



**Propuesta de metodología para la medición de la huella hídrica verde por
medio de métodos indirectos en la Reserva Río Blanco**

Natalia Giraldo Torres

José Daniel López Cárdenas

Propuesta de trabajo de grado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Director (a): Omar Castrillón Osorio

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, Caldas, Colombia

2026

Cita	(Giraldo Torres & López Cárdenas, 2026)
Referencia	Giraldo Torres, N & López Cárdenas, J.D (2026). <i>Propuesta de metodología para la medición de la huella hídrica verde por medio de métodos indirectos en la Reserva Río Blanco</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXXII

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como Turnitin, Copilot y Gemini, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: biblioteca.umanizales.edu.co

Repositorio Institucional: ridum.umanizales.edu.co

Universidad de Manizales: umanizales.edu.co

Revistas: revistasum.umanizales.edu.co

Fondo Editorial: editorialum.umanizales.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Contenido

1	Propuesta De Metodología Para La Medición De La Huella Hídrica Verde Por Medio De Métodos Indirectos En La Reserva Río Blanco.....	10
1.1	Planteamiento Del Problema.....	12
1.2	Antecedentes	13
1.2.1	Escala global y desarrollos metodológicos	14
1.2.2	Escala continental y regional.....	15
1.2.3	Escala nacional, regional y local	16
2	. Justificación.....	18
3	Objetivos	20
3.1	Objetivo general	20
3.2	Objetivos específicos.....	20
4	Marco Teórico	21
4.1	Evolución Conceptual de la Huella Hídrica (HH)	21
4.2	El Agua Verde: Dinámica En Ecosistemas Y Sostenibilidad	21
4.3	Diferenciación Con La Huella Hídrica Azul Y Gris.....	22
4.4	Fundamentos De Teledetección En El Monitoreo Hídrico	22
4.5	Índices Espectrales de Humedad y Vegetación	23
4.6	Modelamiento Hidrológico y Geoestadística	23
4.7	Contexto Normativo Y De Conservación Territorial.....	24
5	Metodología	24
5.1	Fase 1: Recopilación, Curaduría y Sistematización de Información (Cumplimiento objetivo específico 1).....	25
5.1.1	Análisis Documental Y Referencial	26
5.1.2	Captura De Información Primaria Y Secundaria.....	26

5.2	Fase 2: Modelamiento Climático y Geoestadística (Cumplimiento Objetivo Específico 2)	27
5.3	Fase 3: Caracterización Biofísica Y Procesamiento De Índices Espectrales (Cumplimiento Objetivo Específico 2)	27
5.3.1	Clasificación De Coberturas	28
5.3.2	Análisis De Humedad Foliar (NDMI)	28
5.4	Integración Espacial Y Estimación Del Índice De Huella Hídrica Verde (HHV) (Cumplimiento Objetivo Específico 3)	28
6	Resultados	29
6.1	Matriz de Variables y Parámetros Consolidados	29
6.2	Arquitectura del Modelo de Geoprocesamiento	30
6.3	Delimitación y Caracterización del Área de Estudio	32
6.4	Análisis de Humedad Vegetal (NDMI)	33
6.5	Caracterización de Coberturas Vegetales	36
6.6	Comportamiento de la Precipitación Anual	39
6.7	Índice de Huella Hídrica Verde (HHV) y Distribución Espacial	40
6.8	Distribución Espacial De La HHV	41
7	Discusión	42
8	Conclusiones	44
9	Recomendaciones	46
10	Referencias	48
11	Anexos	51

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Variables definitivas empleadas en el modelamiento de la HHV</i>	30
Tabla 2 <i>Predios de la Reserva Río Blanco</i>	32
Tabla 3 <i>Distribución de superficies por clases de humedad NDMI</i>	35
Tabla 4 <i>Coberturas vegetales identificadas y pesos asignados</i>	37
Tabla 5 <i>Rango de precipitación anual y pesos asignados</i>	39
Tabla 6 <i>Resultados finales de la zonificación de Huella Hídrica Verde</i>	40

Lista de figuras

Figura 1 <i>Diagrama Metodológico</i>	25
Figura 2 <i>Mapa de ubicación del proyecto</i>	33
Figura 3 <i>Mapa de clasificación del NDMI</i>	36
Figura 4 <i>Mapa de coberturas</i>	38
Figura 5 <i>Mapa de precipitación interpolada por Universal Kriging</i>	40
Figura 6 <i>Mapa de zonificación por categorías de HHV</i>	42

Siglas, acrónimos y abreviaturas

HH	Huella Hídrica
HHV	Huella Hídrica Verde
SIG	Sistemas de Información Geográfica
NDMI	Normalized Density Moisture Index

Resumen

La presente investigación tuvo como propósito diseñar y aplicar una metodología para la estimación de la huella hídrica verde en la Reserva Forestal Río Blanco (Manizales, Colombia). Debido a la ausencia de información base unificada, el estudio adoptó un enfoque de integración multitemporal, utilizando insumos de diferentes periodos ante la imposibilidad técnica de obtener capas de información de una misma anualidad. Esta falta de estudios previos representaba una problemática crítica para la gestión local, ya que la carencia de datos métricos impedía a las autoridades ambientales priorizar zonas de conservación frente a presiones antrópicas. Para solventarlo, se integraron datos hidrometeorológicos, coberturas vegetales y análisis espectrales (NDMI) mediante técnicas de interpolación espacial y SIG.

Se procesó una imagen Sentinel-2A para calcular el NDMI y se clasificaron coberturas a escala 1:10.000 bajo la metodología CORINE Land Cover. Los resultados obtenidos son de carácter cuantitativo: la distribución espacial de la huella hídrica verde reveló que las áreas de bosque denso y vegetación secundaria alta poseen la mayor capacidad de retención (pesos asignados de 4 y 5), mientras que los pastos limpios y zonas degradadas registraron los valores más bajos (peso de 1). La aplicación del modelo Universal Kriging permitió validar que es posible generar cartografía temática precisa mediante métodos indirectos asincrónicos, constituyendo un insumo estratégico y replicable para la planificación hídrica y la sostenibilidad de la región andina.

Palabras clave: Huella hídrica verde, NDMI, interpolación espacial, coberturas vegetales, Río Blanco, Manizales.

Abstract

This research aimed to design and apply a methodology for estimating the green water footprint in the Río Blanco Forest Reserve (Manizales, Colombia). Due to the lack of unified baseline information, the study adopted a multi-temporal integration approach, using inputs from different periods given the technical impossibility of obtaining information layers from the same year. The absence of previous studies represented a critical management problem, as the lack of metric data prevented environmental authorities from prioritizing conservation areas against anthropic pressures. To address this, hydrometeorological data, land cover, and spectral analysis (NDMI) were integrated using spatial interpolation techniques and GIS.

A Sentinel-2A satellite image was processed to calculate the NDMI, and land covers were classified at a 1:10,000 scale using the CORINE Land Cover methodology. The results are quantitative: the spatial distribution of the green water footprint revealed that dense forest and high secondary vegetation areas have the highest retention capacity (assigned weights of 4 and 5), while clean pastures and degraded zones recorded the lowest values (weight of 1). The application of the Universal Kriging model confirmed that it is possible to generate accurate thematic cartography through asynchronous indirect methods, providing a strategic and replicable input for water planning and sustainability in the Andean region.

Keywords: Green water footprint, NDMI, spatial interpolation, land cover, Río Blanco, Manizales.

1 Propuesta De Metodología Para La Medición De La Huella Hídrica Verde Por Medio De Métodos Indirectos En La Reserva Río Blanco

El recurso hídrico es el eje central del desarrollo social y la preservación de la vida; en consecuencia, lograr su gestión sostenible constituye hoy uno de los compromisos ambientales más importantes de la actualidad. Por lo tanto, la huella hídrica se ha consolidado como uno de los indicadores clave para evaluar el consumo y la disponibilidad del recurso, diferenciando entre agua azul, agua gris y agua verde. Sin embargo, en Colombia la cuantificación de la huella hídrica verde ha estado tradicionalmente enfocada en sistemas agrícolas, como café, arroz o maíz, dejando de lado ecosistemas estratégicos de conservación que cumplen funciones esenciales en la regulación hídrica.

La Reserva Forestal Río Blanco, ubicada en el municipio de Manizales, es un ejemplo de esta situación. Este territorio aporta aproximadamente el 35% del agua potable de la ciudad, convirtiéndose en un espacio vital para la seguridad hídrica urbana. No obstante, hasta ahora no se contaba con estudios que permitieran estimar la huella hídrica verde en la reserva, lo que generaba un vacío de información y dificultaba la toma de decisiones estratégicas en torno a la conservación y el manejo del recurso. En efecto, la ausencia de metodologías aplicadas en este tipo de ecosistemas limitaba la capacidad de las entidades responsables para anticipar riesgos, priorizar acciones de restauración y garantizar la sostenibilidad del abastecimiento.

El problema central que aborda esta investigación radica en la falta de información sobre la huella hídrica verde en ecosistemas de conservación, lo cual impide comprender la capacidad real de estos territorios para sostener el recurso hídrico. A saber, sin datos confiables y espacializados, resulta complejo establecer políticas de uso del suelo, regular actividades productivas en áreas de influencia y fortalecer la gobernanza ambiental. Por consiguiente, se

planteó la necesidad de diseñar una metodología que permitiera estimar la huella hídrica verde en la Reserva Río Blanco, integrando diferentes fuentes de información y técnicas de análisis espacial.

El objetivo general de este trabajo fue diseñar y aplicar una metodología indirecta para la estimación de la huella hídrica verde en la Reserva Forestal Río Blanco, mediante la integración de datos hidrometeorológicos, coberturas vegetales y análisis espectrales a través de sistemas de información geográfica. De la misma forma, se buscó generar cartografía temática que permitiera comprender la distribución espacial de la huella hídrica verde y aportar insumos estratégicos para la planificación ambiental y la gestión hídrica de la ciudad de Manizales.

Las preguntas de investigación que guiaron el estudio fueron las siguientes: ¿Es posible estimar la huella hídrica verde en ecosistemas de conservación mediante métodos indirectos? ¿Qué relación existe entre la cobertura vegetal, la precipitación y la humedad relativa en la distribución espacial de la huella hídrica verde? ¿Cómo puede la información obtenida contribuir a la planificación ambiental y a la gestión hídrica de la ciudad de Manizales? Estas preguntas orientaron el desarrollo metodológico y permitieron vincular los resultados con el planteamiento inicial del problema.

La justificación de la investigación se encuentra en la necesidad de generar información técnica y cartográfica que fortalezca la gestión ambiental y la gobernanza del recurso hídrico en la región andina. En síntesis, disponer de un modelo replicable para la estimación de la huella hídrica verde en ecosistemas de conservación constituye un aporte significativo para entidades como Aguas de Manizales S.A.E.S.P-BIC y Corpocaldas, ya que les permite priorizar zonas de conservación, orientar decisiones de inversión y sensibilizar a la comunidad sobre la importancia de preservar los ecosistemas que garantizan el suministro de agua. Así pues, este trabajo no solo busca llenar un vacío académico, sino también ofrecer una herramienta práctica para la sostenibilidad hídrica y territorial de Manizales.

1.1 Planteamiento Del Problema

La Reserva Forestal de Río Blanco, ubicada en el municipio de Manizales, constituye un ecosistema estratégico que aporta aproximadamente el 35% del agua potable consumida por la población urbana. Su papel es vital para el sistema, pues regula el ciclo hidrológico mediante la interacción de bosques de niebla y suelos con altas tasas de infiltración. Sin embargo, pese a su relevancia, la huella hídrica verde —el agua de lluvia almacenada en el suelo y la vegetación— carece de una metodología aplicada para su medición. Esta ausencia de datos métricos impide que entidades como Aguas de Manizales y Corpocaldas cuenten con indicadores numéricos para priorizar zonas de conservación, limitando la toma de decisiones a criterios cualitativos.

La problemática se intensifica al considerar que la planificación ambiental en la región andina enfrenta presiones por la expansión urbana y el cambio climático. Sin una metodología que permita representar cartográficamente esta variable a una escala de detalle (1:10.000), la gestión del recurso se realiza sobre un escenario incompleto. Se requiere, por tanto, transitar de la descripción general hacia la cuantificación técnica, utilizando variables ponderadas (pesos numéricos) de precipitación, índices espectrales como el NDMI y tipos de suelo, para generar insumos confiables que aseguren la sostenibilidad del 89% del uso del agua que, según estimaciones nacionales, depende de la fracción verde en sectores regulados por ecosistemas similares.

Partiendo de esta carencia de datos técnicos y herramientas de precisión espacial, se formula la siguiente Pregunta de Investigación:

¿Es posible diseñar una metodología basada en métodos indirectos y herramientas de geoinformación que permita la medición y representación cartográfica de la huella hídrica verde en la Reserva Forestal de Río Blanco, superando las limitaciones de información base y la asincronía de datos multitemporales?

A nivel global, el concepto de huella hídrica verde ha sido ampliamente utilizado en sectores agrícolas y forestales, con metodologías que integran datos hidrometeorológicos, características edáficas y coberturas vegetales. Países como Holanda, China y España han avanzado en la implementación de modelos indirectos que permiten estimar la disponibilidad de agua verde sin recurrir a mediciones invasivas, fortaleciendo la gestión territorial. En Colombia, aunque existen estudios parciales en cultivos como café y arroz, aún persiste un vacío en la aplicación de metodologías indirectas en ecosistemas estratégicos de conservación, como la Reserva Río Blanco.

La problemática se intensifica en el contexto de la región andina, donde los ecosistemas de bosque de niebla y subpáramo enfrentan presiones crecientes derivadas de la expansión urbana, el cambio climático y las actividades económicas. Sin una metodología que permita medir y representar cartográficamente la huella hídrica verde, la planificación ambiental se asemeja a diseñar un mapa incompleto: se toman decisiones sin conocer con precisión la capacidad real del territorio para sostener el recurso hídrico.

En este escenario, se hace necesario proponer una metodología indirecta que, a partir de datos hidrometeorológicos, técnicas de interpolación espacial y análisis de variables como tipo de suelo y cobertura vegetal, permita estimar y representar la huella hídrica verde en la Reserva Río Blanco. De esta manera, se busca llenar el vacío existente, generar insumos técnicos confiables y aportar a la gestión sostenible del agua en un ecosistema de alta relevancia ambiental y social.

1.2 Antecedentes

El estudio de la huella hídrica y su modelamiento geoespacial ha experimentado una evolución significativa en las últimas dos décadas. Para comprender las bases teóricas y metodológicas que sustentan la medición del agua verde en la Reserva Forestal Río Blanco, es imperativo analizar el estado del arte desde una perspectiva global hasta llegar a las aplicaciones específicas en el territorio colombiano.

1.2.1 Escala global y desarrollos metodológicos

El cimiento académico de esta línea de investigación se atribuye al trabajo de Hoekstra y Chapagain (2007), quienes introdujeron la huella hídrica como un indicador multidimensional. Existe un acuerdo generalizado en la literatura sobre la supremacía de la fracción verde en el balance hidrológico global; sin embargo, al profundizar en la operatividad de estos conceptos, surge una discrepancia metodológica fundamental. Mientras que el Water Footprint Assessment Manual (UNESCO-IHE & Water Footprint Network, 2011) propone un enfoque basado en balances teóricos de agua en el suelo, diversos autores cuestionan la rigidez de estos protocolos. La limitación crítica de los modelos propuestos en 2011 radica en su naturaleza estática, la cual no logra capturar la dinámica de ecosistemas de alta montaña donde la interceptación foliar y la humedad del dosel cambian en escalas de tiempo menores a un mes.

Esta tensión se hace más evidente al contrastar la teoría clásica con los avances en geomática. Salama (2012) introduce un cambio de paradigma al proponer el uso de sensores remotos, argumentando que las reflectancias satelitales superan la incertidumbre de los métodos indirectos basados únicamente en datos meteorológicos. No obstante, surge una coincidencia problemática en las revisiones de Springer (2021) y diversas publicaciones de MDPI (2021): aunque la teledetección ofrece una visión espacialmente continua, la mayoría de estos estudios han sido validados en zonas agrícolas de topografía plana. Esto representa una brecha metodológica para el estudio de reservas forestales andinas, ya que los modelos globales a menudo ignoran el efecto de la sombra orográfica y la saturación de los índices de vegetación en bosques densos.

Por otra parte, la literatura reciente presenta una convergencia analítica respecto a la resolución de los datos. Chen et al. (2020) comprobaron que el éxito de una estimación indirecta no depende solo del algoritmo, sino de la capacidad de distinguir pequeñas variaciones en la cobertura. Aquí se identifica otra limitación significativa en los estudios previos: la tendencia a

utilizar sensores de baja resolución espacial (como MODIS) para análisis que requieren una escala de gestión local. Al analizar estas discrepancias, se hace evidente que, aunque la base teórica de la huella hídrica está consolidada desde hace casi dos décadas, persiste un vacío en la integración de índices espectrales específicos (como el NDMI) para ecosistemas protegidos con alta nubosidad. Esta investigación busca, precisamente, resolver esa falta de concordancia mediante el uso de Sentinel-2A, cuya resolución de 10 metros permite una precisión que los antecedentes globales citados no alcanzan a documentar en zonas de reserva.

1.2.2 Escala continental y regional

Al trasladar el análisis a una escala continental, la literatura revela una discrepancia marcada entre los modelos aplicados en latitudes templadas frente a las regiones tropicales y de alta montaña. En el contexto europeo, Vanham et al. (2013) consolidaron investigaciones robustas que vinculan el uso del suelo con el consumo hídrico; no obstante, una limitación metodológica sustancial en estos estudios es que asumen condiciones topográficas relativamente homogéneas. Esta simplificación resulta inaplicable en la región andina, donde la pendiente y la altitud alteran drásticamente la relación entre la precipitación efectiva y la infiltración. Mientras los estudios europeos se centran en la eficiencia del agua en la cadena de suministro, los ecosistemas estratégicos de Suramérica demandan un enfoque centrado en la regulación hídrica natural, una brecha que los modelos continentales tradicionales no logran cerrar.

Por otro lado, las investigaciones desarrolladas en el continente asiático, particularmente en China, presentan una coincidencia técnica con las necesidades de la Reserva Río Blanco al priorizar el estudio de bosques subtropicales. Autores como Zhang et al. (2020) y Wang et al. (2023) han demostrado que la heterogeneidad de las coberturas vegetales es el factor que más condiciona la huella hídrica verde. Sin embargo, surge aquí una contradicción operativa: a pesar de la precisión de sus algoritmos, estos estudios suelen apoyarse en sensores de baja resolución como MODIS o

GLDAS. Esta elección técnica representa una barrera para la gestión de detalle, ya que resoluciones de 250 o 500 metros por píxel son incapaces de capturar la fragmentación del paisaje andino, donde en unos pocos metros se transita de un bosque denso a una zona de pastizales o áreas degradadas.

En este escenario de evolución tecnológica, los desarrollos más recientes en África (Ahmed et al., 2025) y las nuevas revisiones de Springer (2025) proponen el uso de Machine Learning e índices como el NDMI para refinar la predicción. No obstante, al analizar estos avances se identifica una omisión crítica en la literatura previa: casi la totalidad de estos modelos operan bajo la premisa de "datos sincrónicos", es decir, asumen que la imagen satelital, los registros de lluvia y los mapas de suelos corresponden exactamente al mismo momento temporal. Esta limitación de diseño ignora la realidad institucional de muchos países en desarrollo, donde la información base suele ser asincrónica. Por lo tanto, mientras la tendencia regional apunta hacia la automatización algorítmica, esta investigación propone un avance en la flexibilidad metodológica, validando que la integración de capas de distintos periodos —cuando se procesan mediante técnicas de interpolación y normalización adecuadas— sigue siendo una ruta técnica válida y necesaria para el diagnóstico de áreas protegidas.

1.2.3 Escala nacional, regional y local

En el escenario colombiano, la gestión del recurso hídrico ha transitado hacia una visión integral liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2015) y el IDEAM (2015). Existe un consenso institucional en reconocer que el agua verde es el componente predominante en la dinámica hidrológica nacional; no obstante, surge una discrepancia crítica entre la normativa y su aplicación técnica. Mientras los lineamientos del Estudio Nacional del Agua (ENA) establecen la importancia de esta fracción, los métodos propuestos dependen de datos de estaciones meteorológicas cuya densidad en la región andina es insuficiente. Esta limitación metodológica genera una dependencia de promedios regionales que ignoran la microclimatología de reservas

forestales, una brecha que investigaciones como las de Duque-Escobar (2018) intentan visibilizar al subrayar que el 89% del uso hídrico agropecuario depende del agua verde, pero sin ofrecer una ruta de espacialización de detalle para áreas protegidas.

A nivel regional y local, se observa una coincidencia en los diagnósticos de entidades como Corpocaldas (2017) y Findeter (2014) sobre la vulnerabilidad hídrica de Caldas. Sin embargo, al analizar la literatura académica específica sobre la zona cafetera y de alta montaña, surge una contradicción operativa. Por un lado, estudios en el sur del país (Muñoz, 2016) y en cultivos andinos (Silva-Olaya et al., 2020) han logrado cuantificaciones exitosas basadas en balances físicos; por otro lado, estos modelos presentan la limitación de ser sitio-específicos, requiriendo propiedades físico-químicas del suelo medidas en campo que son inexistentes para la totalidad de la Reserva Río Blanco.

Finalmente, al situar el análisis en la Reserva Forestal Río Blanco, las investigaciones de Acebedo y Arenas (2024), junto con las reflexiones de Valencia (2005) y Pérez (2019), exponen una brecha metodológica persistente. A diferencia de los estudios en el Valle del Cauca (Jiménez & Quintero, 2021) o en el sector cafetero (Cenicafé, 2022), donde la red de estaciones es densa, la Reserva Río Blanco carece de un sistema de monitoreo en tiempo real. Esto ha derivado en una limitación de gobernanza: se toman decisiones de conservación basadas en cartografía generalista.

Existe una coincidencia final entre los estudios locales de la Universidad de Manizales (2020-2023): todos señalan la necesidad de implementar métodos indirectos, pero ninguno ha propuesto una arquitectura SIG que integre la asincronía de datos como una variable de diseño. Por lo tanto, esta investigación se distancia de los antecedentes citados al no pretender una medición "perfecta" basada en datos simultáneos inexistentes, sino en proponer una metodología de normalización multitemporal que permita, por primera vez, una representación cartográfica a escala 1:10.000 de la salud hídrica de la reserva.

2. Justificación

La Reserva Forestal de Río Blanco constituye un ecosistema estratégico para el suministro de agua potable de la ciudad de Manizales, aportando aproximadamente el 35% del recurso hídrico consumido por la población. Su papel hidrológico es esencial, pues actúa como regulador natural del ciclo del agua mediante la interacción entre bosque de niebla, suelos de alta capacidad de infiltración y precipitaciones constantes. Sin embargo, pese a esta relevancia, la huella hídrica verde —es decir, el agua proveniente de la lluvia y almacenada en el suelo y la vegetación— carece de estudios detallados que permitan su medición y representación cartográfica en este territorio. Esta ausencia limita la planificación ambiental y la toma de decisiones estratégicas en conservación y ordenamiento territorial.

La justificación de este proyecto se sustenta en varios niveles. En primer lugar, desde una perspectiva ambiental, la falta de información espacializada sobre la huella hídrica verde impide identificar con precisión las zonas de mayor potencial hídrico dentro de la reserva. Esto dificulta la priorización de áreas para restauración ecológica y conservación, lo que puede comprometer la capacidad de la reserva para seguir abasteciendo de agua a la ciudad. Al generar mapas temáticos basados en métodos indirectos, se proporcionará una herramienta técnica que permitirá visualizar la distribución del agua verde y orientar acciones de manejo más efectivas.

En segundo lugar, desde un enfoque académico y científico, la investigación responde a vacíos identificados en la literatura nacional y regional. Aunque existen estudios sobre huella hídrica verde en cultivos agrícolas como café, arroz y maíz, aún no se han desarrollado metodologías aplicadas a ecosistemas de conservación como Río Blanco. La propuesta metodológica de este trabajo, basada en la integración de datos hidrometeorológicos, interpolaciones espaciales y análisis de coberturas del suelo, representa una innovación que puede ser replicada en otros territorios similares. Además, contribuye a la consolidación de líneas de

investigación en sistemas de información geográfica aplicados a la gestión ambiental, fortaleciendo la formación académica en este campo.

En tercer lugar, desde una perspectiva institucional y social, la investigación ofrece beneficios directos a entidades como Aguas de Manizales S.A.E.S.P-BIC y Corpocaldas, responsables de la administración y vigilancia ambiental de la reserva. Al contar con información espacial precisa sobre la huella hídrica verde, estas instituciones podrán fundamentar mejor sus decisiones en materia de conservación, restauración y planificación territorial. Asimismo, la comunidad local se verá beneficiada, pues la protección del recurso hídrico garantiza la sostenibilidad del suministro de agua potable y la preservación de la biodiversidad asociada al bosque de niebla y subpáramo.

La pertinencia del estudio también se justifica en el marco de la normatividad ambiental vigente en Colombia, que establece la obligación del Estado y de las entidades territoriales de planificar el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales bajo criterios de sostenibilidad. Normas como la Constitución Política de 1991, la Ley 99 de 1993 y la Ley 373 de 1997, así como la Norma Técnica Colombiana NTC-ISO 14046:2016, respaldan la necesidad de contar con información técnica y metodológica para evaluar el impacto ambiental vinculado al uso del agua. En este sentido, la propuesta metodológica se alinea con las disposiciones legales y técnicas que rigen la gestión del recurso hídrico en el país.

Finalmente, desde una perspectiva estratégica y prospectiva, la investigación contribuye al desarrollo regional y nacional al proporcionar herramientas para la gestión hídrica basada en evidencia científica. La generación de cartografía temática sobre la huella hídrica verde permitirá reducir brechas de conocimiento, fortalecer la integración entre geodesia, cartografía y gestión ambiental, e innovar en metodologías de georreferenciación aplicables a ecosistemas estratégicos. Además, abre nuevas líneas de investigación sobre la relación entre disponibilidad hídrica y

sostenibilidad ecológica, lo que resulta de alta importancia teniendo en cuenta el avance del cambio climático y la creciente presión antrópica sobre los recursos naturales.

En conclusión, la justificación de este proyecto se fundamenta en la necesidad de llenar un vacío crítico de información sobre la huella hídrica verde en la Reserva Forestal de Río Blanco, aportando insumos técnicos, académicos y sociales que permitan mejorar la gestión del recurso hídrico y garantizar la sostenibilidad de un ecosistema vital para la ciudad de Manizales. La propuesta metodológica indirecta, no solo responde a exigencias normativas y científicas, sino que también constituye una herramienta práctica para la toma de decisiones informadas en conservación y planificación territorial.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Proponer una metodología para la medición de la huella hídrica verde por medio de métodos indirectos en la Reserva Forestal de Río Blanco.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las variables hidrometeorológicas, edáficas y de cobertura vegetal que influyen en la estimación de la huella hídrica verde en el ecosistema de la Reserva Forestal de Río Blanco.
- Estructurar un modelo de geoprocesamiento que integre datos de interpolación climática, análisis de suelos y coberturas vegetales mediante herramientas SIG para la estimación del agua verde.
- Representar la distribución espacial de la huella hídrica verde mediante cartografía temática detallada que sirva como insumo para la planificación ambiental de la reserva.

4 Marco Teórico

El sustento científico de la presente investigación se articula mediante la convergencia de la hidrología física, la ecología de paisajes y las ciencias de la información geoespacial. A continuación, se desarrollan los ejes conceptuales y técnicos que fundamentan el modelamiento de la huella hídrica verde en ecosistemas andinos de conservación.

4.1 Evolución Conceptual de la Huella Hídrica (HH)

La gestión del recurso hídrico ha experimentado un cambio de paradigma en las últimas décadas, pasando de una visión centrada exclusivamente en la extracción de agua de ríos y acuíferos hacia un análisis integral del consumo. La HH se define como un indicador multidimensional que mide el volumen total de agua dulce utilizada para producir bienes y servicios (Hoekstra & Chapagain, 2007). Este concepto introdujo una ruptura metodológica al permitir la cuantificación de flujos "invisibles" de agua, facilitando la identificación de la presión real sobre los ecosistemas.

La formalización técnica de este indicador se consolidó con el Water Footprint Assessment Manual (UNESCO-IHE & Water Footprint Network, 2011), el cual estableció que la HH no es solo una cifra volumétrica, sino una métrica con ubicación geográfica y temporal explícita. Este manual es la base de la presente investigación, ya que valida el uso de métodos indirectos y modelos climáticos para representar espacialmente los resultados en territorios donde la instrumentación de campo es limitada.

4.2 El Agua Verde: Dinámica En Ecosistemas Y Sostenibilidad

Se define técnicamente como el volumen de agua de lluvia que queda almacenada en la zona radicular del suelo y que es consumida por la vegetación a través de la evapotranspiración o incorporada a su biomasa. A diferencia del agua azul (flujos superficiales), el agua verde es el motor biológico de los bosques andinos.

Aldaya et al. (2010) sostienen que el agua verde posee una importancia estratégica superior para la seguridad hídrica, pues representa el sustento de la biodiversidad y la regulación térmica sin intervención humana. En el contexto colombiano, los hallazgos de Duque-Escobar (2018) son fundamentales, ya que revelan que cerca del 89% del uso del agua en sectores estratégicos depende de esta fracción. Esto implica que la salud de la Reserva Río Blanco no se mide solo por el caudal de sus quebradas, sino por la capacidad de sus suelos y coberturas para retener y procesar la precipitación efectiva.

4.3 Diferenciación Con La Huella Hídrica Azul Y Gris

Para lograr un balance hídrico riguroso, el marco teórico distingue los otros componentes definidos por el Water Footprint Network (2011):

- **Huella Hídrica Azul.** Se refiere al consumo de recursos hídricos superficiales o subterráneos. En la reserva, este componente se vincula con el agua que drena hacia el sistema de acueducto de Manizales.
- **Huella Hídrica Gris.** Es un indicador de la calidad del agua, definiendo el volumen necesario para asimilar contaminantes. Aunque esta tesis se centra en la fracción verde, Vanham et al. (2013) advierten que la alteración de la cobertura boscosa reduce la filtración natural, incrementando indirectamente la huella gris río abajo.

4.4 Fundamentos De Teledetección En El Monitoreo Hídrico

La medición de la huella hídrica verde en áreas extensas como Río Blanco requiere del uso de la geomática. La base física de la teledetección es la firma espectral, es decir, la forma en que las coberturas reflejan o absorben la radiación electromagnética.

Salama (2012) fundamentó el uso de sensores remotos para estimar la HH, demostrando que es posible inferir la evapotranspiración a partir de la reflectancia en las bandas del infrarrojo. Este enfoque se potencia con el uso de misiones satelitales como Landsat 8 o Sentinel-2, las cuales

ofrecen la resolución espacial necesaria para captar la heterogeneidad de los bosques nublados (Chen et al., 2020).

4.5 Índices Espectrales de Humedad y Vegetación

El modelamiento mediante métodos indirectos utiliza índices matemáticos derivados de las bandas satelitales. En esta investigación, los pilares técnicos son:

- **NDMI (Normalized Difference Moisture Index)**. Es el índice más crítico para el agua verde. Utiliza la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) para detectar los niveles de humedad en el dosel forestal. Como señala Springer (2025), el NDMI actúa como un proxy directo del contenido de agua edáfica disponible para las plantas.
- **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**. Mide la densidad y salud de la vegetación. Su integración con modelos de balance hídrico permite estimar el coeficiente del cultivo o de la cobertura boscosa.
- **EVI y LAI (Leaf Area Index)**. Estos índices corrigen influencias atmosféricas y de suelo, permitiendo modelar con mayor exactitud la intercepción de la lluvia y la tasa de transpiración real (Wang et al., 2023).

4.6 Modelamiento Hidrológico y Geoestadística

Dado que los datos meteorológicos provienen de puntos discretos (estaciones), el marco teórico incorpora la interpolación espacial. Muñoz (2016) y Silva-Olaya et al. (2020) han demostrado que, en topografías complejas como la cordillera central, métodos como el Kriging Universal son indispensables para transformar registros puntuales de precipitación en superficies continuas.

Asimismo, la evolución hacia el Machine Learning en hidrología sugiere que la integración de variables edáficas, climáticas y espectrales mediante algoritmos permite reducir la

incertidumbre en la estimación de la huella verde, superando las limitaciones de las ecuaciones empíricas tradicionales de FAO-Penman-Monteith en zonas de alta montaña (Ahmed et al., 2025).

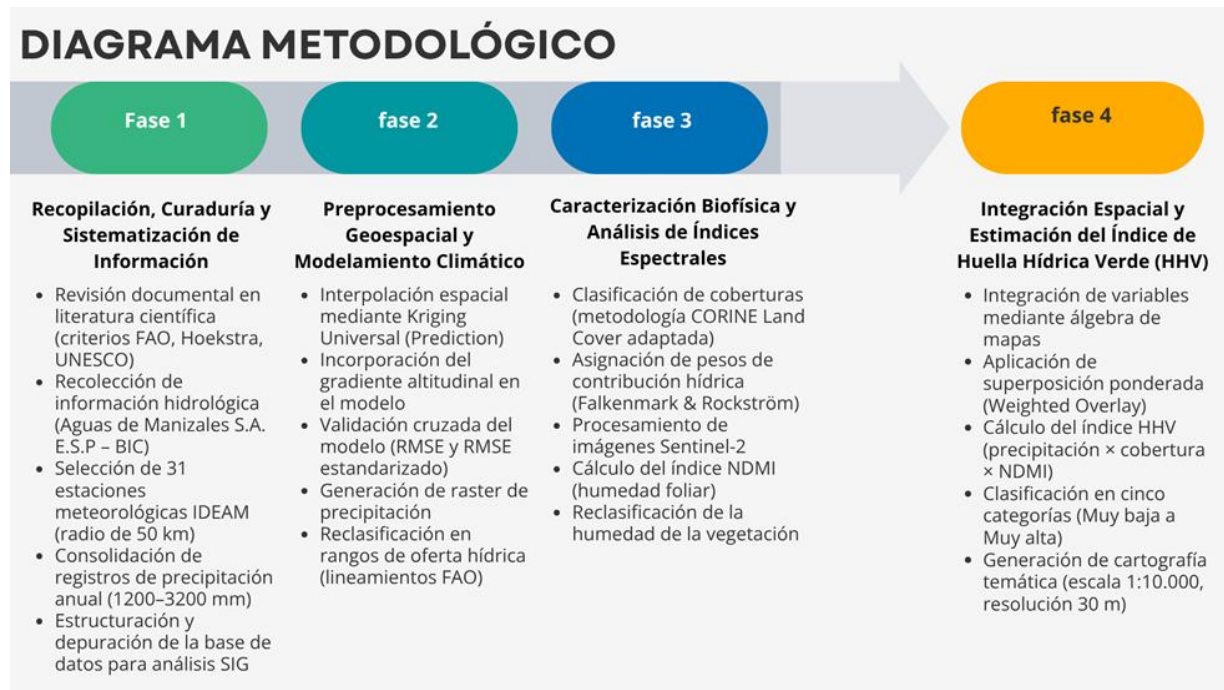
4.7 Contexto Normativo Y De Conservación Territorial

La técnica debe sustentarse en la realidad jurídica del territorio. Los análisis de Valencia (2005) y Acebedo y Arenas (2024) establecen que la Reserva Río Blanco es un "suelo de protección" donde cualquier decisión de ordenamiento debe regirse por el principio de precaución. La carencia de cartografía detallada sobre el agua verde ha sido históricamente una debilidad administrativa; por tanto, este marco teórico asume que la generación de datos espaciales es un acto de soberanía técnica para la defensa del territorio.

5 Metodología

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de naturaleza descriptiva y espacial. Se emplearon métodos indirectos de estimación hídrica integrados en un entorno de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El flujo de trabajo se estructuró en cuatro fases secuenciales diseñadas para dar cumplimiento a los objetivos específicos del proyecto, transitando desde la captura de datos primarios hasta la generación de cartografía temática de alta resolución.

Figura 1
Diagrama Metodológico



Nota. Elaboración propia

5.1 Fase 1: Recopilación, Curaduría y Sistematización de Información (Cumplimiento objetivo específico 1)

Esta fase inicial tuvo como objetivo consolidar una base de datos robusta que garantizara la trazabilidad de los resultados, centrándose en la identificación de variables críticas y la definición de una muestra meteorológica representativa. Para el modelamiento climático, se seleccionó una muestra formal de 31 estaciones meteorológicas del IDEAM, cuya densidad permite capturar con precisión la variabilidad de la precipitación en la zona de vida de bosque de niebla y su transición urbana.

5.1.1 Análisis Documental Y Referencial

Se realizó una revisión sistemática en repositorios académicos y bases de datos especializadas (Hoekstra & Chapagain, 2007; UNESCO-IHE, 2011). Esto permitió estandarizar los criterios de ponderación para ecosistemas andinos.

5.1.2 Captura De Información Primaria Y Secundaria

Se gestionaron datos técnicos con la empresa Aguas de Manizales S.A. E.S.P-BIC, obteniendo registros sobre la importancia hidrológica de la reserva. Asimismo, se seleccionaron 31 estaciones meteorológicas del IDEAM ubicadas en un radio de 50 km alrededor del área de estudio. Este criterio de vecindad asegura la representatividad climática y minimiza el error de autocorrelación espacial (Goovaerts, 1997). Se compilaron registros de precipitación anual con rangos entre los 1200 y 3200 mm, estableciendo la línea base para el modelamiento.

La red de estaciones se distribuye estratégicamente en el departamento de Caldas, incluyendo puntos en el municipio de Manizales (Aguas de Manizales, Alcázares, Bosques del Norte, Chec U. de Caldas, El Desquite, El Tablazo, Enea, Hacienda El Rosario, La Nubia, Aeropuerto La Nubia, La Palma, Planalto y Tesorito), Villamaría (Termales del Ruiz y Central Hidroeléctrica), Chinchiná (La Esmeralda y Cenicafé), y los municipios de Neira, Aranzazu, Salamina, Pácora, Aguadas, Pensilvania, Manzanares, Marquetalia, Victoria, Samaná, Norcasia y La Dorada. Asimismo, para evitar el "efecto de borde" y asegurar la continuidad del modelo hacia el sur de la región, se integraron las estaciones de Pereira Aeropuerto (Pereira) y Santa Rosa de Cabal en el departamento de Risaralda.

Esta cobertura en un radio de 50 km alrededor de la Reserva Río Blanco asegura que el modelo de Universal Kriging disponga de suficientes puntos de control para calcular la tendencia altitudinal de la lluvia, minimizando errores sistemáticos derivados de la orografía. Para mitigar sesgos, se realizó un análisis de homogeneidad de datos, verificando que los registros de estaciones

de alta montaña y de valle mantuvieran coherencia con los promedios históricos, asegurando que la información fuera técnica y estadísticamente susceptible de ser analizada en la siguiente fase.

5.2 Fase 2: Modelamiento Climático y Geoestadística (Cumplimiento Objetivo Específico 2)

Con la información sistematizada, se procedió a la espacialización de las variables. En topografías abruptas como la de Manizales, la interpolación lineal es insuficiente debido a la variabilidad del relieve.

Se implementó el método de Universal Kriging, justificando su uso en la capacidad de este algoritmo para modelar la deriva estructural asociada a la altitud (Hengl, 2009). La robustez del modelo se validó mediante un proceso de cross-validation, obteniendo un RMSE de 349 mm y un RMSE estandarizado de 0.86. Estos indicadores sugieren que el error de predicción es bajo y que el modelo no presenta un sesgo de sobreestimación. El producto final fue un modelo digital de precipitación (raster) que fue reclasificado en cuatro rangos, asignando pesos proporcionales a la oferta de agua lluvia de acuerdo con los lineamientos de la FAO (2016).

5.3 Fase 3: Caracterización Biofísica Y Procesamiento De Índices Espectrales (Cumplimiento Objetivo Específico 2)

En esta fase se analizaron las coberturas vegetales y su estado hídrico mediante teledetección. El proceso se ejecutó en dos frentes:

5.3.1 Clasificación De Coberturas

Se aplicó la metodología CORINE Land Cover (escala 1:10.000). La asignación de pesos hídricos (desde 1.0 para bosques hasta 0.5 para pastos) se fundamentó en la resistencia aerodinámica y la capacidad de interceptación del dosel (Falkenmark & Rockström, 2006).

5.3.2 Análisis De Humedad Foliar (NDMI)

Se procesaron imágenes del sensor Sentinel-2A, aplicando correcciones atmosféricas para garantizar que los valores del índice NDMI reflejen el contenido real de agua foliar. Este índice permitió diferenciar zonas de estrés hídrico de zonas de alta saturación, siendo un insumo numérico clave para el álgebra de mapas.

5.4 Integración Espacial Y Estimación Del Índice De Huella Hídrica Verde (HHV) (Cumplimiento Objetivo Específico 3)

La fase final consistió en la síntesis de las variables mediante álgebra de mapas en un entorno SIG. Se realizó una superposición ponderada (Weighted Overlay) utilizando la siguiente expresión matemática:

$$HHV = \text{Peso precipitación} \times \text{Peso cobertura} \times \text{Peso NDMI}$$

Donde cada variable aportó un peso específico a la construcción del índice final. Los polígonos resultantes permitieron categorizar la reserva en cinco rangos de importancia: desde Muy Baja hasta Muy Alta Huella Hídrica Verde.

Finalmente, el análisis se consolidó a una escala 1:10.000 con una resolución espacial de 30 metros. Este nivel de detalle es coherente con los estándares de Chen, Li & Wu (2020) para el

estudio de áreas de conservación, permitiendo que la cartografía resultante sea un insumo técnico preciso para la planificación territorial y la protección del recurso hídrico en Manizales.

Para asegurar que los datos fueran "susceptibles de ser analizados", toda la información fue estandarizada al sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS / Origen Nacional (EPSG: 9377). El procesamiento geoespacial, el tratamiento estadístico de las estaciones y la generación de la cartografía final se realizaron íntegramente en el software ArcGIS Pro versión 3.2.0. La codificación de los datos raster se realizó con una resolución espacial de 30 metros, asegurando la compatibilidad entre las capas de Sentinel-2 y los modelos de interpolación, garantizando así la replicabilidad técnica del modelo propuesto.

6 Resultados

El desarrollo de esta investigación permitió materializar una propuesta estructurada para la evaluación del recurso hídrico en la Reserva Forestal Río Blanco. Los hallazgos se articularon en tres componentes: la consolidación de variables, la arquitectura del modelo geoespacial y la zonificación final de la huella hídrica verde.

6.1 Matriz de Variables y Parámetros Consolidados

Se consolidó una matriz técnica que determinó la dinámica de la huella hídrica verde mediante la interacción de tres dimensiones fundamentales. A diferencia de modelos previos, se integró el NDMI como un proxy de humedad en tiempo real, compensando la ausencia de sensores de suelo. Los insumos seleccionados permitieron una representatividad a escala 1:10.000, asegurando la precisión requerida para la gestión de la reserva (ver **Tabla 1**).

Tabla 1*Variables definitivas empleadas en el modelamiento de la HHV*

Dimensión	Variable Identificada	Insumo / Fuente de Datos	Resolución / Escala	Justificación Técnica en el Modelo
Hidrometeorológica	Precipitación media anual y gradiente altitudinal.	Registros históricos de 31 estaciones meteorológicas (IDEAM).	Escala regional (Radio de 50 km).	Define la oferta hídrica de entrada (agua lluvia) disponible para infiltración en el ecosistema andino.
Cobertura Vegetal	Tipología de coberturas y uso del suelo.	Cartografía CORINE Land Cover adaptada (IDEAM / Corpocaldas).	Escala 1:10.000 (Vectorial).	Determina la capacidad de interceptación del dosel. Los bosques densos retienen mayor agua verde que los pastos limpios.
Edáfica / Biofísica	Índice de Humedad de la Vegetación y capacidad de absorción foliar.	Imágenes satelitales Sentinel-2 (Cálculo del índice espectral NDMI).	30 metros por píxel (Ráster).	Actúa como <i>proxy</i> del contenido de agua en la zona radicular y el vigor hídrico de la biomasa en tiempo real.

Nota. Elaboración propia

La identificación de estas variables confirmó que, ante la ausencia de sensores de humedad en el suelo de la reserva, la integración del NDMI con la precipitación espacializada es la ruta más viable para cuantificar la absorción y retención del agua verde.

6.2 Arquitectura del Modelo de Geoprocesamiento

El segundo resultado principal fue la consolidación de la arquitectura del modelo de geoprocesamiento, la cual se materializó mediante la parametrización y concatenación de flujos de trabajo en el entorno de ArcGIS Pro 3.2.0. Este diseño constituyó la base operativa de la metodología propuesta, permitiendo la transformación de datos primarios en información espacial

estratégica. El modelo quedó estructurado bajo una lógica de evaluación multicriterio, descompuesta en los siguientes subprocesos:

1. **Submodelo de Oferta Climática.** e determinó que el método de interpolación definitivo fue el Universal Kriging (Prediction). El resultado de este diseño fue una superficie continua de precipitación que se reclasificó en cuatro rangos de disponibilidad hídrica. El modelo asignó automáticamente pesos matemáticos proporcionales al volumen de lluvia, permitiendo que las zonas con mayores registros pluviales tuvieran una mayor incidencia en el cálculo final de la huella verde.
2. **Submodelo de Regulación Biofísica.** Se estructuró la categorización técnica de las seis clases de coberturas identificadas en la reserva. El diseño metodológico estandarizó los pesos de contribución hídrica en un rango de 0.5 a 1.0; en este submodelo, se definieron los Bosques densos y Bosques de galería como los componentes de máxima retención (1.0), mientras que se parametrizó una reducción del 50% en la capacidad de regulación para las áreas de pastos limpios.
3. **Motor de Integración Espacial (Ecuación del Modelo).** El hallazgo central en el diseño de la arquitectura fue la consolidación de la ecuación de superposición ponderada (Weighted Overlay). El modelo procesó la intersección espacial de las matrices ráster bajo la siguiente arquitectura lógica:

$$HHV = \text{Pesoprecipitación} \times \text{Pesocobertura} \times \text{PesoNDMI}$$

El diseño de esta arquitectura garantiza que la metodología sea replicable y automatizable. Cualquier actualización futura en las imágenes satelitales (Sentinel-2) o en los registros de precipitación puede ser introducida en este flujo de trabajo para generar nuevos diagnósticos de la reserva sin alterar la estructura del modelo.

6.3 Delimitación y Caracterización del Área de Estudio

La presente sección expone los hallazgos obtenidos tras la aplicación de la metodología propuesta para la estimación de la huella hídrica verde (HHV) en la Reserva Forestal Río Blanco. Los resultados se presentan en cuatro etapas, correspondientes a las variables integradas en el modelo: NDMI, coberturas vegetales, precipitación interpolada y el índice compuesto HHV.

Partimos inicialmente del área de la reserva Río Blanco, la cual fue delimitada gracias a la unión de 11 predios, los cuales fueron previamente aportados por la empresa de Aguas de Manizales. Estos 11 predios se ven caracterizados en la siguiente tabla:

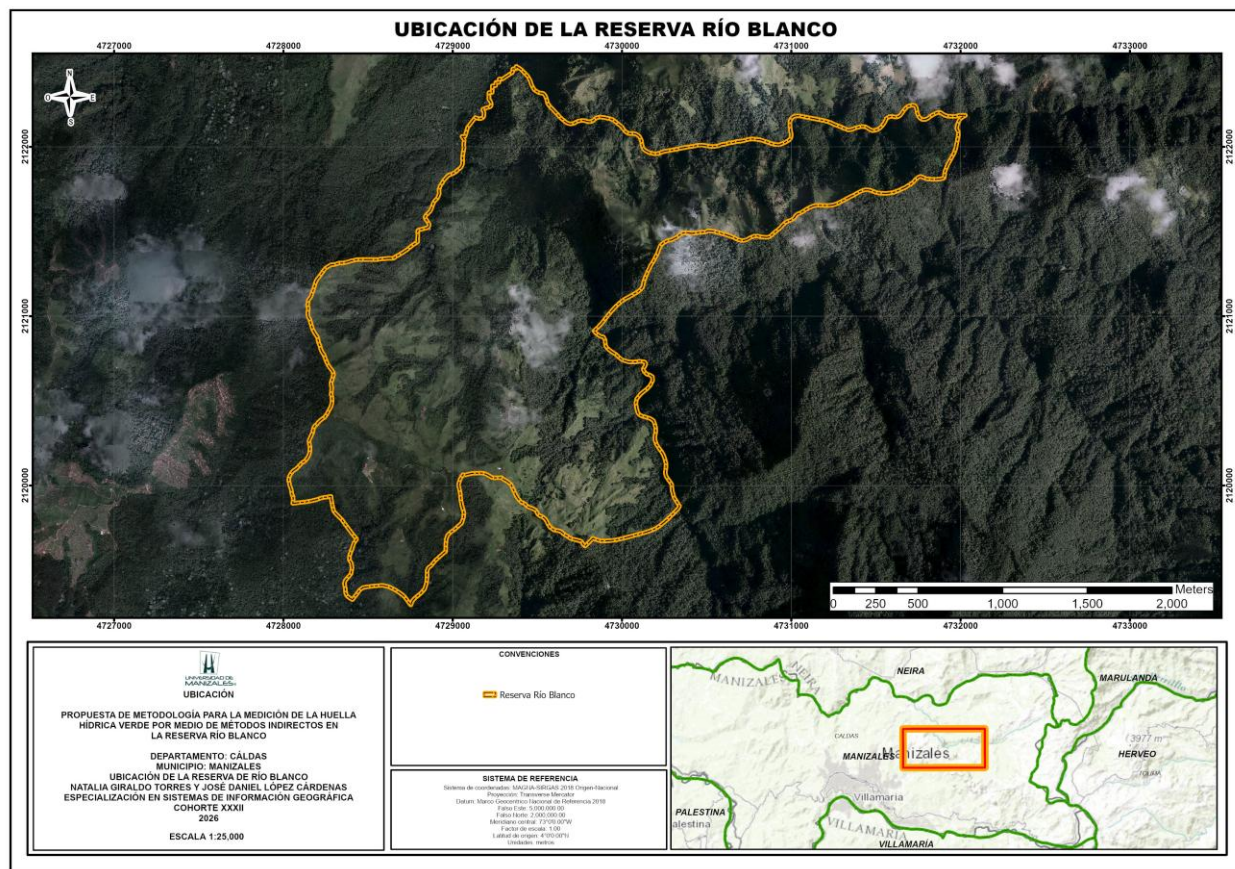
Tabla 2
Predios de la Reserva Río Blanco

NPN	Área en Hectáreas
170010001000000050004000000000	79.21
170010001000000050005000000000	83.88
170010001000000080001000000000	67.17
170010001000000080002000000000	112.01
170010001000000080003000000000	33.23
170010001000000080004000000000	44.72
170010001000000080005000000000	6.46
170010001000000080009000000000	13.45
170010001000000080010000000000	31.07
170010001000000080025000000000	18.00
170010001000000080026000000000	20.78
Total general	510.00

Nota. Elaboración propia

Como podemos observar el total de estos predios nos dio 510 ha, pero en los próximos puntos de los resultados se observará que se habla de 511,75 ha, la diferencia de 1,75 ha corresponde a un vacío en la capa catastral que fue corregido y sumado al área del proyecto.

Figura 2
Mapa de ubicación del proyecto



Nota. Elaboración propia

6.4 Análisis de Humedad Vegetal (NDMI)

A partir de una imagen Sentinel-2A del primer semestre de 2024, se calculó el Normalized Difference Moisture Index (NDMI) como proxy de la humedad relativa de la vegetación. Previamente, se aplicó un proceso de enmascaramiento para eliminar la nubosidad que pudiera afectar los resultados. El NDMI se reclasificó en cuatro rangos y se asignaron pesos entre 0 y 1, según el nivel de humedad detectado. (**Tabla 3**)

Como se observa en la **Tabla 3**, las categorías de alta humedad presentan los mayores valores de ponderación (1), asociadas a vegetación vigorosa y con alta disponibilidad de agua,

mientras que las zonas clasificadas como secas reciben los valores más bajos (0,1), indicando condiciones de estrés hídrico y menor capacidad de almacenamiento de humedad en el dosel vegetal.

La distribución espacial de estas categorías se presenta en la Nota. Elaboración propia

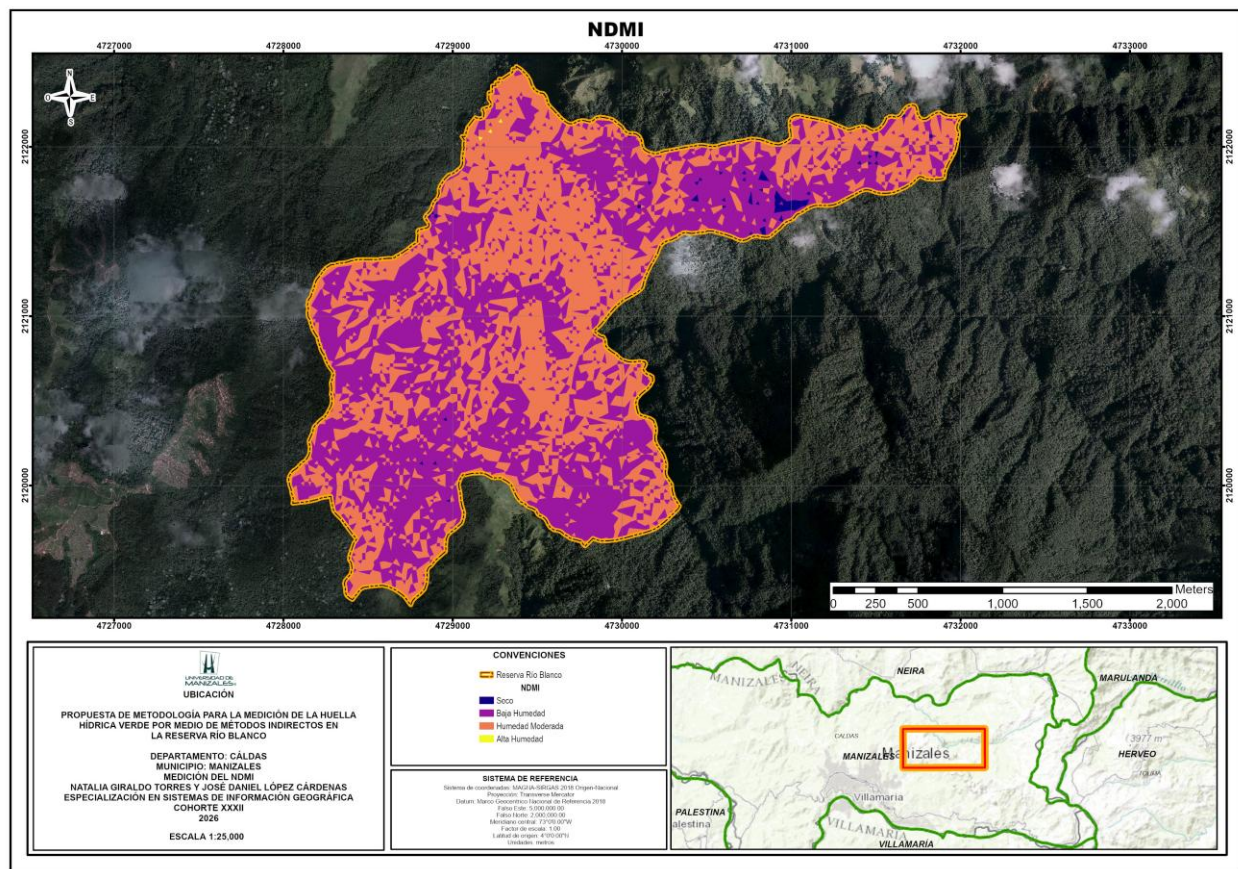
Figura 3, donde se evidencia la heterogeneidad en la humedad de la cobertura vegetal dentro del área de estudio, permitiendo identificar zonas con mayor disponibilidad hídrica frente a áreas con condiciones más secas.

Tabla 3

Distribución de superficies por clases de humedad NDMI

Clase NDMI	Interpretación	Peso	Total
Alta Humedad	Vegetación vigorosa, buena disponibilidad de agua	1	0,082242
Baja Humedad	Inicio de estrés hídrico	0,3	260,439651
Humedad Moderada	Vegetación en condiciones normales	0,6	248,421597
Seco	Vegetación sin humedad, estrés severo	0,1	2,809809
Total general			511,753299

Nota. Elaboración propia

Figura 3*Mapa de clasificación del NDMI**Nota.* Elaboración propia

6.5 Caracterización de Coberturas Vegetales

Se realizó una clasificación de coberturas a escala 1:10.000, con ventana de digitalización 1:2.500, utilizando una ortoimagen de Manizales del año 2021 (resolución 15 cm/píxel) descargada del geoportal Colombia en Mapas. La clasificación se basó en la metodología CORINE Land Cover adaptada, identificando seis clases principales. A cada cobertura se le asignó un peso entre 0 y 1, según su capacidad de retención de agua verde.

Las coberturas identificadas y sus respectivos pesos se presentan en la **Tabla 4**, mientras que su distribución espacial dentro del área de estudio se muestra en la

Figura 4.

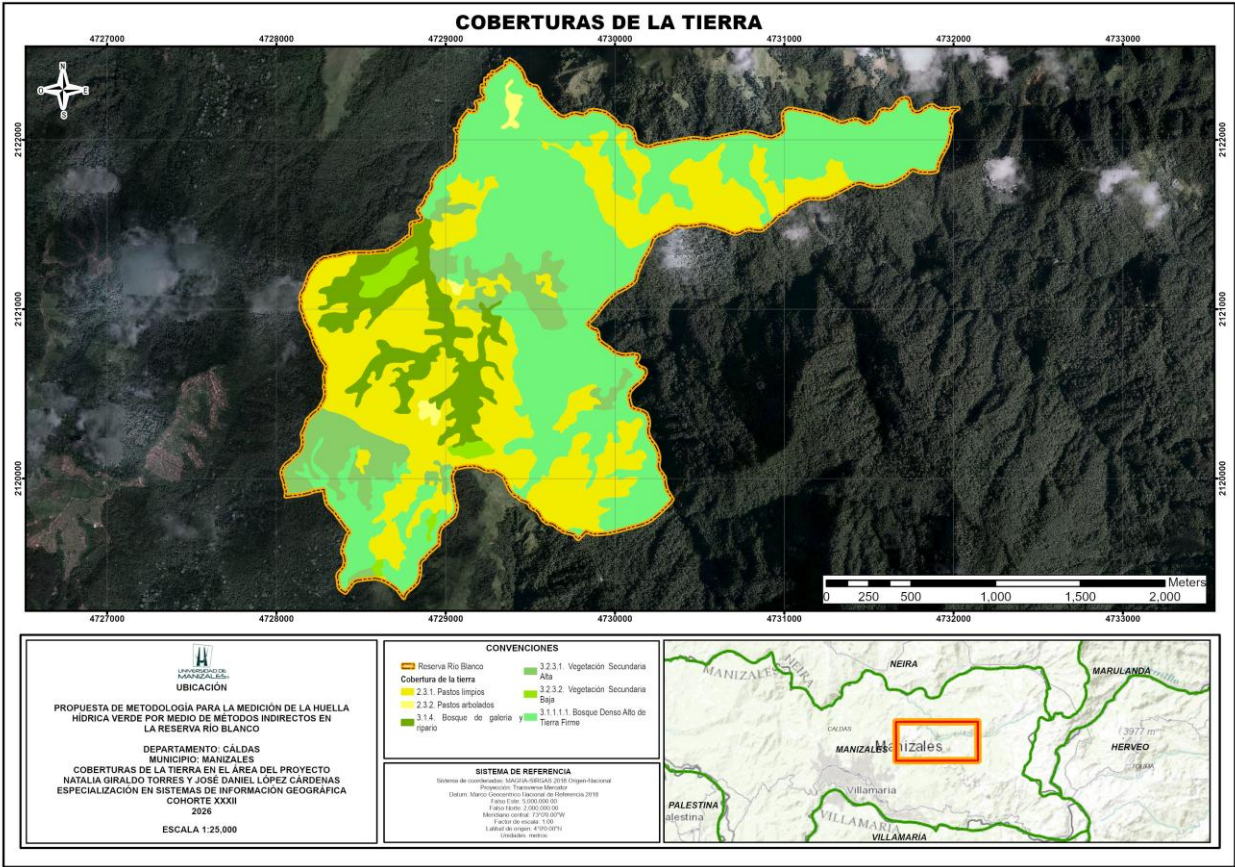
Tabla 4*Coberturas vegetales identificadas y pesos asignados*

CLASIFICACIÓN	Peso	Interpretación	Total
Bosque de galería y/o ripario	1	Son ecosistemas estratégicos en regulación hídrica y recarga de acuíferos. Falkenmark & Rockström (2006) destacan que los bosques ribereños maximizan el uso de agua verde y protegen la calidad del agua.	42,65074
Bosque denso alto de tierra firme	0,9	Alta capacidad de retención de humedad y evapotranspiración. Hoekstra et al. (2011) señalan que los bosques densos son clave en el ciclo del agua verde.	238,605962
Pastos arbolados	0,7	La presencia de árboles mejora la infiltración y retención de agua frente a pastos limpios. Varouchakis et al. (2025) muestran que sistemas mixtos (agroforestales) aumentan resiliencia hídrica.	3,622479
Pastos limpios	0,5	Menor capacidad de retención de agua verde, alta evapotranspiración y mayor vulnerabilidad a sequía. FAO (2016) indica que los pastos contribuyen, pero con eficiencia moderada.	176,617383
Vegetación secundaria alta	0,8	Cobertura en regeneración con buena capacidad de retención hídrica, aunque menor que bosques maduros. Estudios de sucesión ecológica (Xu, 2006) muestran que vegetación secundaria recupera progresivamente la función hídrica.	42,77025

CLASIFICACIÓN	Peso	Interpretación	Total
Vegetación secundaria baja	0,6	Etapa temprana de regeneración, menor densidad y menor capacidad de retención de agua verde. Aporta, pero con menor peso que la vegetación secundaria alta.	7,486481
Total general			511,753295

Nota. Elaboración propia

Figura 4
Mapa de coberturas



Nota. Elaboración propia

6.6 Comportamiento de la Precipitación Anual

Se recopiló datos multianuales de precipitación de estaciones meteorológicas ubicadas a máximo 50 km del área de estudio. Se aplicó Universal Kriging, obteniendo un modelo con buen ajuste (RMSE = 349 mm; Standardized RMSE = 0.86). El raster resultante se reclasificó en cuatro categorías y se convirtió a polígono, asignando pesos entre 0 y 1 según la disponibilidad hídrica.

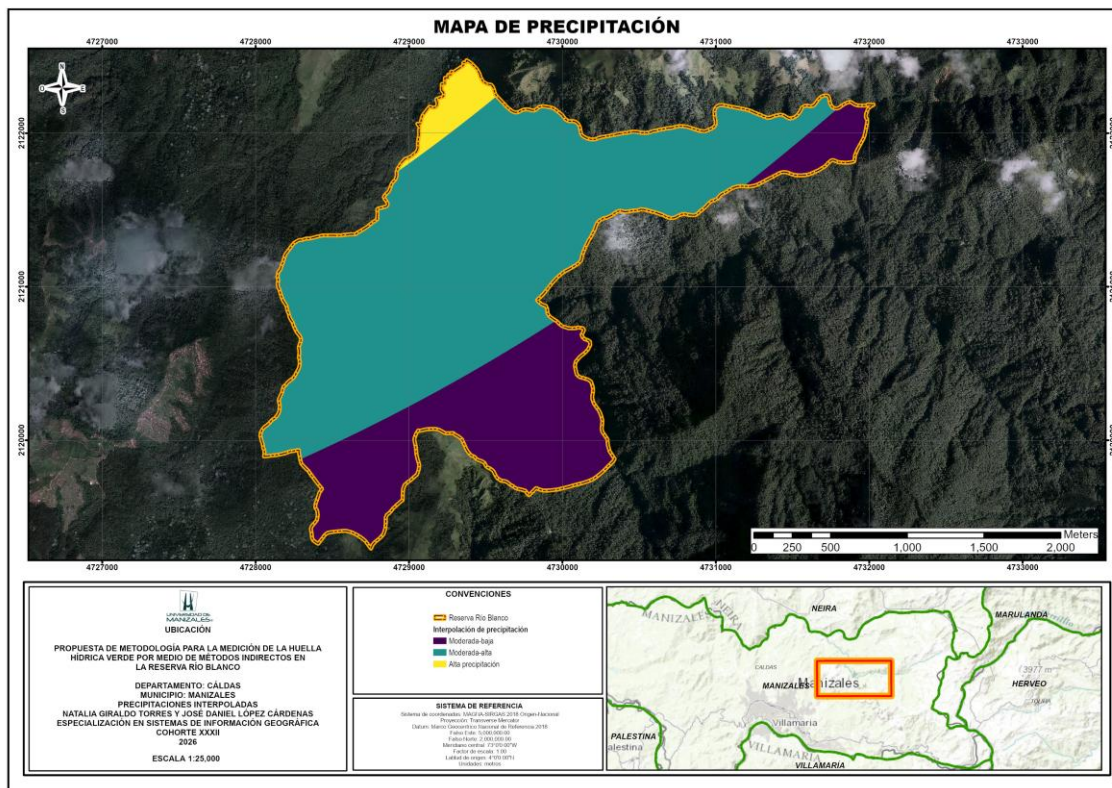
Los rangos de precipitación y su respectiva ponderación se presentan en la **Tabla 5**, mientras que la distribución espacial del modelo interpolado se muestra en la

Tabla 5

Rango de precipitación anual y pesos asignados

Rango Precipitación	Interpretación	Peso	Área en HA
1851 - 1898	Alta precipitación	1	14,483438
1801 - 1850	Moderada-alta	0,75	353,073427
1761 - 1800	Moderada-baja	0,5	144,196413
Total general			511,753295

Nota. Elaboración propia

Figura 5*Mapa de precipitación interpolada por Universal Kriging**Nota.* Elaboración propia

6.7 Índice de Huella Hídrica Verde (HHV) y Distribución Espacial

Se realizó un cruce espacial entre las tres capas ponderadas (NDMI, coberturas y precipitación), mediante una multiplicación directa de los pesos, obteniendo el índice de Huella Hídrica Verde (HHV). Los valores resultantes oscilaron entre 0,025 y 0,9, y fueron reclasificados en cinco categorías: muy baja, baja, moderada, alta y muy alta huella hídrica verde.

La clasificación de estos rangos y su correspondiente interpretación se presentan en la **Tabla 6**, la cual resume la distribución del índice en el área de estudio.

Tabla 6*Resultados finales de la zonificación de Huella Hídrica Verde*

Rango_HHV	Interpretación	Total
0.025 - 0.10	Muy baja huella hídrica verde	46,106942
0.101 - 0.20	Baja Huella hídrica verde	161,576864

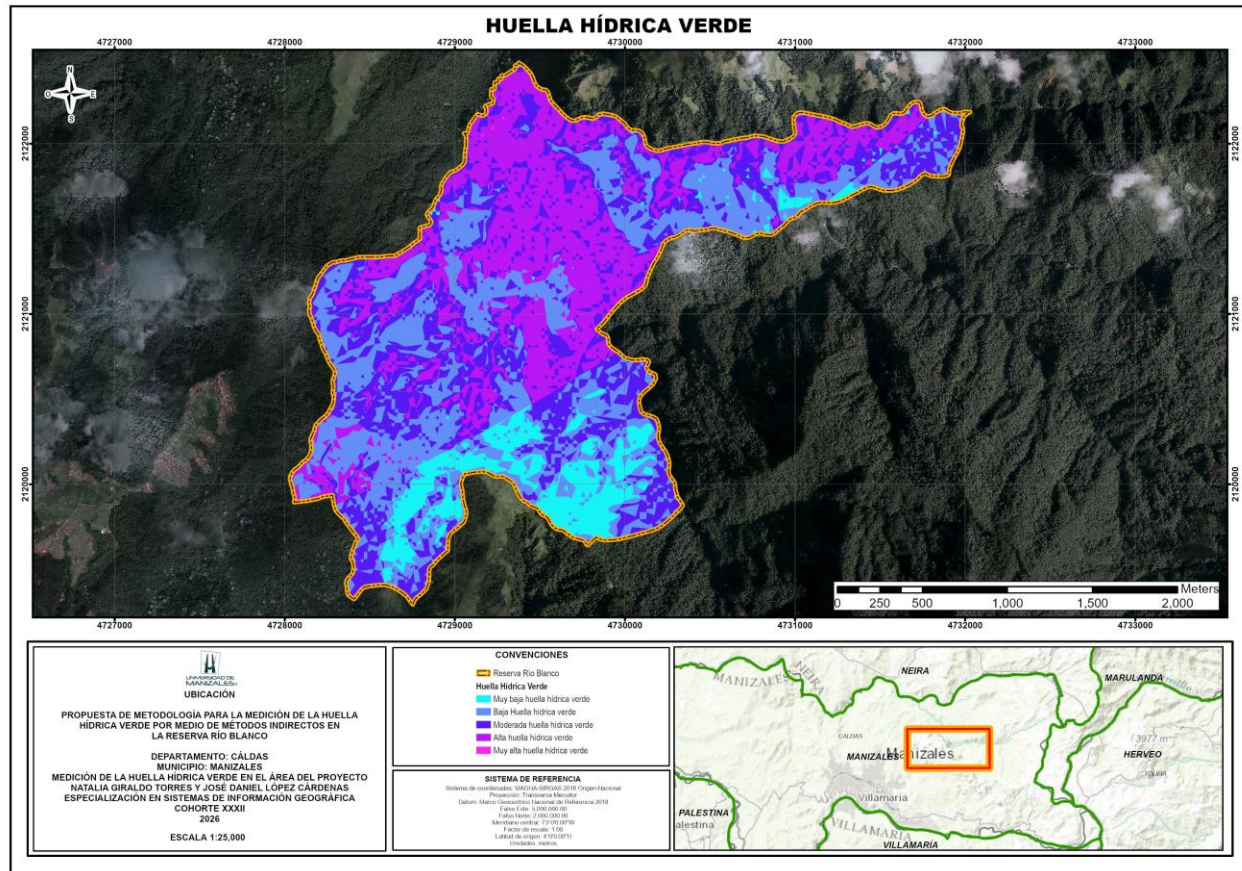
0.201 - 0.35	Moderada huella hídrica verde	159,217081
0.351 - 0.55	Alta huella hídrica verde	144,770161
0.551 - 0.9	Muy alta huella hídrica verde	0,082242
Total general		511,75329

Nota. Elaboración propia

6.8 Distribución Espacial De La HHV

Los resultados muestran que las zonas con muy alta Huella Hídrica Verde (HHV) se concentran en áreas de bosque denso y vegetación secundaria alta, donde se presentan condiciones favorables de humedad y precipitación. En contraste, las zonas con baja HHV corresponden a coberturas de pastos limpios, asociadas a menores niveles de disponibilidad hídrica.

Esta distribución evidencia la relación entre las características de la cobertura vegetal y la oferta de agua en el territorio, constituyéndose en un elemento clave para la conservación hídrica y la planificación ambiental, tal como se presenta en la **Figura 6**.

Figura 6*Mapa de zonificación por categorías de HHV**Nota.* Elaboración propia

7 Discusión

La estimación de la huella hídrica verde en la Reserva Forestal Río Blanco constituye un aporte metodológico relevante, dado que en Colombia aún existe una limitada disponibilidad de estudios aplicados en ecosistemas estratégicos de conservación. La revisión bibliográfica evidenció que la mayoría de las investigaciones sobre huella hídrica verde se han centrado en sistemas agrícolas (café, arroz, maíz), mientras que los bosques de niebla y reservas hídricas urbanas han sido poco abordados (IDEAM, 2015; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015). Esta ausencia de información específica generaba un vacío crítico para la planificación ambiental y la toma de decisiones en el contexto local.

Los resultados obtenidos demuestran que la integración de métodos indirectos —como la interpolación de datos climáticos, el análisis de coberturas vegetales y el uso de índices espectrales— es una alternativa válida y replicable para estimar la huella hídrica verde en territorios donde no se dispone de mediciones directas del suelo. Este enfoque ha sido respaldado por estudios internacionales que destacan la pertinencia de los métodos indirectos en la gestión hídrica (Hoekstra & Chapagain, 2007; UNESCO-IHE & Water Footprint Network, 2011; Salama, 2012; Wang, Li & Zhang, 2023). En el caso de Río Blanco, la metodología permitió generar cartografía temática que identifica zonas de alta y baja disponibilidad de agua verde, lo cual constituye un insumo técnico para entidades como Aguas de Manizales S.A.E.S.P-BIC y Corpocaldas.

Un aspecto relevante es que la distribución espacial de la HHV refleja la estrecha relación entre precipitación, cobertura vegetal y humedad relativa. Las áreas de bosque denso y vegetación secundaria alta mostraron valores de HHV muy altos, confirmando que la conservación de coberturas forestales es, en esencia, gestión del agua verde (Aldaya, Allan & Hoekstra, 2010; Zhang, Chen & Wu, 2020). En contraste, los pastos limpios y zonas con baja humedad NDMI presentaron valores bajos, lo que evidencia la vulnerabilidad de estas áreas frente a procesos de degradación y pérdida de capacidad hídrica.

La discusión también permite resaltar las limitaciones del estudio. En primer lugar, la resolución espacial de los datos satelitales y la disponibilidad de estaciones meteorológicas condicionan la precisión de los resultados. Aunque el modelo de kriging mostró un ajuste robusto ($RMSE = 349$ mm), la densidad de estaciones en la región sigue siendo insuficiente para capturar toda la variabilidad climática local (Hengl, 2009). En segundo lugar, la asignación de pesos a las coberturas y al NDMI se basó en criterios bibliográficos y técnicos, pero podría enriquecerse mediante validaciones de campo y mediciones directas de humedad del suelo.

Finalmente, este trabajo confirma que la huella hídrica verde no es únicamente un indicador biofísico, sino también un instrumento de gobernanza ambiental. La posibilidad de espacializarla en mapas facilita la comprensión de la relación entre ecosistemas y disponibilidad hídrica, fortaleciendo la toma de decisiones estratégicas en torno a la conservación y el abastecimiento de agua para la ciudad de Manizales (Vanham, Hoekstra & Bidoglio, 2013; FINDETER, 2014). En este sentido, la propuesta metodológica constituye un primer paso hacia la consolidación de estudios aplicados en reservas forestales, abriendo la posibilidad de replicar el modelo en otros ecosistemas de la región andina.

8 Conclusiones

La presente investigación permitió consolidar una propuesta metodológica integral y técnicamente robusta para la cuantificación de la huella hídrica verde en la Reserva Forestal Río Blanco. A través de la exitosa convergencia de herramientas de geoinformación, modelos geoestadísticos y análisis de teledetección, se logró transformar variables biofísicas complejas en indicadores espaciales de alta precisión. Este proceso no solo permitió superar las limitaciones críticas de información base y asincronía de datos identificadas inicialmente, sino que materializó una herramienta de soporte a la decisión que valida la importancia estratégica de la reserva en la regulación hídrica regional, cumpliendo así con los objetivos propuestos y aportando un precedente metodológico replicable para ecosistemas de alta montaña en Colombia.

La investigación permitió demostrar que la Reserva Forestal Río Blanco es un ecosistema estratégico para la regulación hídrica de la ciudad de Manizales, aportando cerca del 35% del agua potable consumida por la población. Ante la ausencia de metodologías específicas para cuantificar la huella hídrica verde en este tipo de territorios, se diseñó y aplicó un modelo indirecto que integró datos hidrometeorológicos, coberturas vegetales y análisis espectrales. Este enfoque respondió

directamente al vacío identificado en el planteamiento del problema y confirmó la hipótesis de que es posible estimar la huella hídrica verde mediante métodos indirectos confiables y replicables.

Los resultados evidenciaron que la huella hídrica verde se distribuye de manera heterogénea en la reserva. Las áreas de bosque denso y vegetación secundaria alta presentaron valores muy altos, lo que confirma que la conservación de coberturas forestales es esencial para garantizar la disponibilidad de agua verde. En contraste, los pastos limpios y zonas degradadas mostraron valores bajos, reflejando su limitada capacidad de regulación hídrica. Estos hallazgos corroboran la hipótesis de que la estructura y calidad de la cobertura vegetal condicionan la capacidad del territorio para sostener el recurso hídrico.

La disponibilidad de información espacializada sobre la huella hídrica verde representa un beneficio estratégico para Aguas de Manizales S.A.E.S.P-BIC, ya que le permite comprender con mayor precisión la capacidad real de la Reserva Río Blanco para sostener el abastecimiento de agua potable de la ciudad. Contar con esta herramienta facilita la planificación de cultivos y actividades ganaderas en áreas aledañas, evitando presiones sobre zonas de alta importancia hídrica y priorizando aquellas con menor aporte de agua verde. Asimismo, la empresa puede utilizar estos resultados para fortalecer sus programas de conservación y restauración, garantizando la sostenibilidad del recurso hídrico frente al crecimiento urbano y el cambio climático. En términos de gobernanza, disponer de un modelo replicable de huella hídrica verde le otorga a la entidad un insumo técnico para justificar decisiones de inversión, orientar políticas de uso del suelo y mejorar la comunicación con la comunidad sobre la importancia de conservar los ecosistemas que aseguran el suministro de agua a Manizales.

La interpolación de precipitación mediante Universal Kriging permitió obtener un modelo robusto y validado, con indicadores estadísticos que respaldan su confiabilidad. Este resultado confirma la hipótesis de que la integración de datos climáticos interpolados es suficiente para

representar la variabilidad espacial de la precipitación en la reserva, incluso en un contexto de limitada densidad de estaciones meteorológicas.

Finalmente, se logró generar cartografía temática de la huella hídrica verde, que constituye un insumo estratégico para la planificación ambiental y la gestión del recurso hídrico. Esta información puede ser utilizada por entidades como Aguas de Manizales S.A.E.S.P-BIC y Corpocaldas para priorizar zonas de conservación y restauración, fortaleciendo la gobernanza ambiental y aportando a la sostenibilidad ecológica y social de la región andina. De esta manera, la investigación no solo confirma las hipótesis planteadas, sino que también abre la posibilidad de replicar la metodología en otros ecosistemas estratégicos del país, contribuyendo a cerrar el vacío existente en torno a la medición de la huella hídrica verde en Colombia.

9 Recomendaciones

- **Fortalecer la gestión hídrica de la Reserva Río Blanco.** Se recomienda que Aguas de Manizales S.A.E.S.P-BIC incorpore la metodología de huella hídrica verde en sus procesos de planificación y conservación. La información obtenida permite identificar las zonas de mayor aporte hídrico y priorizar acciones de restauración en áreas críticas, garantizando la sostenibilidad del abastecimiento de agua potable para la ciudad. Además, esta herramienta puede servir para regular actividades productivas como la agricultura y la ganadería en áreas aledañas, evitando presiones sobre los ecosistemas de mayor importancia hídrica.
- **Consolidar la metodología como herramienta estratégica de planificación.** La propuesta metodológica puede ser utilizada como insumo técnico en la toma de decisiones de entidades ambientales y de ordenamiento territorial. Incorporar la cartografía temática de la huella hídrica verde en planes de manejo y ordenamiento

permitirá delimitar áreas de protección, orientar el uso del suelo y diseñar estrategias de restauración ecológica que aseguren la resiliencia de los ecosistemas frente al cambio climático.

- **Validar y enriquecer el modelo con mediciones directas.** Se recomienda avanzar hacia la validación de la metodología mediante mediciones de campo, como monitoreo de humedad del suelo y evapotranspiración. Esto permitirá ajustar los pesos asignados a las coberturas y al índice NDMI, aumentando la precisión del modelo y reduciendo la incertidumbre en la estimación de la huella hídrica verde.
- **Replicar y adaptar la metodología en otros ecosistemas estratégicos.** La metodología desarrollada puede ser replicada en otros ecosistemas de la región andina, como páramos y bosques altoandinos, lo que contribuirá a cerrar el vacío existente en torno a la medición de la huella hídrica verde en Colombia. Su aplicación en diferentes contextos permitirá comparar resultados y generar una base de conocimiento más amplia para la gestión hídrica nacional.
- **Explorar nuevas líneas de investigación relacionadas.** Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en la relación entre la huella hídrica verde y la seguridad alimentaria, evaluando cómo la disponibilidad de agua verde influye en la sostenibilidad de cultivos y sistemas ganaderos. Asimismo, se sugiere estudiar el impacto de la huella hídrica verde en la resiliencia urbana frente al cambio climático, integrando este indicador en la planificación territorial y en la gestión de riesgos. Otra línea de investigación relevante sería la automatización del modelo mediante herramientas de programación (Python, R), lo que facilitaría su replicabilidad y trazabilidad en distintos contextos ambientales.

10 Referencias

- Acebedo, L. F., & Arenas, F. (2024). Tierras de protección y expansión urbana.
- Ahmed, Elhassan, & Osman. (2025). Machine learning for water footprint.
- Aldaya, M. M., Allan, J. A., & Hoekstra, A. Y. (2010). Strategic importance of green water in international trade. *Ecological Economics*, 69(4), 887–894.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.001>
- Chen, L., Li, X., & Wu, J. (2020). Evapotranspiration estimation in urban green spaces using satellite imagery.
- Corporación Autónoma Regional De Caldas (CORPOCALDAS). (2017). Plan De Gestión Ambiental Regional (PGAR) 2007–2019. <https://corpocaldas.gov.co/>
- Duque Escobar, G. (2018). Huella hídrica en Colombia y gestión del riesgo. Universidad Nacional de Colombia.
https://www.researchgate.net/publication/370625345_CAMBIO_CLIMATICO_EN_COLOMBIA
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management.
<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%282006%29132%3A3%28129%29>
- Financiera de Desarrollo Territorial (FINDETER). (2014). Informe sobre la incorporación de la huella hídrica en la planeación territorial. Financiera de Desarrollo Territorial.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2016). Coping with water scarcity: An action framework for agriculture and food security.
<https://www.fao.org/3/i3015e/i3015e.pdf>

- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press.
<https://global.oup.com/academic/product/geostatistics-for-natural-resources-evaluation-9780195115383>
- Hengl, T. (2009). *A practical guide to geostatistical mapping*. University of Amsterdam.
<https://spatial-analyst.net/book/>
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption patterns. *Water Footprint Network*.
<https://waterfootprint.org/media/downloads/Report16Vol1.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2015). *Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia*.
- Jiménez Quintero, J. D. (2021). *Gestión de la innovación para la competitividad*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Guía técnica para la cuantificación de la huella hídrica en Colombia*.
- Muñoz, E. (2016). *Evaluación de la huella hídrica en Nariño*.
- Pérez, M. (2019). *Servicios ecosistémicos en Manizales*.
- Salama, M. S. (2012). Remote sensing-based estimation of green and blue water footprints. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(9), 3237–3247.
- Silva-Olaya, A. M., León, J. J., & Villamarín, S. (2020). *Green water footprint in Andean crops*.
- Springer, C. (2025). *Estimating green water footprint in rainfed wheat using NDMI and AquaCrop*.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)-IHE Institute for Water Education & Water Footprint Network. (2011). *The water footprint assessment*

- manual: Setting the global standard. Earthscan.
https://waterfootprint.org/media/downloads/TheWaterFootprintAssessmentManual_2.pdf
- Valencia, J. (2005). Conflictos socioambientales en la Reserva Río Blanco.
- Vanham, D., Hoekstra, A. Y., & Bidoglio, G. (2013). Potential water saving through changes in European diets. *Environment International*, 61, 45–52.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.09.011>
- Wang, H., Li, Y., & Zhang, X. (2023). Large-scale assessment of green water footprint in maize production using indirect methods. *Agricultural Systems*, 205, 103–118.
- Zhang, X., Chen, Y., & Wu, Z. (2020). Spatial variability of green water footprint in subtropical forests. *Forest Ecology and Management*, 472, 118–126.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118126>

11 Anexos

Se adjuntan cinco anexos, los cuales son mapas en tamaño pliego, en formato PDF, que representan de una manera más específica los resultados de la investigación. Estos son los siguientes:

- Plano_Coberturas.pdf
- Plano_HHV.pdf
- Plano_NDMI.pdf
- Plano_Precipitacion.pdf
- Plano_Ubicacion.pdf