que mejor se ajustan a las características de la vereda la Bogotana. Como resultado, se obtuvo que los sistemas de captación de agua lluvia, agua de niebla, agua de rocío, agua subterránea, recarga artificial de acuíferos y el agua de drenaje agrícola presentan un alto potencial para ser implementados en zona de estudio.

Con base en los sistemas seleccionados anteriormente, se elaboró una matriz comparativa para evaluar y contrastar los seis sistemas de captación de agua, aplicando los criterios de la herramienta estratégica PESTEL. A partir de esta evaluación se evidenció que los sistemas de recarga artificial de acuíferos y de aprovechamiento de aguas subterráneas presentan baja viabilidad para su implementación, principalmente por la ausencia de acuíferos en la zona y los altos costos asociados. De igual forma, se presentó con el sistema de aprovechamiento de agua de drenaje agrícola debido a que a pesar de que presenta gran potencial debido a que la economía de la vereda se basa en la agricultura, resultó poco factible,

ya que su tratamiento requiere procesos de alta complejidad para la eliminación de residuos de pesticidas y plaguicidas, lo que incrementa significativamente los costos.

A partir de los resultados obtenidos, se seleccionaron los tres sistemas de mayor puntaje para su evaluación. El sistema de recolección de agua lluvia se identificó como el más viable debido a la alta pluviosidad de la zona. Además, se propuso su implementación en zonas de ladera con el fin de aprovechar del potencial de esorrentía y de la topografía de la zona, adicionalmente, este tipo de sistema permite ser gestionado por la comunidad. Los sistemas de captación de agua de niebla y de agua de rocío presentaron una menor adaptabilidad a las características de la zona.

Finalmente se pudo concluir que la elaboración e implementación de esta metodología permitió seleccionar los sistemas de captación de agua que se ajustaran a las condiciones de la zona. Sin embargo, durante el proceso se presentaron dificultades en la búsqueda de algunas características puntuales de la vereda la Bogotana, como lo es la nubosidad. Así mismo, para futuras investigaciones es importante agregar el componente experimental el cual permite tener un valor más cercano de eficiencia y rendimiento de los sistemas.

## **10. Anexos**

1. Consolidado de datos de las principales características de la zona de estudio, así como de los cálculos realizados.
2. Topografía de la zona de estudio.

## 11. Referencias

- Abatzoglou, JT, SZ Dobrowski, SA Parks y KC Hegewisch, 2018: TerraClimate, un conjunto de datos globales de alta resolución sobre el clima mensual y el balance hídrico climático de 1958 a 2015. *Scientific Data*, 5
- Agencia Europea de Medio Ambiente [AEMA]. (18 de noviembre de 2024). La contaminación, el uso excesivo y el cambio climático amenazan la resiliencia hídrica. <https://www.eea.europa.eu/es/themes/water>.
- Alcaldía Municipal del Carmen, Norte de Santander. (2024) Plan de Desarrollo Municipal 2024 – 2027.
- Alcaldía Municipal del Carmen, Norte de Santander. (2024) Informe de Gestión 2022 – 2024.
- Alim, M. A., Rahman, A., Tao, Z., Samali, B., Khan, M. M., & Shirin, S. (2020). Feasibility analysis of a small-scale rainwater harvesting system for drinking water production at Werrington, New South Wales, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 270, 122437.
- Angelova, I., Alitchkov, D., & Radovanov, V. (2024). Technical and economic impact of water reuse as an integrated water resource management measure in rural water supply systems. *Water Supply*, 24(5), 1974-1984.
- Aragón Cruz, A., López Hernández, J. R., & Ávila Flores, O. (2022). Agua subterránea en Norteamérica, un caso de estudio: riesgo de contaminación y uso de los manantiales en San Simón Almolongas, Oaxaca, México. *Norteamérica*, 17(1).
- Arias-Torres, J. E., Jacobo-Villa, M. A., & Tolentino-Eslava, G. (2022). Captación de agua atmosférica sin consumo de energía. *Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería*, (125), 24-34.
- Caballero, M. E. B., Jaén, R. A. R., & Pino, A. O. (2021). Captación de niebla como fuente alternativa de agua en la Región de Azuero. *Prisma Tecnológico*, 12(1), 32-37

- Ccahuana, S. L. G. (2025). El papel de la hidrogeología en la prevención de desastres naturales: Inundaciones y sequías. *Scienceevolution*, 1(13), 48-63.
- Cipponeri, M. (2024). Evaluación y estudio de impacto ambiental. Libros de Cátedra
- Chamat, C. A. T., & Pinzón, T. M. (2022). Sistemas de captación y almacenamiento de agua alternativos desde la perspectiva del metabolismo social, Quibdó, Colombia. *Jangwa Pana: Revista de Ciencias Sociales y Humanas*, 21(3), 241-253.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL]. (2023). Necesidades de inversión en agua potable y saneamiento en América Latina y el Caribe. [https://sib.org.bz/wp-content/uploads/S2300429\\_es.pdf](https://sib.org.bz/wp-content/uploads/S2300429_es.pdf).
- CorfiColombiana. (2024). Informe Una Mirada al Sector del Agua Potable y Saneamiento: Logros y Retos Hacia Adelante. <https://investigaciones.corfi.com/documents/38211/0/22-03-2024.%20Informe%20Agua%20potable%20y%20saneamiento%20comentarios%20AJUST.pdf/44b6b441-eab5-412e-4c18-120c932448ee>.
- Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (2024). Síntesis Ambiental, Plan de Acción Cuatrienal 2024-2027.
- Duque-Jaimes, W., Ortega-Velásquez, J. F., & Ortiz-Villanueva, C. A. (2023). Dimensionamiento de un Sistema de Recolección y Aprovechamiento de Aguas Lluvias en el Salón Comunal del Barrio Tejaditos Piedecuesta Santander.
- Ernesto, g. C. X. (2020). Análisis de la calidad de agua obtenida a partir de un sistema de condensación de la humedad del aire (doctoral dissertation, universidad agraria del ecuador).
- Ertop, H., Kocięcka, J., Atilgan, A., Liberacki, D., Niemiec, M. y Rolbiecki, R. (2023). La importancia de la captación de agua de lluvia y sus posibilidades de uso: el ejemplo de Antalya (Turquía). *Water*, 15 (12), 2194.

- European Centre for Medium-range Weather Fore- casts -Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio- [ECMWF]. (2025). Advancing global NWP through international collaboration. <https://www.ecmwf.int/>
- Flores, P. A. C. (2018). Condiciones hidroclimáticas en los Andes de Santiago, y su influencia en el balance de masa del glaciar Echaurren Norte (Doctoral dissertation, Universidad Austral de Chile).
- Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero – Ambiental y Nuclear [INGEOMINAS]. (2000). Atlas de aguas subterráneas de Colombia.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), 2022. Interpretación de materiales geológicos a partir de sensores remotos para la cartografía geomorfológica aplicada a levantamientos de suelos. Colombia
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2022). Estudio Nacional del Agua 2022. [https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-23/resumen\\_ejecutivo\\_estudio\\_nacional\\_del\\_agua\\_2022\\_0.pdf](https://www.ideam.gov.co/sites/default/files/prensa/boletines/2024-08-23/resumen_ejecutivo_estudio_nacional_del_agua_2022_0.pdf).
- Instituto Nacional de Salud [INS]. (2024). Boletín de vigilancia de la calidad del agua para el consumo humano.
- Gobernación de Chile, DE RECARGA ARTIFICIAL, D. A. Guía Metodológica.
- Gómez Mosquera, W. (2017). Abastecimiento de agua potable en comunidades rurales en el Chocó biogeográfico. Aplicación de tecnologías no convencionales (Doctoral dissertation).
- Gómez, J., Nivia, Á, Montes, N.E., Almanza, M.F., Alcárcel, F.A. & Madrid, C.A. 2015. Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. En: Gómez, J. & Almanza, M.F. (Editores), Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 33, p. 9–33. Bogotá.

- Hernández, R. V. T., Pérez, F. R., Rocha, M. D. S. O., & Briones, F. C. (2025). RECUPERACIÓN DEL DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA POR.
- Kanooni, A. y Kohan, MR (2024). Captación de agua de niebla con cepillo cilíndrico. *Scientific Reports* , 14 (1), 19679.
- Hofman-Caris, R., Bertelkamp, C., de Waal, L., van den Brand, T., Hofman, J., van der Aa, R., & van der Hoek, J. P. (2019). Rainwater harvesting for drinking water production: a sustainable and cost-effective solution in the Netherlands?. *Water*, 11(3), 511.
- Khalil, B., Adamowski, J., Shabbir, A., Jang, C., Rojas, M., Reilly, K., & Ozga-Zielinski, B. (2016). A review: dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors. *Sustainable Water Resources Management*, 2(1), 71-86.
- Karimidastenaie, Z., Avellán, T., Sadegh, M., Kløve, B., & Haghighi, A. T. (2022). Unconventional water resources: Global opportunities and challenges. *Science of the Total Environment*, 827, 154429.
- Jain, S., Srivastava, A., Vishwakarma, D. K., Rajput, J., Rane, N. L., Salem, A., & Elbeltagi, A. (2024). Protecting ancient water harvesting technologies in India: strategies for climate adaptation and sustainable development with global lessons. *Frontiers in Water*, 6, 1441365.
- Jarraya Horriche, F., & Benabdallah, S. (2020). Assessing aquifer water level and salinity for a managed artificial recharge site using reclaimed water. *Water*, 12(2), 341.
- Jarimi, H., Powell, R., & Riffat, S. (2020). Review of sustainable methods for atmospheric water harvesting. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 15(2), 253-276.
- Lara, J. A., & Hernández, A. (2003). Reutilización de aguas residuales: aprovechamiento de los nutrientes en riego agrícola. Seminario internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Instituto Cinara, Universidad del Valle, 237-242.

- López, I. G. (2020). Desarrollo sostenible. Editorial Elearning, SL.
- Lord, J., Thomas, A., Treat, N., Forkin, M., Bain, R., Dulac, P., ... & Schmaelzle, P. H. (2021). Global potential for harvesting drinking water from air using solar energy. *Nature*, 598(7882), 611-617.
- Madhav, S., Izah, S. C., van Hullebusch, E. D., & Srivastav, A. L. (Eds.). (2023). *Water Resources Management for Rural Development: Challenges and Mitigation*. Elsevier.
- Marcillo, J. L. M., & Cara, R. B. (2021). Gestión integrada de recursos hídricos y gobernanza: Subcuenca del río Vinces, provincia Los Ríos-Ecuador. *Revista de ciencias sociales*, 27(3), 471-497
- Martínez León, J. (2021). Estudio hidrogeológico para la recarga artificial del acuífero asociado a la restauración ambiental de las lagunas de Belvis del Jarama.
- Méndez, J. O. M. (2020). Los retos del acceso a agua potable y saneamiento básico de las zonas rurales en Colombia. *Revista de ingeniería*, (49), 28-37.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente]. (2021). *Plan Nacional de Abastecimiento de Agua Potable y Saneamiento Básico Rural*
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente]. (2025). *Gestión Integral del Recurso Hídrico*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minvivienda] (2023). *Informe de rendición de cuentas*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minvivienda]. (2025). *Gestión Integral del Recurso Hídrico*.
- Miranda, E. A., Alejo, R. A., & Navarro, W. M. (2022). SOSTENIBILIDAD DE LA COSECHA DE AGUA PLUVIAL COMO ALTERNATIVA DE ABREVADERO PARA GANADO EN ZONA RURAL DEL DISTRITO DE ILAVE-PERÚ. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica de Ingenierías*, 4(1).

- Monterroso-Rivas, A. I., & Gómez-Díaz, J. D. (2021). Impacto del cambio climático en la evapotranspiración potencial y periodo de crecimiento en México. *Terra Latinoamericana*, 39.
- Mora Alarcon, K. T. (2020). Análisis de viabilidad para la implementación de mallas atrapanieblas en la vereda San Antonio bajo en el municipio de Arbeláez-Cundinamarca.
- Moran Troya, K. A. (2024). *Sistemas de Drenaje en los Cultivos de Banano en el Ecuador* (Bachelor's thesis, BABAHOYO: UTB, 2024).
- Muñoz, m. M. (2023). Tendencia de la evapotranspiración en Cuautitlán Izcalli, México y su importancia en las actividades agrícolas (doctoral dissertation, universidad nacional autónoma de México).
- Organización Meteorológica Mundial [OMM]. (2018). Guía de Prácticas Climatológicas.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2013). en su publicación sobre la Captación y el Almacenamiento de Agua lluvia para la Agricultura en América Latina
- Organización Mundial de la Salud, OMS. (2023). Agua para consumo humano. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
- Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth, CSIRO. (2020). Marco Operativo para Proyectos de Recarga Artificial en Acuíferos. <https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2021/01/Informe-final.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] (2023). Publicación sobre la Captación y el Almacenamiento de Agua lluvia para la Agricultura en América Latina (2013),
- Omarova, A., Tussupova, K., Hjorth, P., Kalishev, M., & Dosmagambetova, R. (2019). Water supply challenges in rural areas: a case study from Central Kazakhstan. *International journal of environmental research and public health*, 16(5), 688.

- Ortiz-Aguas, G. A., Martínez-González, S. A., Lucho-Constantino, C. A., & Bigurra-Alzati, C. A. (2024). Análisis del sistema de atrapanieblas y rocío por medio de una malla tejida de plástico PET. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 12, 75-81.
- Parra Vicente, S. (2024). Recolección de agua con superficies parahidrófobas (Bachelor's thesis).
- Pascual Aguilar, J. A., Payano, R., Medrano Pérez, O. R., & Naranjo, M. F. (2011). Tecnología para la recolección de agua niebla. *Recuperado de [https://www. researchgate.net/publication/257199788\\_TECNOLOGIA\\_PARA\\_LA\\_RECOLECCION\\_DE\\_AGUA\\_DE\\_NIEBLA](https://www.researchgate.net/publication/257199788_TECNOLOGIA_PARA_LA_RECOLECCION_DE_AGUA_DE_NIEBLA)*.
- Pirouz, B., Palermo, SA, y Turco, M. (2021). Mejora de la eficiencia de las cubiertas verdes mediante sistemas de captación de agua atmosférica (un diseño innovador). *Water* , 13 (4), 546.
- Pool, C. S., & Carrera, C. V. (2021). Diseño eficiente de Sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales para su aplicación en zonas con demandas crecientes. *Aqua-LAC*, 13(2), 53-64.
- Quon, H., & Jiang, S. (2023). Decision making for implementing non-traditional water sources: a review of challenges and potential solutions. *npj Clean Water*, 6(1), 56.
- Ramos-Parra, Y. J., Díaz-Gómez, J., Suarez-Escobar, A., Sánchez-Quitian, Z. A., Suescún-Carrero, S. H., Zipa-Casas, N. Y., & Medina-Alfonso, M. (2025). Risk assessment of the drinking water supply and distribution system in rural areas in Boyacá-Colombia using water safety plans. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 11, 101169.
- Rodríguez Castiblanco, N. E. (2025). Diseño e implementación de filtro captador de niebla y condensador de humedad, con almacenamiento de agua, estudio de caso en las localidades de Sumapaz y Ciudad Bolívar.

- Salehi, M. (2022). Escasez mundial de agua y seguridad del agua potable: La preocupación de hoy y la crisis del mañana. *Environment International*, 158 , 106936.
- Sánchez Niño, L. T (2024). Comparación entre datos de programas satelitales CHIRPS, ERA 5 y del IDEAM para generar información climatológica. Caso de estudio Boyacá y Casanare.
- Secretaría de Agua Potable y Saneamiento Básico, Gobernación de Norte de Santander. (2023). Informe de gestión y balance de resultados 2020-2023.
- Soto, g. A. C., prieto, I. T. B., & acevedo, b. E. S (2016). Regionalización del modelo hidrológico mensual de thomas en el departamento norte de santander. lli semana internacional y xi semana de ciencia, tecnología e innovación, 131.
- Tzanakakis, V. A., Paranychianakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2020). Water supply and water scarcity. *Water*, 12(9), 2347.
- Toan, T. D., Hanh, D. N., & Thu, D. T. (2023). Management models and the sustainability of rural water supply systems: An analytical investigation in Ha Nam Province, Vietnam. *Sustainability*, 15(12), 9212.
- Torres, L. D. S., & Rubiano, É. Q. (2020). Sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento de agua para la zona rural. *Revista de Ingeniería*, (49), 52-61.
- Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA). (2023). Planificación del ordenamiento productivo y social de la propiedad Norte de Santander. Colombia, Norte de Santander.
- Valverde, O. E. A., Bernal, J. A. D., & Tarán, J. L. P. (2020). Desarrollo empresarial, gestión ambiental y calidad de vida en el municipio de Sucre. *Investigación & Negocios*, 13(21), 77-85.
- World Health Organization. (2022). A field guide to improving small drinking-water supplies: water safety planning for rural communities. In *A field guide to improving small drinking-water supplies: water safety planning for rural communities*.

Yermolenko, V., Hafurova, O., Deineha, M., Novak, T., Temnikova, A., & Naidansuren, E. (2021).  
Quality of drinking water in rural areas: problems of legal environment. In E3S Web of  
Conferences (Vol. 280, p. 09022). EDP Sciences.

Yüksel, I. (2012). "Developing a Multi-Criteria Decision Making Model for PESTEL Analysis."  
International Journal of Business and Management.