DETERMINACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LOS PATRONES HIDROLÓGICOS A CAUSA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN EL PNR PAN DE AZUCAR EL CONSUELO UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

INGRID YOLIMA MANOSALVA CELY

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2026

DETERMINACIÓN DE LA MODIFICACIÓN DE LOS PATRONES HIDROLÓGICOS A CAUSA DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN EL PÁRAMO PAN DE AZUCAR EL CONSUELO UBICADO EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACÁ

INGRID YOLIMA MANOSALVA CELY

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Magister en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Asesor
CAMILO ANDRÉS VARGAS TERRANOVA
PhD en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ
2026

USANTOTOMAS.EDU.CO
santotocolombia
ACREDITACIÓN INSTITUCIONAL MULTICAMPUS
DE ALTA CALIDAD POR 6 AÑOS
NIT.: 860.012.357-6
Carrera 9 # 51 - 11
PBX.: +57 (601) 5878797

Tabla de Contenido

Resumen 9

Abstract 10

Glosario 12

Introducción 14

Objetivos 16

Planteamiento del Problema 17

Justificación 19

1. Marcos Referenciales 20

1.1. Marco Antecedentes 20

1.2. Marco Legal 22

1.3. Marco Contextual 24

1.3.1. Geología 24

1.3.3. Suelos 28

1.3.4. Cobertura de la Tierra 31

1.3.5. Conflictos de Uso del Suelo 32

1.3.6. Clima 33

1.3.7. *Hidrología* 34

1.3.8. *Hidrogeología* 38

1.3.9. Perfil Socioeconómico y Cultural 39

1.4. Marco Teórico 41

1.4.1. Uso del suelo 41

1.4.2. Ciclo Hidrológico 42

1.4.3. Patrones hidrológicos 43

1.4.4. Páramos y sus características hidrológicas 44

1.4.5. Alteraciones del balance hídrico y patrones hidrológicos en páramos 45

1.4.6. Impacto del Cambio Climático y el Uso del Suelo en la Hidrología 45

1.4.7. Cambio climático y Escenarios Prospectivos 47

1.4.8. Modelación hidrológica 48

1.4.9. Validación de modelos 48

1.4.10. Datos Satelitales y su Aplicación en Modelación Hidrológica 49
1.4.11. Ventajas y Limitaciones de los Datos Satelitales 49
1.4.12. Aplicación de Datos Satelitales en Ecosistemas Estratégicos como los Páramos . 50
1.4.13. Balance Hídrico en Ecosistemas de Alta Montaña 50
1.4.14. Gestión hídrica y Ordenamiento territorial 51
2. Método de Investigación 51
2.1. Adquisición, sistematización y análisis de datos hidroclimáticos 52
2.2. Análisis multitemporal del uso y cobertura del suelo: 53
2.3. Simulación hidrológica con GR2M y SWAT bajo escenarios de cambio climático y uso del suelo 53
2.4. Análisis de resultados 55
3. Análisis de las series temporales de temperatura y precipitación en el PNR Pan de Azúcar El Consuelo 56
3.1. Precipitación Media Mensual Multianual 60
3.2. Análisis de Consistencia – Curva de Doble Masa 65
3.3. Análisis de anomalías de Precipitación 66
3.4. Variabilidad Climática y Fenómenos ENSO PPT 68
3.5. Análisis Variable Temperatura 71
3.6. Análisis de Coherencia 75
3.7. Análisis Variable Evapotranspiración 79
3.8. Balance Hídrico 80
4. Transformación de Uso del Suelo 82
4.1. Contexto regional y local 83
4.2. Procesos de transformación identificados 84
5. Modelación Hidrológica 90
5.1. Modelación Hidrológica con SWAT 90
5.1.1. Calibración, Validación y Evaluación del Desempeño del Modelo SWAT 90
5.1.2. Información Suelos 92
5.1.3. Escenarios de simulación 93
5.1.4. Resultados Escenarios de Simulación 93
5.1.5. Resultados espaciales de la modelación 102
5.2. Modelación Hidrológica con GR2M 119

5.2.1. Resultados Simulación Hidrológica GR2M 119
6. Recomendaciones para la Conservación y Restauración del Ecosistema de Páramo 125
7. Síntesis de Resultados 128
8. Conclusiones 131
Referencias Bibliográficas 133
Anexos 137
Anexo A. Geología Estructural y Geomorfología del Área de Estudio 137
1. Geología Estructural 137
2. Geomorfología 138
Anexo B. Unidades Cartográficas de Suelos 139
Anexo C. Metodología Procesamiento Datos Hidroclimáticos 140
1. Fuentes de información 140
2. Control de calidad y procesamiento de datos climáticos 141
3. Análisis de variabilidad climática 150
Anexo D. Metodología Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo 164
Anexo E. Metodología Modelación Hidrológica 165
1. Información Climática 165
2. Descripción del Modelo GR2M 166
3. Configuración del Modelo GR2M 168
4. Ajuste y evaluación del modelo GR2M mediante Qproxy 169
5. Descripción Modelo SWAT 170
6. Delimitación de la Cuenca 172

Lista de Tablas

Tabla 1. Síntesis de investigaciones hidrológicas aplicadas a ecosistemas de páramo 20
Tabla 2. Normativa Nacional e Internacional aplicable al PNR Pan de Azúcar – El Consuelo ... 22
Tabla 3. Coberturas de la Tierra PNR Pan de Azúcar El Consuelo 31
Tabla 4. Subcuencas Hidrográficas PNR Pan de Azúcar El Consuelo 37
Tabla 5. Estaciones Meteorológicas Empleadas – Variable Precipitación 57
Tabla 6. Fenómenos ENSO y Anomalías PNR Pan de Azúcar El Consuelo 69
Tabla 7. Estaciones Meteorológicas Empleadas – Variable Temperatura 71

Tabla 8. Balance Hídrico PNR Pan de Azúcar El Consuelo 81
Tabla 9. Porcentaje de Coberturas Multitemporales del Suelo 86
Tabla 10. Coberturas Multitemporales del Suelo Hectáreas 87
Tabla 11. Parámetros Hidrológicos Modelación SWAT 91
Tabla 12. Parametrización de Atributos SWAT 92
Tabla 13. Categorías Coberturas SWAT 93
Tabla 14. Comportamiento Hidrológico PNR Pan de Azúcar El Consuelo 94
Tabla 15. Balance Hídrico Anual bajo RCP 2.6 96
Tabla 16. Balance Hídrico Anual bajo RCP 8.5 97
Tabla 17. Balance hídrico Anual Bajo Escenario Combinado 99
Tabla 18. Balance Hídrico Promedio Anual por Escenario (mm/año) 101
Tabla 19. Unidades Cartográficas de Suelos PNR Pan de Azúcar El Consuelo 139
Tabla 20. Análisis Outliers Estaciones Temperatura Mínima 146
Tabla 21. Análisis Outliers Estaciones Temperatura Máxima 147
Tabla 22. Análisis Outliers Estaciones Precipitación 147
Tabla 23. Temperaturas Máximas Medias Anuales 156
Tabla 24. Temperaturas Mínimas Medias Anuales 159
Tabla 25. Evapotranspiración PNR Pan de Azúcar El Consuelo 163
Tabla 26. Indicadores de validación del modelo GR2M frente al Qproxy. 169

Lista de Figuras

Figura 1. Ubicación PNR Pan de Azúcar El Consuelo 24
Figura 2. Geología PNR Pan de Azúcar El Consuelo 25
Figura 3. Unidades Cartográficas de Suelos PNR Pan de Azúcar El Consuelo 29
Figura 4. Coberturas de la Tierra PNR Pan de Azúcar El Consuelo 31
Figura 5. Conflictos de Uso del Suelo PNR Pan de Azúcar El Consuelo 32
Figura 6. Humedales PNR Pan de Azúcar El Consuelo 36
Figura 7. Subcuencas Hidrográficas PNR Pan de Azúcar El Consuelo 37
Figura 8. Hidrogeología PNR Pan de Azúcar El Consuelo 38
Figura 9. Diseño Metodológico 52
Figura 10. Distribución Espacial Estaciones Meteorológicas Empleadas 59
Figura 11. Precipitación Mensual Multianual – Área de Influencia 60

Figura 12. Estaciones Régimen Monomodal 61
Figura 13. Hietograma promedio mensual de precipitación multianual en el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo. 63
Figura 14. Serie temporal de la precipitación promedio anual multianual acumulada en el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo (1984–2024). 64
Figura 15. Curva de Doble Masa para Análisis de Consistencia Pluviométrica 66
Figura 16. Anomalías Precipitación 1984-2024 66
Figura 17. Anomalías Estandarizadas Eventos ENSO PNR Pan de Azúcar El Consuelo 69
Figura 18. Evolución Temperatura Máxima Media Anual 73
Figura 19. Evolución Temperatura Mínima Media Anual 73
Figura 20. Media Anual Temperatura Máxima 76
Figura 21. Media Anual Temperatura Mínima 76
Figura 22. Correlación entre temperatura Media y Altitud 78
Figura 23. Precipitación vs Evapotranspiración (ETR) PNR Pan de Azúcar El Consuelo 81
Figura 24. Balance Hídrico PNR Pan de Azúcar El Consuelo 81
Figura 25. Coberturas del Suelo PNR Pan De Azúcar El Consuelo 1984-1994-2004-2014-2018-2024 86
Figura 26. Hidrograma Mensual Promedio 1984-2024 94
Figura 27. Balance Hídrico Comparativo Histórico vs RCP 2.6 97
Figura 28. Balance Hídrico Comparativo Histórico vs RCP 8.5 98
Figura 29. Balance Hídrico Comparativo Histórico vs Escenario Combinado 99
Figura 30. Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario Histórico 1984-2024 103
Figura 31. Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario RCP 2.6 105
Figura 32. Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario RCP 8.5 107
Figura 33. Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario combinado (Uso del Suelo + RCP8.5) 108
Figura 34. Caudal Base (Qbase) Escenario Histórico 1984-2024 109
Figura 35. Caudal Base (Qbase) Escenario RCP 2.6 111
Figura 36. Caudal Base (Qbase) Escenario RCP 8.5 112
Figura 37. Caudal Base (Qbase) Escenario Combinado (Uso del Suelo+ RCP 8.5) 113
Figura 38. Evapotranspiración Real Escenario Histórico 1984-2024 114
Figura 39. Evapotranspiración Real Escenario RCP 2.6 116

Figura 40. Evapotranspiración Real Escenario RCP 8.5 117
Figura 41. Evapotranspiración Real Escenario Combinado (Uso del Suelo + RCP 8.5) 118
Figura 42. Hidrograma 1984–1994. 120
Figura 43. Hidrograma 1994-2004 121
Figura 44. Hidrograma 2004–2014. 121
Figura 45. Hidrograma 2014 - 2024 122
Figura 46. Hidrograma Escenario RCP 2.6 123
Figura 47. Hidrograma Escenario RCP 8.5 124
Figura 48. Hidrograma Escenario Combinado 124
Figura 49. Área de Influencia Análisis Hidroclimático PNR Pan de Azúcar – El Consuelo 142
Figura 50. Completitud Datos de Temperatura 143
Figura 51. Completitud Datos Precipitación 144
Figura 52. Completitud Datos Temperatura Depurada 145

Resumen

El estudio analizó la dinámica hidrológica del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo (Boyacá, Colombia) frente a los efectos combinados del cambio climático y la transformación del uso del suelo durante el periodo 1984–2024. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo y explicativo, integrando análisis hidroclimático, multitemporal y de modelación hidrológica con el fin de diagnosticar los patrones de oferta y regulación hídrica en el ecosistema de páramo.

Los resultados indicaron una precipitación media anual de 1468,47 mm, una evapotranspiración potencial anual de 850,1 mm y un balance hídrico positivo de 618 mm/año, valores que reflejan un régimen húmedo controlado por la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la estructura porosa de los suelos andisoles y turberas, responsables de la regulación hídrica del sistema. Las temperaturas mínimas mostraron un incremento sostenido de +0,4 °C por década, mientras que las máximas permanecieron relativamente estables, evidenciando un proceso de calentamiento nocturno y una reducción en la amplitud térmica diaria, coherente con los patrones descritos por el IPCC (2023) para ecosistemas de alta montaña.

El análisis multitemporal de coberturas mostró una pérdida de 5,3 % de bosque natural del área protegida y un incremento del mosaico agropecuario, indicando una fragmentación progresiva del paisaje y reducción de la conectividad ecohidrológica. En el componente de modelación, el modelo GR2M alcanzó un desempeño satisfactorio, reproduciendo con alta confiabilidad la respuesta hidrológica mensual simulada frente al caudal proxy. Por su parte, el modelo SWAT permitió la caracterización espacial de la generación de escorrentía, la recarga hídrica y los caudales base, mostrando una correspondencia espacial entre las zonas de alta recarga y las coberturas naturales de páramo y bosque altoandino, lo que validó la función del ecosistema como regulador ecohidrológico de la cuenca. Ambos modelos confirmaron una disminución del caudal base y una mayor variabilidad interanual, reflejando la pérdida progresiva de capacidad de almacenamiento y amortiguación hídrica del sistema.

En función de los hallazgos, se formularon recomendaciones técnicas de conservación y restauración ecohidrológica, orientadas al fortalecimiento de la funcionalidad hídrica, la implementación de monitoreo climático adaptativo y la gestión territorial basada en soluciones naturales. Estos lineamientos consolidan al área protegida como un laboratorio climático y

regulador hídrico estratégico para la cuenca media del río Chicamocha, esencial para la resiliencia ambiental y la seguridad hídrica regional frente a escenarios de calentamiento futuro.

Palabras clave: páramo, cambio climático, uso del suelo, modelación hidrológica, balance hídrico, regulación hídrica, GR2M.

Abstract

The study analyzed the hydrological dynamics of the Pan de Azúcar – El Consuelo Regional Natural Park (Boyacá, Colombia) in response to the combined effects of climate change and land-use transformation during the period 1984–2024. The research was conducted under a quantitative and explanatory approach, integrating hydroclimatic, multitemporal, and hydrological modeling analyses to diagnose patterns of water supply and regulation in the páramo ecosystem.

The results indicated a mean annual precipitation of 1,468.47 mm, an annual potential evapotranspiration of 850.1 mm, and a positive water balance of 618 $mm \cdot yr^{-1}$, values that characterize a humid regime controlled by the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) and the porous structure of andisol and peat soils, which are responsible for the system's hydrological regulation. Minimum temperatures exhibited a sustained increase of +0.4 °C per decade, while maximum temperatures remained relatively stable, evidencing a nocturnal warming trend and a reduction in diurnal temperature range, consistent with the patterns described by the IPCC (2023) for tropical mountain ecosystems.

The multitemporal land-cover analysis revealed a 5.3% loss of natural forest within the protected area and an increase in agro-pastoral mosaics, indicating progressive landscape fragmentation and a decline in ecohydrological connectivity. Regarding hydrological modeling, the GR2M model achieved satisfactory performance, reliably reproducing the monthly simulated discharge relative to the proxy flow. Meanwhile, the SWAT model enabled the spatial characterization of runoff generation, groundwater recharge, and baseflow, showing a spatial correspondence between high-recharge zones and the natural páramo and high Andean forest covers, thereby validating the ecosystem's role as an ecohydrological regulator within the basin. Both models confirmed a decrease in baseflow and greater interannual variability, reflecting a progressive loss of water storage and buffering capacity in the system.

Based on these findings, technical recommendations for ecohydrological conservation and restoration were formulated, aimed at strengthening hydrological functionality, implementing adaptive climate monitoring, and promoting nature-based territorial management strategies. These

guidelines consolidate the protected area as a climatic observatory and strategic hydrological regulator for the middle Chicamocha River basin, essential to regional environmental resilience and water security under future warming scenarios.

Keywords: páramo, climate change, land use, hydrological modeling, water balance, hydrological regulation, GR2M, SWAT.

Glosario

Andisoles: Suelos formados en materiales volcánicos, caracterizados por alta porosidad, buena retención de agua y elevada materia orgánica, comunes en ecosistemas de montaña. (IDEAM, 2010)

Cambio climático: Variación del clima atribuible directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global, sumada a la variabilidad natural observada en períodos comparables. (IPCC, 2023)

Cobertura vegetal: Superficie cubierta por vegetación natural o cultivada, que cumple funciones de protección del suelo, regulación hídrica y captura de carbono. (MADS, 2014)

Cuenca hidrográfica: Territorio delimitado por divisorias de aguas que drena hacia un punto común, constituyendo una unidad básica para la planificación del recurso hídrico. (IDEAM, 2017)

Demanda hídrica: Volumen de agua requerido por diferentes sectores —agrícola, doméstico, industrial o ambiental— en un periodo determinado. (MADS, 2014)

Disponibilidad hídrica: Relación entre la oferta natural de agua superficial o subterránea y las demandas del territorio en condiciones climáticas actuales. (IDEAM, 2017)

Erosión: Proceso de desprendimiento y transporte de partículas del suelo por acción del agua, el viento o la gravedad, acelerado por el cambio de uso del suelo. (FAO, 2015)

Escenarios SSP: Trayectorias socioeconómicas empleadas por el IPCC para analizar futuros posibles del cambio climático, combinando proyecciones de población, economía, uso del suelo y emisiones de gases de efecto invernadero. (IPCC, 2023)

Escorrentía: Flujo de agua superficial generado por exceso de precipitación que no se infiltra en el suelo, responsable del transporte de sedimentos. (WMO, 2018)

Evapotranspiración: Pérdida total de agua hacia la atmósfera por evaporación directa y transpiración de las plantas. (IDEAM, 2017)

GR2M: Modelo hidrológico conceptual mensual de dos parámetros que representa el balance hídrico entre precipitación y escorrentía. (Mouelhi et al., 2006)

Hidrograma: Gráfica que muestra la variación temporal del caudal en una sección de un río o quebrada. (WMO, 2018)

Modelo hidrológico: Representación matemática de los procesos del ciclo hidrológico para estimar el comportamiento del agua en una cuenca. (Singh & Frevert, 2010)

NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency): Índice estadístico que mide la precisión de un modelo hidrológico. Su valor varía entre -∞ y 1; cuanto más cercano a 1, mejor es el desempeño del modelo. Es uno de los indicadores más usados para evaluar simulaciones de caudal en modelos hidrológicos.

Oferta hídrica: Cantidad de agua disponible en una cuenca o sistema, determinada por la precipitación, escorrentía y almacenamiento superficial y subterráneo. (IDEAM, 2010)

Páramo: Ecosistema altoandino regulador del ciclo hidrológico, con suelos esponjosos y vegetación adaptada a bajas temperaturas. (Castaño-Uribe et al., 2018)

Patrones hidrológicos: Comportamientos característicos del ciclo del agua en una cuenca, determinados por la interacción entre la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía y el almacenamiento, que reflejan la respuesta hidrológica del territorio ante las condiciones climáticas y de uso del suelo. (IDEAM, 2017)

Precipitación: Agua que cae a la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo o nieve, medida en milímetros por unidad de tiempo. (WMO, 2018)

Recarga hídrica: Proceso mediante el cual el agua superficial se infiltra y alimenta los acuíferos subterráneos. (IDEAM, 2017)

Regulación hídrica: Capacidad natural de los ecosistemas, especialmente los de alta montaña, para retener y liberar agua de manera gradual. (Corpoboyacá, 2021)

SWAT: Modelo hidrológico semi-distribuido que simula los procesos de escorrentía, evapotranspiración y carga de sedimentos a escala de cuenca. (Arnold et al., 2012)

Temperatura: Magnitud que expresa el nivel de energía térmica del aire o del agua, influyendo directamente en la evapotranspiración y en los procesos biogeoquímicos. (IDEAM, 2017)

Uso del suelo: Forma en que la sociedad utiliza el territorio, incluyendo actividades agrícolas, urbanas o forestales, las cuales determinan la dinámica hidrológica. (PIGCCT Boyacá, 2022)

Introducción

El cambio climático y las transformaciones en el uso del suelo representan una de las principales amenazas para la estabilidad de los ecosistemas de alta montaña, particularmente los páramos andinos, cuya función como reguladores hidrológicos resulta esencial para la seguridad hídrica de millones de personas en la región tropical de los Andes. Estos ecosistemas, caracterizados por su alta capacidad de captación, almacenamiento y liberación gradual del agua, cumplen un papel determinante en la mitigación de la variabilidad climática, el control de erosión y la provisión de servicios ecosistémicos críticos. No obstante, en las últimas décadas, el aumento de las temperaturas, la variabilidad de la precipitación y la expansión agropecuaria han generado alteraciones en su estructura y funcionalidad hidrológica, con consecuencias directas sobre la resiliencia ecológica y la sostenibilidad de los recursos hídricos (IPCC, 2023; IDEAM, 2017).

En este contexto, el Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo, localizado en el departamento de Boyacá, se configura como un territorio estratégico para la conservación de los ecosistemas altoandinos y para el mantenimiento del equilibrio hidrológico de la cuenca media del río Chicamocha. Sin embargo, su integridad ecológica enfrenta presiones simultáneas derivadas de la variabilidad climática y del cambio de uso del suelo, manifestadas en la pérdida de cobertura boscosa, la fragmentación del paisaje y la alteración de la dinámica hídrica. Esta situación ha reducido progresivamente su capacidad de retención de humedad y su papel como fuente reguladora del recurso hídrico, afectando tanto los procesos naturales como las actividades productivas que dependen de su oferta de agua (Corpoboyacá, 2024; Daza Torres et al., 2014).

La relevancia de este estudio radica en la necesidad de comprender la interacción entre las variables climáticas y las transformaciones en el uso del suelo para establecer las bases de una gestión adaptativa del área protegida. A diferencia de los estudios previos, centrados principalmente en la descripción ecológica o en la cartografía de coberturas, esta investigación adopta un enfoque que vincula el análisis hidroclimático, la teledetección satelital y la modelación hidrológica, mediante la aplicación del modelo conceptual lluvia–escorrentía GR2M y del modelo hidrológico distribuido SWAT, implementado a través de su plataforma computacional, como herramientas complementarias para diagnosticar la respuesta del ecosistema frente a las presiones combinadas de origen antrópico y climático.

El uso de modelos hidrológicos conceptuales y distribuidos permite no solo estimar los componentes del balance hídrico y los flujos superficiales, sino también proyectar escenarios de

alteración y vulnerabilidad del sistema hídrico ante el calentamiento global. De esta forma, la investigación contribuye al fortalecimiento del conocimiento científico sobre la dinámica hidrológica de los páramos, y aporta información técnica útil para la toma de decisiones ambientales, la planificación territorial y la implementación de estrategias de conservación y restauración sustentadas en evidencia cuantitativa.

Así, la presente investigación busca no solo caracterizar las variaciones hidrológicas del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, sino también resaltar su papel como laboratorio natural para el monitoreo del cambio climático, ofreciendo una base científica sólida para el diseño de acciones de adaptación, restauración funcional y gestión sostenible del recurso hídrico en los ecosistemas de alta montaña del altiplano boyacense.

Objetivos

Objetivo General

Determinar la modificación de los patrones hidrológicos en el PNR Pan de Azúcar El Consuelo, ubicado en el Departamento de Boyacá, a causa del cambio climático y los cambios de uso del suelo.

Objetivos Específicos

- Analizar series temporales de datos climáticos como temperatura y precipitación, para identificar tendencias y anomalías, y comparar esta información con escenarios de clima futuro en el área de estudio para identificar cambios y tendencias.
- Clasificar y cuantificar los tipos de uso del suelo, así como realizar un análisis multitemporal de imágenes satelitales y cartografía para identificar cambios en los usos del mismo.
- Emplear modelos hidrológicos que integren variables climáticas y/o uso del suelo para determinar la modificación de los patrones objeto de estudio en el páramo Pan de Azúcar El Consuelo.
- Formular recomendaciones para la conservación y restauración del ecosistema de páramo en función de los resultados obtenidos.

Planteamiento del Problema

Colombia alberga aproximadamente el 50 % de los páramos del mundo, los cuales son fundamentales para la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y el abastecimiento de agua potable a más de 70 % de la población del país (IDEAM, 2015; Buytaert et al., 2006). En las últimas décadas, estos ecosistemas estratégicos han sido severamente impactados por el cambio climático y las actividades antrópicas, como la expansión agropecuaria, el sobrepastoreo y la urbanización desordenada, lo cual ha desencadenado alteraciones en los patrones de escorrentía, flujo base, recarga hídrica, infiltración y retención de humedad (Vuille et al., 2003; Buytaert et al., 2014).

A nivel nacional, se proyecta un incremento de la temperatura promedio entre 3 °C y 4 °C para el año 2100 bajo escenarios RCP 8.5 (Trayectorias Representativas de Concentración; representa un futuro de altas emisiones de gases efecto invernadero), y una posible disminución de las precipitaciones en zonas altoandinas (IDEAM et al., 2015). Estas condiciones aumentan la vulnerabilidad hídrica de los ecosistemas de páramo, cuya dinámica hidrológica es particularmente sensible a pequeñas variaciones térmicas. En el complejo de páramos Chilí-Barragán, ubicado entre los departamentos de Quindío, Tolima y Valle del Cauca, Colombia, por ejemplo, se estima una pérdida de más del 96 % del páramo pluvial subalpino bajo escenarios futuros, asociada a cambios en las condiciones climáticas, particularmente al incremento de la temperatura y a las variaciones en la precipitación, que inducen transformaciones en la distribución altitudinal del ecosistema. (Moreno et al., 2022).

Por su parte, el PNR Pan de Azúcar El Consuelo, que forma parte del complejo Guantiva-La Rusia ubicado en jurisdicción de los municipios boyacenses de Belén, Tutazá, Santa Rosa de Viterbo y Cerinza y que abastece microcuencas asociadas al río Chicamocha, presenta signos visibles de degradación, como la disminución de espejos de agua, la pérdida de cobertura nativa y la erosión progresiva del suelo (Corpoboyacá, 2024). A pesar de ello, no existen modelos validados ni diagnósticos integrales que permitan estimar la magnitud de la afectación hidrológica ni orientar la formulación de estrategias efectivas de conservación y manejo.

Para abordar esta problemática, la presente investigación propone el uso de dos modelos hidrológicos complementarios: GR2M, un modelo conceptual de simulación mensual útil para evaluar el balance hídrico con datos climáticos básicos, y SWAT, un modelo físico distribuido que permite analizar la respuesta hidrológica de la subcuenca considerando el relieve, el uso del suelo

y las prácticas de manejo. Su aplicación permitirá simular variables clave como escorrentía, caudal base e infiltración, bajo escenarios históricos y futuros. Además, se realizará un análisis multitemporal del uso del suelo a través de imágenes satelitales, para identificar cómo su transformación ha influido en la dinámica hídrica del ecosistema. Con esta aproximación integrada, se busca generar un diagnóstico técnico confiable que contribuya a la formulación de estrategias de conservación y gestión hídrica del PNR Pan de Azúcar El Consuelo.

Pregunta Problema:

¿Cómo se han modificado los patrones hidrológicos del Parque Natural Regional Pan de Azúcar El Consuelo (Boyacá) a causa del cambio climático y el uso del suelo, y de qué manera puede emplearse la modelación hidrológica como herramienta para su diagnóstico?

Justificación

El Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo, en el departamento de Boyacá, constituye uno de los ecosistemas altoandinos más estratégicos para la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad en la Cordillera Oriental. No obstante, su funcionalidad ecológica se ve comprometida por los efectos combinados del cambio climático y la transformación del uso del suelo, fenómenos que han alterado la dinámica hidrológica de los páramos andinos, reduciendo su capacidad de retención de agua y de provisión de servicios ecosistémicos (Buytaert et al., 2014; IPCC, 2023).

A escala regional, los Andes tropicales registran incrementos térmicos superiores a 0,3 °C por década desde los años setenta (Vuille et al., 2003; IDEAM et al., 2015), lo que ha intensificado la evapotranspiración y afectado los flujos de recarga hídrica. En este contexto, el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo carece de un diagnóstico hidrológico integral que permita cuantificar el impacto de estas transformaciones y orientar estrategias efectivas de conservación y restauración. La ausencia de información validada limita la gestión ambiental y la planificación hídrica, incrementando la vulnerabilidad del territorio ante escenarios de variabilidad climática.

Por ello, esta investigación integró análisis climáticos de largo plazo, modelación hidrológica (GR2M y SWAT) e información multitemporal de cobertura del suelo obtenida mediante teledetección y SIG, con el propósito de caracterizar la respuesta ecohidrológica del páramo y generar un insumo técnico replicable que sirva de base para la gestión adaptativa del recurso hídrico. De esta forma, el estudio contribuye a cerrar brechas de información y a fortalecer la toma de decisiones en materia de conservación y restauración funcional, consolidando al PNR Pan de Azúcar – El Consuelo como un referente regional en la gestión sostenible de ecosistemas de alta montaña.

1. Marcos Referenciales

1.1. Marco Antecedentes

A continuación, se exponen las experiencias significativas halladas en diferentes bases de información, las cuales se encuentran relacionadas con el área de investigación, más específicamente con la modificación hidrológica causada por el cambio climático y los cambios de uso del suelo. Se describe así la información sustraída de varios referentes a saber.

Tabla 1.

Síntesis de investigaciones hidrológicas aplicadas a ecosistemas de páramo

Autor(es) y año	Descripción Aportes Relevantes
Romero et al. (2020). *Influencia del cambio climático en páramos de Boyacá.*	Analizó 30 años de temperatura y precipitación, evidenciando aumento térmico y reducción de la precipitación efectiva, con impactos sobre la recarga hídrica y coberturas naturales. Sustenta el enfoque de modelación hidrológica en ecosistemas altoandinos.
Torres y Rodríguez (2023). *Comparación de modelos hidrológicos GR2M y SWAT.*	Ambos modelos mostraron buen desempeño; SWAT más sensible al uso del suelo y GR2M más eficiente en escalas mensuales. Fundamenta la selección metodológica para el diagnóstico del PNR.
Molina et al. (2019). *Cambios de cobertura vegetal y pérdida de servicios ecosistémicos en páramos colombianos.*	Usando imágenes Landsat (1990–2015), evidenció pérdida superior al 30% de coberturas naturales en Boyacá y Cundinamarca, afectando la regulación hídrica y biodiversidad.
Daza Torres et al. (2014). *Efecto del uso del suelo sobre la capacidad de almacenamiento hídrico en el páramo de Sumapaz.*	Los suelos agrícolas pierden hasta 60% de su capacidad de retención de humedad. Destaca la degradación hidrológica derivada de la transformación del uso del suelo.
Rincón Achuri (2019). *Aplicación de modelos GR2M y GR4J en la cuenca del río Gualí (Tolima).*	Obtuvo altos índices de eficiencia (NSE > 0.75) aun con datos limitados. Valida el uso del modelo GR2M en zonas con baja densidad de estaciones.
Barrera Sarmiento (2021). *Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca del Lago de Tota, Boyacá.*	Proyectó aumentos de precipitación y evaporación hasta 2049, con mayor estacionalidad hídrica. Relevante por su similitud climática con el PNR.
Zubieta et al. (2018). *Evaluación del modelo GR2M con datos satelitales TRMM.*	Los datos satelitales mostraron desempeño aceptable frente a registros convencionales. Aporta evidencia para usar datos no convencionales en modelación hidrológica.
Siriwardena et al. (2010). *Uso del modelo GR2M en cuenca semiárida de Argentina.*	Validó la precisión del GR2M en ambientes con alta variabilidad hidroclimática. Reafirma su versatilidad para regiones con escasa información.
Ditthakit et al. (2021). *Integración del GR2M con aprendizaje automático.*	Random Forest mejoró la estimación de escorrentía en cuencas no aforadas. Referente metodológico para optimizar modelos hidrológicos.

Ahady et al. (2022). *Desempeño del GR2M con datos satelitales en Turquía.*	CHIRPS-2.0 alcanzó NSE > 0.8 en calibración y validación. Evidencia la utilidad de fuentes satelitales en regiones montañosas con baja instrumentación.
Sadio et al. (2023). *Hydrological response of tropical rivers basins to climate change using the GR2M model.*	Bajo escenarios SSP1–2.6 y SSP5–8.5, se observó disminución de escorrentía y aumento térmico. Contextualiza posibles impactos futuros en zonas tropicales.
Chowdhury et al. (2024). *Impacto conjunto del cambio climático y uso del suelo en la cuenca del río Kulsi (India).*	Identificó que deforestación y menor precipitación reducen significativamente los caudales. Respalda el análisis conjunto clima–uso del suelo.
Fanta y Sime (2022). *Performance assessment of SWAT and HEC-HMS model for runoff simulation of Toba watershed, Ethiopia.*	Ambos modelos calibrados con igual base de datos; SWAT mostró ligera sobreestimación en áreas cultivadas. Evidencia sensibilidad a variaciones de cobertura.
Sahu, Shwetha y Dwarakish (2023). *State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: A review.*	Destaca el buen desempeño de HEC-HMS en cuencas dendríticas y su precisión con métodos SCS-CN y SMA. Guía para seleccionar modelos según morfología y datos.
Darji et al. (2022). *Comparative performance of HEC-HMS and SWAT models in Machhu River Basin (India).*	HEC-HMS obtuvo mejor ajuste ($R^2 = 0.89$) frente a SWAT. Proporciona criterios comparativos para calibración de modelos hidrológicos.
González et al. (2018). *Simulación hidrológica de impactos del cambio climático en la cuenca del río Aipe.*	SWAT predijo menor escorrentía y mayor variabilidad estacional. Refuerza el enfoque predictivo ante escenarios climáticos.
Silva & Rojas (2023). *Evaluación de impactos ecohidrológicos del cambio climático en la región central de Venezuela.*	Bajo escenarios RCP, se evidenció reducción en la disponibilidad hídrica. Promueve la integración de variables ecológicas en el análisis hidrológico.
Tadesse & Fenta (2020). *Evaluating the performance of HEC-HMS and SWAT hydrological models in the Katar River Basin.*	SWAT mejor a largo plazo, HEC-HMS más preciso en eventos. Orienta uso complementario de ambos modelos según objetivo analítico.
Khan et al. (2023). *Climate Change Investigation of Swat River Using HEC-HMS Hydrological Model.*	Predijo reducción en escorrentía y aumento de eventos extremos. Sustenta la aplicación del HEC-HMS para proyecciones climáticas.
Bekele et al. (2020). *Performance of HEC-HMS and SWAT to simulate streamflow in the Upper Awash River Basin, Ethiopia.*	SWAT mejor para flujo base; HEC-HMS más preciso para tormentas. Referente para definir modelo según escala temporal.
Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta Bucaramanga (2018). *Evaluación de efectos del cambio de uso del suelo y cobertura vegetal en la regulación hídrica del río Caracolí.*	SWAT demostró pérdida de regulación natural del agua por deforestación. Caso colombiano análogo para zonas de páramo.
Narváez & Roa (2021). *Evaluación de los efectos del cambio climático sobre los caudales del río Tunjuelo (Bogotá, Colombia).*	WEAP mostró disminución del caudal base bajo escenarios RCP. Evidencia regional de alteraciones hidrológicas por cambio climático.

Ramírez et al. (2020). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Bogotá utilizando el modelo SWAT.*	Alta sensibilidad a cambios de uso del suelo, especialmente urbanización. Destaca la aplicabilidad del SWAT para análisis de impacto antrópico.
Arango et al. (2019). *Impacto del uso del suelo sobre la oferta hídrica en la cuenca del río Chinchiná.*	Deforestación redujo la oferta hídrica en 15%. Refuerza el vínculo entre cobertura vegetal y regulación hídrica.
Herrera et al. (2022). *Evaluación de la dinámica hidrológica del páramo de Santurbán bajo escenarios RCP.*	Aumento de escorrentía superficial y reducción de infiltración. Caso colombiano clave por similitud ecosistémica.
Alemayehu et al. (2022). *Integrating SWAT and remote sensing to assess land use impact on water yield in Ethiopian highlands.*	Detectó pérdida del 20% en rendimiento hídrico por agricultura extensiva. Combina teledetección y modelación con enfoque aplicado al PNR.
Castaño et al. (2020). *Análisis hidrológico de los impactos del cambio climático en el páramo de Sonsón (Antioquia, Colombia).*	SWAT simuló disminución del caudal base y aumento de escorrentía. Evidencia vulnerabilidad hídrica de los páramos andinos.
Gyamfi et al. (2023). *Modeling the impact of land use and climate change on water availability in a tropical highland catchment in Ghana.*	Reducción del 25% en disponibilidad hídrica futura (SSP5–8.5). Ejemplo integrador del efecto combinado clima–uso del suelo.
López et al. (2021). *Evaluación multitemporal del cambio en el uso del suelo en la cuenca del río Chitagá (Norte de Santander).*	Aumento de áreas agrícolas y reducción de bosque altoandino. Aporta base metodológica para análisis multitemporal en zonas de montaña.

1.2. Marco Legal

El marco normativo del presente estudio se estructura a partir de un enfoque temático que integra los principales instrumentos legales y de política pública asociados a la gestión de áreas protegidas, el recurso hídrico, el suelo, el cambio climático y la planificación territorial. Esta síntesis normativa permite contextualizar el diagnóstico hidrológico del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, garantizando coherencia con los lineamientos nacionales vigentes y evitando una presentación meramente descriptiva de la normatividad.

Tabla 2.

Normativa Nacional e Internacional aplicable al PNR Pan de Azúcar – El Consuelo

Eje temático	Norma / Política	Contenido	Aplicabilidad en la investigación
Áreas protegidas y	Convención Ramsar (1971)	Convenio internacional para la protección de	Respalda la conservación de ecosistemas estratégicos como páramos

ecosistemas estratégicos		humedales de importancia ecológica.	y humedales, fundamentales para la regulación hídrica del área de estudio.
	Decreto 2372 de 2010	Regula el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP).	Define el marco jurídico para la declaratoria y gestión del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo.
	Acuerdo 002 de 2012 (Corpoboyacá)	Declara y delimita el Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo.	Soporte legal del área de estudio; define zonificación, restricciones y objetivos de conservación.
	Acuerdo 001 de 2021 (Corpoboyacá)	Adopta el Plan de Manejo del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo.	Establece directrices de manejo, conservación, monitoreo y planificación del área protegida.
Gestión integral del recurso hídrico	Ley 373 de 1997	Establece el uso eficiente y ahorro del agua.	Apoya el análisis de la gestión del recurso hídrico en ecosistemas frágiles y de alta montaña.
	Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico – PNGIRH (2010)	Promueve la gestión integral del recurso hídrico por unidades hidrográficas.	Sustenta el enfoque de cuenca y el análisis hidrológico como base para la planificación ambiental.
Gestión del suelo y uso del territorio	Política Nacional para la Gestión Sostenible del Suelo (2015)	Establece lineamientos para la conservación, uso sostenible y restauración del suelo.	Fundamenta el análisis de los cambios en el uso del suelo y su incidencia en la respuesta hidrológica y los servicios ecosistémicos del PNR.
	Resolución 0668 de 2016 (MinAmbiente)	Define lineamientos para la delimitación y manejo de páramos.	Brinda criterios técnicos y jurídicos para la conservación del ecosistema de páramo presente en el área de estudio.
Protección de ecosistemas páramo	Resolución 2222 de 2018 (MinAmbiente)	Delimita el complejo de páramos Guantiva – La Rusia.	Incorpora formalmente el páramo Pan de Azúcar dentro de los páramos protegidos del país.
	Ley 1930 de 2018 (Ley de Páramos)	Regula la protección integral de los ecosistemas de páramo.	Sustenta normativamente las medidas de conservación, restauración y uso sostenible del páramo objeto de estudio.
Cambio climático y variabilidad climática	Política Nacional de Cambio Climático (2016)	Establece acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático en Colombia.	Justifica el análisis de vulnerabilidad hidrológica y la modelación bajo escenarios de cambio climático.
	Acuerdo de París (2015)	Acuerdo internacional para mitigar el cambio climático.	Fundamenta el uso de escenarios climáticos en la evaluación de impactos hidrológicos futuros.
	IPCC – AR6 (2021)	Evaluación científica del cambio climático y escenarios futuros (RCP–SSP).	Base metodológica para la selección y uso de escenarios climáticos en la modelación hidrológica.

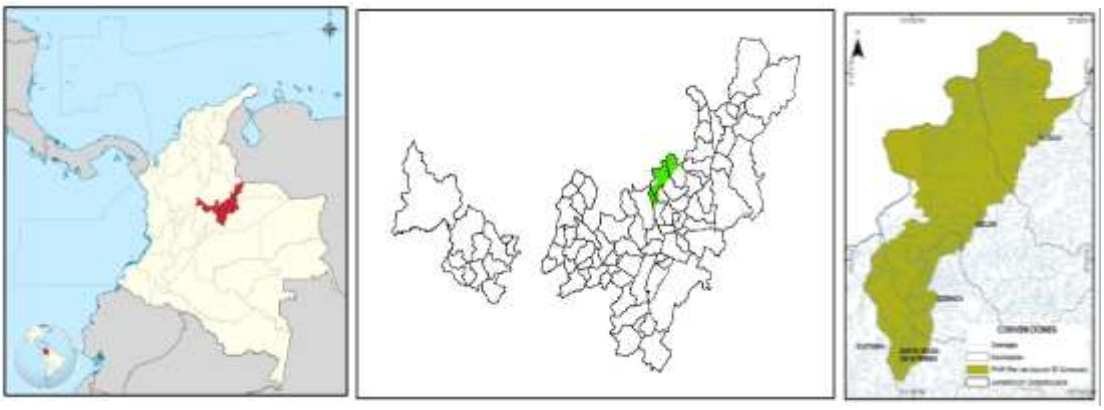
Marco ambiental general	Ley 23 de 1973	Declara el ambiente como patrimonio común y de utilidad pública.	Fundamenta el deber del Estado de proteger los recursos hídricos y ecosistemas estratégicos.
	Ley 99 de 1993	Crea el Sistema Nacional Ambiental (SINA).	Marco legal para la gestión ambiental y la protección de áreas de especial importancia ecológica.

1.3.Marco Contextual

El Parque Natural Regional (PNR) Pan de Azúcar – El Consuelo se localiza en el nororiente del departamento de Boyacá, entre los municipios de Santa Rosa de Viterbo, Belén, Cerinza y Tutazá, sobre la cordillera Oriental de los Andes (Ver Figura 1). Este ecosistema estratégico fue declarado área protegida mediante el Acuerdo No. 002 del 2012 por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá (Corpoboyacá), con una extensión total de 28.909 hectáreas (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020). Se sitúa entre los 2.700 y 4.000 m s.n.m., al interior del complejo de páramos Guantiva – La Rusia – Iguaque, reconocido como una de las áreas más importantes del país en términos de conservación de biodiversidad y regulación hídrica (IDEAM et al., 2017).

Figura 1.

Ubicación PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Nota: Adaptado de AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

1.3.1. Geología

La litología de la región comprende formaciones rocosas que se extienden desde el Devónico hasta el Cuaternario. La Cordillera Oriental, como porción de los Andes colombianos, se originó a partir de procesos de depósito sedimentario en una megacuenca, junto con episodios orogénicos que desencadenaron metamorfismo, actividad magmática, el levantamiento montañoso

y la erosión de unidades previamente conformadas (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Durante el Paleozoico inferior se originaron las unidades sedimentarias más antiguas reconocidas en el departamento de Boyacá. Los depósitos marinos de edad Cámbrico–Ordovícica de la Cordillera Oriental fueron posteriormente afectados por un evento tectonometamórfico ocurrido en el Silúrico, cuya intensidad fue mayor hacia el sector norte y decreciente hacia el sur. Después de este episodio, se desarrolló una fase de sedimentación caracterizada inicialmente por la acumulación de conglomerados y areniscas, seguida por secuencias dominadas por lutitas y arcillolitas con abundante registro paleontológico (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

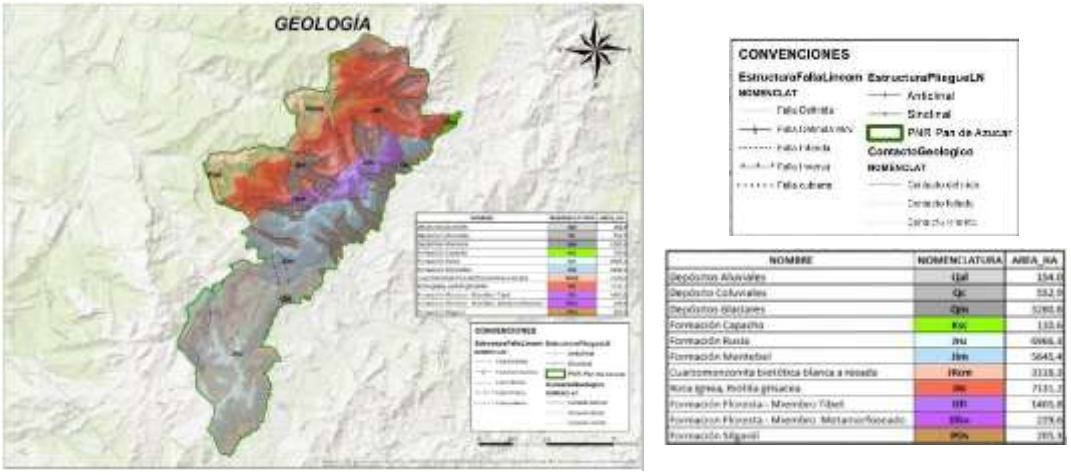
En esta cordillera también afloran depósitos de edad Carbonífera y Pérmica, correspondientes a una plataforma marina, conocidos como unidades marinas del Paleozoico Superior. Dichas unidades incluyen conglomerados y areniscas cuarzosas intercalados con lodolitas arenosas y calcáreas, lutitas oscuras, así como calizas grises y rojizas, en ocasiones oolíticas. En menor proporción, aparecen areniscas y limolitas en estratos rojos con escasos niveles fosilíferos, que conforman las Formaciones Silgará, El Tíbet y Floresta, presentes en el área de estudio (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Posteriormente, durante el Triásico–Jurásico, la sedimentación estuvo dominada por extensas secuencias continentales, con predominio de depósitos detríticos rojos. En este intervalo se registraron también episodios de transgresión marina localizados en sectores de la Cordillera Oriental, depositándose en la zona unidades continentales como las Formaciones Rusia y Montebel (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

La siguiente figura muestra la sucesión estratigráfica definida para el área y comprende rocas de diferentes edades, iniciando en el Paleozoico con las Formaciones Silgará, Floresta, rocas igneas Jurásicas Cuarzomonzonita biotítica (JRcm) y las de las Formaciones Montebel y Rusia, terminando con unidades del Cuaternario.

Figura 2.

Geología PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Nota: AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

1.3.2. Estratigrafía

Formación Silgará (pDs)

Corresponde a un conjunto de rocas metamórficas de bajo a medio grado, conformadas principalmente por filitas, esquistos y cuarcitas, asociadas a facies de esquistos verdes y niveles inferiores de anfibolitas. En el Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo, aflora en el sector noroccidental de los municipios de Belén y Tutazá, donde ocupa aproximadamente 3,14 km², equivalente al 1,08 % del área total del parque. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Formación Floresta (Df)

Unidad del Devónico medio (Emsiano–Eifeliano), conformada por una sucesión areno–conglomerática basal, un paquete intermedio de arcillas pizarrosas y un nivel superior de areniscas finas. Se dispone discordantemente sobre rocas metamórficas o concordantemente sobre la Formación Tíbet. En el área del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo afloran los miembros conglomerático (Tíbet) y metamorfoseado, representados por conglomerados, pizarras y filitas. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Formación Tíbet (Dft)

Unidad basal del Grupo Floresta, conformada por areniscas conglomeráticas en la base y areniscas cuarzosas micáceas de grano medio a grueso en la parte superior. En el área del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo aflora al suroriente del municipio de Tutazá, siguiendo una franja con orientación noreste, donde ocupa aproximadamente 13,89 km²,

equivalente al 4,8 % del área de estudio. (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Formación Floresta metamorfoseada (Dfm)

La Formación Floresta metamorfoseada, descrita por Ward et al. (1973) en el área de Mogotes (sur de Santander) y asignada al Devónico, está constituida por pizarras arcillosas y filitas correspondientes a facies de bajo grado de esquisto verde. En el área protegida se dispone en contacto discordante con la riolita grisácea (JRr), localizándose en el sector central y ocupando cerca de 2,29 km², equivalentes al 0,8 % de la superficie total (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Formación Montebel (Jim)

Conformada por arcillolitas y lutitas negras a grises, intercaladas con limolitas gris–verdosas y, en menor proporción, areniscas arcillosas claras. En el área del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo aflora en el sector nororiental, asociada a las laderas del anticlinal de Arcabuco, donde se dispone discordantemente sobre la Formación Cuche y subyace a la Formación Rusia. Corresponde al Jurásico (Liásico medio–superior) y ocupa aproximadamente 58,3 km², equivalente al 20,19 % del área protegida. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Formación Rusia (Jru)

Unidad del Jurásico superior constituida principalmente por areniscas rojas de grano fino a conglomerados subredondeados, de composición cuarzo–feldespática, con intercalaciones menores de limolitas gris–verdosas y rojas. Estratigráficamente, suprayace de manera concordante a la Formación Montebel y subyace a la Formación Arcabuco. En el área del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo ocupa aproximadamente 69,66 km², equivalente al 24,1 % de la superficie total. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Formación Capacho (Ksc)

Unidad del Cretácico (Cenomaniense superior–Turoniense inferior), constituida principalmente por lutitas y arcillolitas negras laminadas, con intercalaciones de areniscas finas y niveles de calizas fosilíferas. En el Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo aflora en el sector nororiental, en contacto fallado con riolitas jurásicas, donde ocupa aproximadamente 1,10 km², equivalente al 0,38 % del área de estudio. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Glaciares (Qm)

Depósitos dejados por el hielo de un casquete glaciar cuando se derrite. Depósitos glaciares se presentan en el extremo noroeste y constan de una serie de morrenas, formadas por bloques angulares, de arenitas y conglomerados, en una matriz areno arcillosa, muy mal seleccionados. En el área de estudio, abarca aproximadamente 31.34 km2, que equivale al 10,84% del área (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Aluviales (Qal)

Los depósitos aluviales están compuestos por gravas, arcilla limosa lacustre y fluvial y fluvio-glaciales (depósitos dejados por los ríos que drenan la parte terminal de un glaciar); depósitos que dan una topografía relativamente plana de forma alargada paralelos a la corriente de un río o quebrada. Los depósitos aluviales se ubican hacia las márgenes de los drenajes principales y consisten en bloques redondeados a subredondeados, principalmente de arenitas, en una matriz areno arcillosa. En el área de estudio, están asociados a los cauces de las quebradas del límite Oriental, abarca aproximadamente 1.53 km2 que equivale al 0,53% del área (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Coluviales (Qc)

Corresponden a acumulaciones de talud y derrubios formadas por materiales heterogéneos, dominados por bloques angulares y cantos de rocas competentes, inmersos en una matriz areno-arcillosa, originadas por procesos erosivos y gravitacionales en zonas de alta pendiente. En el área de estudio se localizan de manera puntual hacia el límite centro-oriental, ocupando aproximadamente 3,42 km², equivalentes al 1,18 % de la superficie total. (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Como componente de este ítem, se incorpora el Anexo A: Geología Estructural y Geomorfología del Área de Estudio, en el cual se desarrolla de manera más amplia la información referente a las características estructurales y geomorfológicas del territorio analizado. Este anexo complementa la descripción general aquí presentada, proporcionando una comprensión más precisa de los rasgos geológicos y de la dinámica del relieve en el área de estudio.

1.3.3. Suelos

A continuación (Ver Figura 3), se identifican y describen nueve (9) unidades cartográficas de suelos dentro del área del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, definidas a partir de criterios relacionados con el paisaje, el clima, el tipo de relieve, el componente taxonómico y las

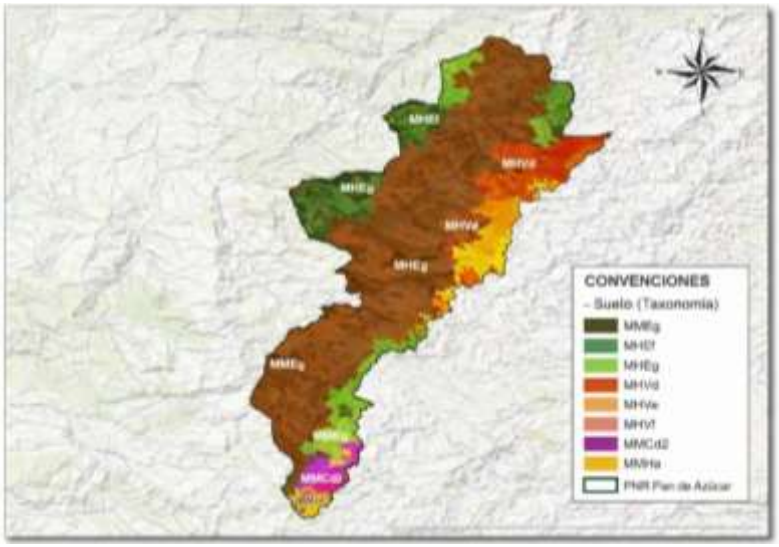
características tanto del relieve como de los suelos presentes, lo anterior, según el plan de manejo de este ecosistema.

En las unidades cartográficas identificadas por Corpoboyacá y registradas en el Plan de Manejo del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo, se reconocen diversas montañas estructurales, clasificadas como MEEg, MGEg, MHEf / MHEg, MHVd / MHVe / MHVf, MMCd2 y MMHa, tal como se ilustra en la figura siguiente.

Adicionalmente, el Anexo B: Unidades Cartográficas de Suelos, presenta una síntesis técnica detallada sobre cada una de estas unidades, incluyendo su clasificación taxonómica, localización espacial, características de paisaje y condiciones climáticas, así como la superficie (en hectáreas) que ocupa cada una dentro del ecosistema de alta montaña objeto de análisis.

Figura 3.

Unidades Cartográficas de Suelos PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Nota: Adaptado de AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

1.3.3.1. Suelos Agrológicos

Tierras de la Clase III

Los suelos MMHa pertenecen a la subclase agrológica IIIsc, caracterizados por limitaciones de agua, profundidad de superficial a moderada, presencia localizada de pedregosidad, relieve ligeramente plano y susceptibilidad al encharcamiento. En el área del PNR se ubican en pequeños sectores de las veredas Cucubo y Quebrada Grande (Santa Rosa de Viterbo), donde la escasez de lluvias, las heladas y los altos niveles de aluminio restringen su uso agrícola. Actualmente son empleados principalmente para ganadería extensiva con pastos kikuyo, ray grass, trébol y pasto

azul, además de razas bovinas como holstein, normando y pardo suizo; en menor escala se siembra papa. El uso más recomendable corresponde al cultivo de papa, maíz, hortalizas y la ganadería bajo manejo controlado (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Tierras de la Clase IV

Los suelos MMCd2, de la subclase IVes, presentan limitaciones por pendientes mayores al 12%, alta susceptibilidad a la erosión, baja fertilidad y presencia de aluminio en niveles tóxicos. Se ubican en pequeñas áreas del PNR, principalmente en las veredas Cucubo y Quebrada Grande (Santa Rosa de Viterbo). Se recomiendan para cultivos como papa, maíz, frutales de hoja caduca, curuba, arracacha, haba y hortalizas, y en menor medida para ganadería extensiva o bosques comerciales de pino. Para su manejo se sugiere siembra en curvas a nivel, uso de residuos de cosecha, rotación de potreros y fertilización de pastos, con el fin de reducir la erosión y mantener la materia orgánica del suelo (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Tierras de la Clase VII

Los **suelos MHVd, MHVe y MHVf**, correspondientes a la subclase agrológica VIIcs, se distribuyen en el complejo de páramo de los municipios de Cerinza, Santa Rosa de Viterbo, Belén y Tutazá, en paisajes de montaña y altiplanicie. Presentan limitaciones severas por bajas temperaturas, alta humedad, pendientes moderadas a fuertes, baja fertilidad, pedregosidad y altos contenidos de aluminio, lo que restringe su uso principalmente a conservación, bosques y ganadería extensiva bajo manejo controlado. Sin embargo, su ocupación actual con cultivos y ganadería exige prácticas de manejo restrictivas, priorizando la conservación en pendientes mayores y el uso de labranza mínima en pendientes menores al 25 %. (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Tierras de la Clase VIII

Esta clase de suelos, representada por las unidades MHEf, MHEg, MGEg y MEEG, se distribuye en todos los pisos térmicos del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, principalmente en relieves empinados de montaña y altiplanicie. Se caracteriza por suelos superficiales o muy superficiales, afloramientos rocosos y zonas con erosión severa, con limitaciones extremas relacionadas con la pendiente, las bajas temperaturas o el marcado déficit hídrico. Debido a estas condiciones, el uso más adecuado es la conservación de la cobertura vegetal nativa y del bosque existente, priorizando la protección de cuencas, fauna y flora, así como el fomento del turismo ecológico (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

1.3.4. Cobertura de la Tierra

En el Plan de Manejo del Parque Natural Regional objeto de estudio, se identifican cinco unidades de cobertura, correspondientes principalmente a bosques y áreas seminaturales, junto con superficies agrícolas y cuerpos de agua. Estas coberturas, descritas en el diagnóstico ecológico del plan, reflejan la diversidad de ecosistemas presentes en el área, entre ellos bosques densos de tierra firme, herbazales de páramo y mosaicos agrícolas, que desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y en la provisión de servicios ecosistémicos (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017). A continuación, se presenta la distribución espacial de dichas coberturas según lo reportado en dicho instrumento de planificación (Ver Tabla 3 y Figura 4) .

Tabla 3.

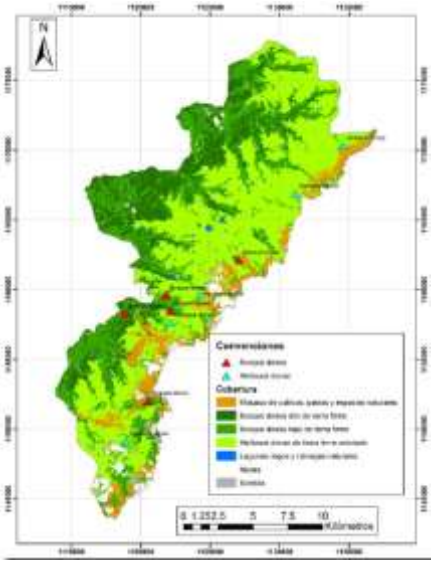
Coberturas de la Tierra PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Coberturas	Área (ha)	%	Total (ha)
Bosque denso alto de Tierra firme	4.814,46	16,65%	
Bosque denso bajo de Tierra firme	7.210,97	24,94%	
Herbazal denso de tierra firme arbolado (páramo)	13.525,13	46,78%	
Lagunas, lagos y ciénagas naturales	67,14	0,23%	28.909,74
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	2.154,51	7,45%	
Nube	807,03	2,79%	
Sombra	330,50	1,14%	

Nota: Adaptado de AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

Figura 4.

Coberturas de la Tierra PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Nota: Adaptado de AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

1.3.5. Conflictos de Uso del Suelo

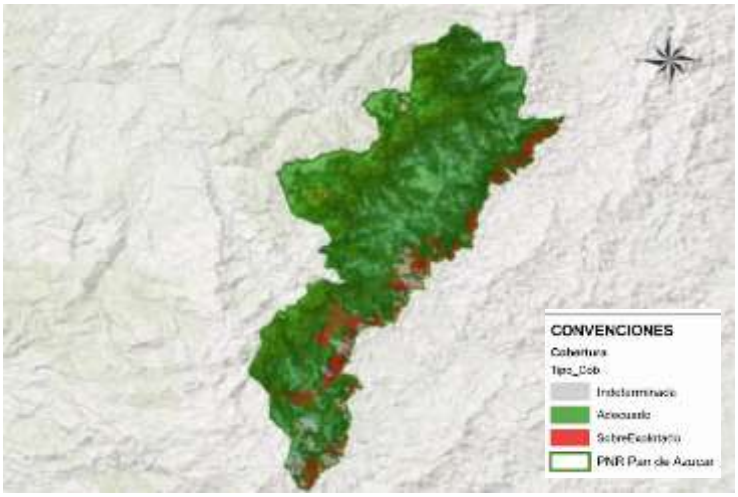
El Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo, conforme a lo establecido en el Decreto 1076 de 2015, tiene como finalidad exclusiva la preservación y restauración de los ecosistemas estratégicos, por lo cual cualquier uso del suelo distinto a estos fines se considera uso inadecuado, independientemente de la aptitud agrológica del terreno.

De acuerdo con el análisis de uso actual y uso recomendado del suelo del Plan de Manejo, 25.617,70 ha (88,61 %) del área total del Parque (28.909,74 ha) presentan un uso adecuado, asociado a coberturas naturales como bosques, herbazales de páramo y cuerpos de agua. En contraste, 2.154,51 ha (7,45 %) corresponden a uso inadecuado, al estar ocupadas por mosaicos de cultivos, pastos y plantaciones forestales dentro de un territorio destinado legalmente a la conservación. Adicionalmente, 1.137,53 ha (3,93 %) no pudieron ser clasificadas debido a limitaciones en la información cartográfica (AGS Ltda. & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

La distribución espacial de estos conflictos se presenta en la Figura 5, donde se observa que las áreas con uso inadecuado se concentran principalmente en sectores periféricos y de transición del Parque, en contacto con zonas de uso agropecuario externo. Estas áreas coinciden mayoritariamente con suelos de las clases agrológicas IV, VII y VIII, caracterizados por pendientes pronunciadas, baja profundidad efectiva, alta susceptibilidad a erosión y restricciones climáticas y químicas, condiciones que explican la elevada fragilidad del territorio frente a usos productivos.

Figura 5.

Conflictos de Uso del Suelo PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Nota: AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

La ocupación de estos suelos ha favorecido procesos de compactación, aumento de la escorrentía superficial y reducción de la infiltración, afectando la regulación hídrica de las microcuencas del área protegida. Este proceso se ve reforzado por la reducción aproximada del 10% de la cobertura vegetal natural entre 2010 y 2018 en sectores críticos como las nacientes del río Ture y las laderas del Alto de Pan de Azúcar, asociada a la expansión de la frontera agropecuaria (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

El modelo territorial actual muestra un conflicto persistente entre la vocación ecológica del territorio y los sistemas de uso del suelo, en su mayoría no planificados. La ausencia de barreras naturales para el uso intensivo del suelo, sumada a una débil aplicación de la normativa ambiental, ha facilitado procesos de ocupación desordenada, afectando especialmente zonas de recarga hídrica y nacimientos de agua. Estas dinámicas representan un riesgo para los servicios ecosistémicos que presta el PNR, particularmente el suministro de agua para consumo humano y la regulación hídrica regional.

1.3.6. Clima

El clima del Parque Natural Regional (PNR) Pan de Azúcar – El Consuelo está determinado por su localización en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos y por un marcado gradiente altitudinal que oscila aproximadamente entre 2.800 y 4.200 m s.n.m. Estas condiciones configuran un ambiente frío, con una fuerte influencia orográfica sobre la precipitación y la temperatura, variables que controlan de manera directa la dinámica hidrológica, ecológica y geomorfológica del área protegida. Desde el enfoque de la clasificación climática de Caldas–Lang, el territorio del PNR se enmarca principalmente dentro de los pisos térmicos frío y muy frío, característicos de las zonas altoandinas y de páramo en Colombia (Buytaert et al., 2006; IDEAM, 2015).

La combinación entre altitud, régimen térmico y precipitación confiere al parque condiciones climáticas favorables para la regulación hídrica, al promover procesos de almacenamiento temporal de agua en suelos orgánicos, turberas y coberturas vegetales naturales, propias de los ecosistemas de bosque altoandino y páramo (Buytaert et al., 2006; AGS Ltda. & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

1.3.6.1. Precipitación

El régimen de precipitación del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo presenta un comportamiento bimodal, con periodos de mayor pluviosidad durante los meses de abril–mayo y octubre–noviembre, y disminuciones relativas en los intervalos de enero–febrero y julio–agosto.

Este patrón está asociado principalmente a la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), la cual genera pulsos de convección al atravesar dos veces al año el norte de Suramérica (Poveda et al., 2006; IDEAM, 2015).

De acuerdo con el Plan de Manejo del área protegida, las precipitaciones medias anuales en el PNR superan los 1.000 mm en la mayor parte del territorio y alcanzan valores aproximados entre 1.800 y 2.500 mm/año en los sectores de mayor altitud, donde se desarrollan humedales altoandinos, lagunas y complejos de turberas (AGS Ltda. & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017). Estas condiciones favorecen una elevada capacidad de almacenamiento temporal de agua en el suelo y la vegetación, contribuyendo a la regulación de los caudales que abastecen las cuencas hidrográficas circundantes.

1.3.6.2. Temperatura

La temperatura en el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo está fuertemente condicionada por la altitud y presenta un gradiente térmico pronunciado. En las cotas inferiores del parque, cercanas a los 2.800 m s.n.m., las temperaturas medias anuales oscilan entre 10 y 12 °C, mientras que en los sectores de mayor altitud, por encima de los 4.000 m s.n.m., descienden por debajo de los 4 °C, con ocurrencia frecuente de heladas nocturnas y una marcada amplitud térmica diaria (IDEAM, 2017; AGS Ltda. & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017). Estos gradientes térmicos controlan la distribución altitudinal de los ecosistemas, determinando la transición desde bosques altoandinos en las zonas más bajas hasta pajonales, frailejonales y turberas en el páramo propiamente dicho (Rangel-Ch., 2000).

Desde una perspectiva de cambio climático, estudios nacionales e internacionales indican que los ecosistemas altoandinos podrían experimentar incrementos de temperatura entre 1,5 °C y 2,5 °C hacia mediados del siglo, lo que implicaría el ascenso de las isotermas, modificaciones en los balances hídricos y una mayor presión sobre los ecosistemas de páramo, reconocidos por su alta sensibilidad térmica y su función estratégica en la regulación hídrica (IDEAM et al., 2017; IPCC, 2021).

1.3.7. *Hidrología*

El Parque Natural Regional (PNR) Pan de Azúcar–El Consuelo constituye un núcleo estratégico de regulación hídrica para el departamento de Boyacá. Su localización en la Cordillera Oriental, en altitudes comprendidas entre 2.800 y 4.200 m s.n.m., favorece la presencia de un complejo sistema hidrológico conformado por lagunas glaciares, turberas, humedales y quebradas

de cabecera. Estas condiciones permiten que el parque funcione como un "almacén de agua" natural, en el que los ecosistemas de páramo y bosque altoandino regulan el ciclo hidrológico, almacenando humedad en los suelos orgánicos y liberándola gradualmente hacia las cuencas aguas abajo (AGS Ltda., 2018; Buytaert et al., 2006).

Desde el punto de vista hidrográfico, el PNR se ubica en una zona de divisoria intercuencas, con aportes hacia dos grandes sistemas nacionales. Por un lado, drena hacia la macrocuenca del río Magdalena–Cauca, específicamente a través de la cuenca del río Chicamocha, donde alimenta corrientes como el río Jordán y la quebrada El Consuelo. Por otro lado, una fracción de sus aportes hídricos desciende hacia la macrocuenca del Orinoco, a través del río Cusiana, tributario del río Meta (IDEAM, 2015; AGS Ltda., 2018). Este carácter intercuencas resalta la importancia estratégica del área protegida en la provisión de agua tanto para la vertiente occidental como para la oriental de la cordillera, articulando territorios con dinámicas socioeconómicas contrastantes.

En el ámbito interno del parque, la red de drenaje está conformada por un conjunto de subcuencas de cabecera con alta densidad de corrientes y fuertes pendientes. Entre las más relevantes se encuentran la subcuenca de la quebrada El Consuelo, que constituye un eje hídrico central del área; la subcuenca de la quebrada Chuncullo, alimentada por lagunas glaciares; y la subcuenca del río Cusiana en el flanco oriental. Estas subcuencas son alimentadas por una red de microcuencas que nacen en cuerpos lénticos y humedales de páramo, asegurando el mantenimiento de caudales base en periodos secos y la regulación de crecientes durante los máximos de precipitación (AGS Ltda., 2018; Célleri & Feyen, 2009).

Los cuerpos lóticos presentan marcada estacionalidad, influenciada por el régimen bimodal de lluvias regional. En periodos de máxima precipitación, los caudales muestran incrementos rápidos y alta variabilidad, mientras que durante los mínimos estacionales, la regulación es sostenida por humedales y turberas, que funcionan como "esponjas" liberando agua de manera gradual (Buytaert et al., 2006; IDEAM, 2015).

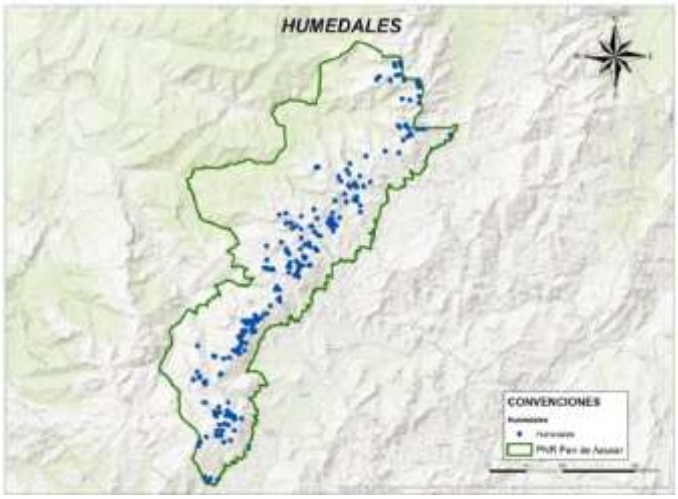
En las cabeceras de las subcuencas se destacan varios cuerpos de agua lénticos de origen glacial. La Laguna Grande constituye el mayor espejo de agua del parque, mientras que la Laguna Negra se encuentra rodeada de pequeños cuerpos de menor área, formando un complejo lagunar interconectado. Estos sistemas cumplen funciones críticas de almacenamiento temporal, regulación de caudales y mantenimiento de la biodiversidad acuática y ribereña (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Los humedales y turberas asociados a estos lagos presentan una alta capacidad de retención de agua, gracias a su composición orgánica y andisólica. Estudios en páramos andinos evidencian que la regulación hídrica de turberas y frailejonales permite amortiguar los picos de escorrentía durante lluvias intensas y sostener los caudales en los periodos secos, lo cual es vital para la seguridad hídrica de comunidades aledañas (Célleri & Feyen, 2009; Buytaert et al., 2006).

En este ecosistema de páramo se han identificado 65 humedales principales (Ver Figura 4); adicionalmente, a partir del análisis de imágenes de sensores remotos se reconocieron 258 cuerpos lénticos, en su mayoría de reducida extensión y no cartografiables, conformados por espejos de agua, pantanos, chucuas y ambientes similares. La mayor proporción de estos sistemas (72,87%) se localiza en coberturas de páramo, especialmente en herbazales densos de tierra firme con presencia arbórea; en menor medida se distribuyen en mosaicos de pastos, cultivos y espacios naturales (10,08%) y en bosques densos bajos de tierra firme (9,69%) (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Figura 6.

Humedales PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Nota: AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

La hidrología del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo no solo se limita a la provisión de agua en cantidad, sino también en calidad; la figura 5. presenta las subcuencas hidrográficas identificadas dentro del parque . El parque aporta aguas claras y frías que alimentan acueductos rurales y urbanos, además de ser base de sistemas agropecuarios y productivos locales (AGS Ltda., 2018). Su rol regulador se considera estratégico en el marco del *Plan Integral de Gestión de Cambio Climático de Boyacá*, que identifica los páramos como ecosistemas prioritarios para la adaptación, por su

capacidad de reducir la vulnerabilidad hídrica frente a escenarios de cambio climático (Gobernación de Boyacá, 2021).

Adicionalmente, los cuerpos lagunares del parque se encuentran en proceso de colmatación natural, lo que disminuye su capacidad de almacenamiento. Esta situación, combinada con presiones antrópicas como cambios en cobertura, pastoreo o extracción de recursos, puede reducir la función de regulación hídrica y aumentar el riesgo de inundaciones locales y erosión de suelos (IDEAM, 2015). En consecuencia, el plan de manejo ambiental enfatiza en la restauración y protección de lagunas prioritarias en cada municipio del área protegida (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Figura 7.

Subcuencas Hidrográficas PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Nota: AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

Tabla 4.

Subcuencas Hidrográficas PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Corriente	Área (Km²)	Corriente	Área (Km²)
PA-R1	1.9	Quebrada El Hoyo	2.3
PA-Quebrada NN1	2.3	PA-R8	3.6
Quebrada Grande	0.1	Quebrada Las Minas	0.3
PA-R2	6.3	PA-R10	12.0
Quebrada Laguenta	0.5	PA-R11	10.2
PA-R3	8.6	Quebrada Laguna Grande	0.1
Quebrada Los Colorados	4.7	PA-R12	9.0
PA-R4	4.1	Quebrada El Toral	4.7
Quebrada La Horca	3.7	PA-R13	8.7

PA-R5	14.8	Quebrada Romeral	18.3
Quebrada Cardonal	14.2	PA-R14	11.6
PA-R6	12.0	PA-Quebrada NN3	0.3
Quebrada Las Barrosas	42.0	PA-R15	10.1
Quebrada El Tambor	12.7	PA-R16	0.3
PA-R7	10.0	**Total**	**289.1**

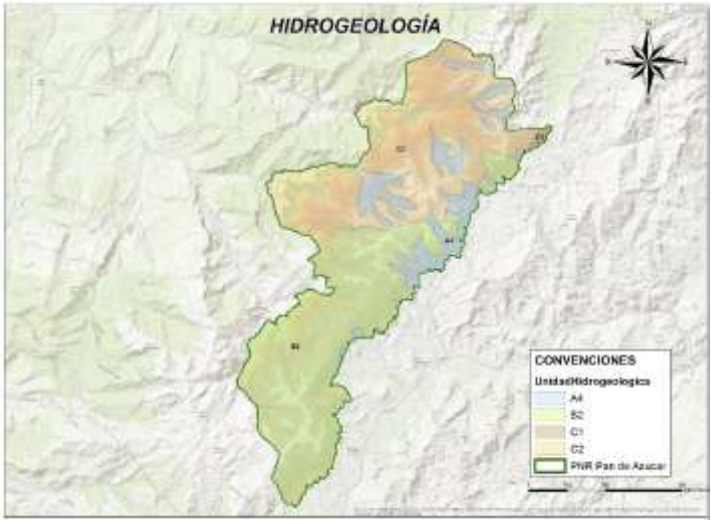
Fuente: Adaptado de AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

1.3.8. *Hidrogeología*

En el área del PNR Pan de Azúcar-El Consuelo, tal como lo cita el Plan de Manejo, se encontraron cinco unidades hidrogeológicas, denominadas como: A4, B1, B2, C1 y C2 como se observa en la siguiente figura, que se relacionan con la composición geológica de los diferentes tipos de acuíferos, este factor también influye en la distribución regional de las aguas subterráneas. A continuación, se describen las unidades hidrogeológicas.

Figura 8.

Hidrogeología PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Nota: AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

Depósitos Cuaternarios (A4)

Se localizan principalmente en la zona central y norte del área de estudio, en jurisdicción de los municipios de Tutazá, Belén y Cerinza. Estos acuíferos corresponden a sedimentos inconsolidados del Holoceno, asociados a cauces de corrientes superficiales y caracterizados por su reducido espesor, así como a acuíferos profundos cuaternarios conformados por depósitos semiconsolidados del Pleistoceno. Estos últimos presentan mayor potencia y están compuestos por arenas y gravas de granulometría fina a gruesa, intercaladas con espesos niveles de limos y arcillas, originados en ambientes glaciales o fluviales (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Depósitos cretácicos (C1)

Afloran en una zona reducida al noreste del área de estudio, al oriente del municipio de Tutazá. Corresponden a acuíferos de baja productividad y recursos limitados de aguas subterráneas, con una capacidad específica promedio inferior a 0,05 l/s/m, desarrollados en rocas poco consolidadas de la Formación Capacho (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Acuíferos jurásicos (B2)

Se distribuyen principalmente hacia el sector sur del área de estudio, comprendiendo los municipios de Cerinza, Santa Rosa de Viterbo, Belén y Tutazá. Estos se asocian a las rocas de las Formaciones Montebel y Rusia, de edad jurásica, y corresponden a acuíferos discontinuos y confinados, caracterizados por una baja productividad. Su capacidad específica varía entre 0,05 y 1,0 l/s/m, presentando circulación de agua subterránea fundamentalmente a través de fracturas (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Acuíferos precámbricos

Se caracterizan por presentar muy baja productividad y una limitada capacidad de infiltración, con valores de capacidad específica promedio menores a 0,05 l/s/m. Estos se encuentran asociados principalmente a las rocas metamórficas de las Formaciones Silgará y Floresta, así como a cuerpos ígneos representados por la Cuarzomonzonita Biotítica y la Riolita grisácea. En algunos sectores, la presencia de fracturamiento favorece parcialmente la circulación de agua subterránea; sin embargo, en términos generales, constituyen reservorios con recursos hídricos subterráneos muy limitados. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

1.3.9. Perfil Socioeconómico y Cultural

Esta área protegida se enmarca en una región de alta ruralidad, donde la organización territorial y las dinámicas socioeconómicas han estado históricamente condicionadas por los ecosistemas de alta montaña que la rodean (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Desde el punto de vista demográfico, los cuatro municipios presentan poblaciones de tamaño intermedio, distribuidas en su mayoría en núcleos rurales dispersos, con densidades bajas en las zonas altas del páramo. En términos generales, se observa un predominio de población campesina con altos niveles de dependencia de la agricultura, la ganadería y el acceso a recursos naturales. Este patrón coincide con la caracterización socioeconómica de la región altoandina de

Boyacá, en la que la ruralidad constituye más del 60 % de la población activa (DANE, 2019; AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017).

Las actividades económicas predominantes giran en torno a la agricultura de subsistencia y comercial a pequeña escala, con cultivos de papa, cebolla, arveja, maíz y trigo en las zonas de ladera media, mientras que en los pisos más bajos se diversifica con hortalizas y frutales. La ganadería bovina de leche y de carne, frecuentemente desarrollada en pastizales y pajonales de páramo, constituye otra fuente clave de ingresos, aunque ha generado presiones significativas sobre los suelos y la cobertura vegetal (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017). Estas prácticas productivas son complementadas con actividades de recolección de leña y, en menor escala, extracción de madera, que históricamente han servido como soporte energético y económico para las comunidades rurales.

En el municipio de Belén, particularmente, se destacan circuitos productivos asociados al cultivo de papa y al comercio local que abastece mercados vecinos. En Cerinza, la producción agrícola de autoconsumo y la ganadería son los pilares de la economía doméstica, mientras que en Tutazá se observa un perfil similar, aunque con mayor peso de prácticas agrícolas tradicionales. Por su parte, Santa Rosa de Viterbo, al ser un municipio con cabecera más consolidada, cumple un papel articulador en los intercambios comerciales y en la provisión de bienes y servicios para las comunidades aledañas al área protegida (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017; Gobernación de Boyacá, 2021).

Desde el punto de vista poblacional, el área de influencia del PNR abarca veredas rurales con una población total aproximada de 29.650 habitantes. Estos núcleos rurales enfrentan limitaciones estructurales como baja cobertura de servicios públicos, escasa conectividad vial y un sistema productivo dependiente de actividades agropecuarias tradicionales (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020). La población presenta altos niveles de dependencia del territorio, lo que genera presión sobre los recursos naturales.

El uso del suelo dentro del área protegida ha sufrido una transformación significativa en las últimas décadas. Según el análisis multitemporal del plan de manejo, más del 60 % del territorio conserva coberturas naturales (páramo, vegetación ribereña y bosques altoandinos), mientras que cerca del 40 % presenta alteraciones antrópicas (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017). Entre los usos predominantes se encuentran: cultivos transitorios (papa, arveja y cebolla), áreas de pastoreo, zonas de reforestación con especies introducidas (como pino y

eucalipto), y huertas de autoconsumo. Las actividades agropecuarias, aunque importantes para la economía local, generan fragmentación del ecosistema, alteración del ciclo hidrológico, compactación de suelos y mayor escorrentía superficial.

En lo cultural, los ecosistemas de páramo del Pan de Azúcar–El Consuelo constituyen territorios de identidad y significado para las comunidades campesinas. El páramo es concebido como un espacio vital, asociado a prácticas tradicionales de pastoreo, cultivo en minifundio y actividades espirituales ligadas al agua. Las lagunas, en especial la Laguna Grande y la Laguna Negra, son percibidas como lugares de especial importancia cultural y espiritual, donde se entretejen narrativas comunitarias sobre el origen del agua y el cuidado del territorio (AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017) . Este tipo de percepciones se corresponde con los hallazgos etnográficos sobre la cosmovisión campesina de los páramos colombianos, en los que el agua y la montaña aparecen como ejes de sacralidad y de cohesión social (Ulloa, 2011).

El Plan de Manejo del PNR subraya que la conservación de los ecosistemas de páramo no puede desligarse de la cultura campesina que los habita, pues la apropiación local del territorio determina en gran medida la sostenibilidad de las medidas de manejo. En este sentido, el fortalecimiento de procesos de educación ambiental, reconversión productiva y promoción de alternativas sostenibles (ecoturismo comunitario, prácticas agroecológicas) son pilares fundamentales para conciliar la protección del parque con el bienestar de las comunidades (Gobernación de Boyacá, 2021; AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017)).

En conclusión, el contexto socioeconómico y cultural del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo está marcado por la interdependencia entre las comunidades campesinas y los ecosistemas de páramo y bosque altoandino. Las actividades agrícolas y ganaderas constituyen la base de la economía, pero también representan presiones significativas sobre los recursos naturales. A la par, el páramo conserva un profundo significado cultural y espiritual que convierte al parque en un espacio de identidad y de arraigo para la población local. El reto central radica en promover un modelo de desarrollo rural sostenible que garantice la conservación de los ecosistemas estratégicos y la seguridad hídrica de las comunidades que dependen de ellos.

1.4.Marco Teórico

1.4.1. Uso del suelo

El uso del suelo comprende las diversas formas en que los seres humanos utilizan y gestionan la tierra, incluyendo la agricultura, la ganadería, la urbanización y la conservación

(Turner et al., 2007). Cambios en el uso del suelo pueden alterar la estructura y función de los ecosistemas, afectando la infiltración, el escurrimiento y la capacidad de almacenamiento de agua (Lambin et al., 2001). En el Páramo Pan de Azúcar El Consuelo, actividades como la agricultura y la ganadería han modificado el paisaje y, por ende, los patrones hidrológicos locales (Martínez & Pérez, 2018).

En los páramos, los cambios en el uso del suelo pueden tener impactos particularmente severos debido a la fragilidad de estos ecosistemas y su importancia para la regulación hídrica. La pérdida de vegetación nativa y la compactación del suelo pueden disminuir la capacidad del páramo para actuar como una esponja que retiene y libera agua gradualmente, lo que puede resultar en una mayor variabilidad en los caudales de los ríos y en la disponibilidad de agua (Martínez & Pérez, 2018). Como se observó en los páramos del Sumapaz, donde el cambio en la cobertura vegetal redujo la porosidad y aumentó la densidad aparente, disminuyendo su capacidad para retener agua (Daza Torres et al., 2014). Chowdhury et al. (2024) recalcan que la deforestación y la expansión agrícola contribuyen a la pérdida de servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica.

En el contexto de áreas protegidas de montaña, el uso del suelo adquiere una relevancia particular, ya que expresa la relación entre las actividades humanas y la vocación ecológica del territorio. Aunque su conceptualización es de carácter general, su interpretación debe considerar la distribución espacial de las coberturas y los usos presentes en el área de estudio, los cuales permiten identificar presiones antrópicas, procesos de transformación del paisaje y potenciales conflictos con los objetivos de conservación. En el caso del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo, esta relación se analiza de manera específica en el marco referencial, mediante la cartografía de uso y cobertura del suelo y el análisis de conflictos de uso, los cuales ilustran la forma en que el territorio está siendo ocupado y transformado.

1.4.2. Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico describe el movimiento continuo del agua en la Tierra a través de procesos de evaporación, condensación, precipitación, infiltración, escorrentía, transpiración y almacenamiento superficial y subterráneo. Este ciclo constituye la base para comprender la disponibilidad y la distribución del recurso hídrico en diferentes escalas temporales y espaciales (Maidment, 1993; USGS, 2022).

En ecosistemas de alta montaña, como los páramos andinos, este ciclo presenta particularidades que lo distinguen de otros sistemas. Los suelos de origen volcánico y con alto

contenido de materia orgánica, junto con la vegetación densa de pajonales y frailejones, actúan como una "esponja natural" capaz de captar y almacenar grandes volúmenes de agua. Este almacenamiento amortigua los excesos de escorrentía durante periodos lluviosos y sostiene caudales en las épocas secas, garantizando un flujo relativamente constante hacia aguas abajo (Buytaert et al., 2006; Hodstede et al., 2003). Estas características convierten al páramo en un regulador hídrico estratégico para el abastecimiento humano y la conservación de ecosistemas asociados.

1.4.3. Patrones hidrológicos

El patrón hidrológico se entiende como la configuración espacio-temporal de los procesos y flujos que integran el ciclo hidrológico en una cuenca determinada. A diferencia del ciclo, que describe procesos generales, el patrón hidrológico evidencia cómo dichos procesos se manifiestan en términos de magnitud, frecuencia, duración, persistencia y conectividad (Buytaert et al., 2006; Maidment, 1993).

Los patrones hidrológicos pueden identificarse a partir de registros climáticos e hidrométricos, así como a través del análisis de hidrogramas que representan la respuesta de una cuenca a un evento de precipitación. La pendiente ascendente, el caudal pico y la curva de recesión permiten evaluar la rapidez y la capacidad de regulación del sistema. En ecosistemas de páramo, los hidrogramas suelen mostrar respuestas atenuadas gracias a la alta infiltración y almacenamiento en el suelo. Sin embargo, la deforestación, el cambio de uso del suelo y el incremento de la temperatura, tal como lo reporta el IPCC (2023), modifican estos patrones hacia respuestas más rápidas y con menor retención hídrica (Moriasi et al., 2007; Zang et al., 2023).

Estudios realizados en páramos de otras regiones han mostrado que el cambio climático y el uso intensivo del suelo están afectando significativamente los recursos hídricos. Es así como, investigaciones en los páramos andinos de Ecuador han demostrado una disminución en la capacidad de almacenamiento de agua debido a la conversión de áreas naturales a usos agrícolas (Buytaert et al., 2006). En Colombia, estudios similares han encontrado que la urbanización y la agricultura están alterando los regímenes de flujo y la calidad del agua en los páramos (Ruiz et al., 2013).

Los datos climáticos y de caudales históricos son esenciales para entender los cambios en los patrones hidrológicos del Páramo Pan de Azúcar El Consuelo. Información de estaciones meteorológicas locales y de estudios hidrológicos previos proporcionará la base para el análisis

cuantitativo de estas variaciones (IDEAM, 2019). Además, el uso de imágenes satelitales y técnicas de teledetección permitirá una evaluación detallada de los cambios en el uso del suelo en la región (Gómez & Rodríguez, 2017).

1.4.4. Páramos y sus características hidrológicas

Los páramos, ecosistemas tropicales de alta montaña exclusivos de América del Sur, tienen a Colombia como el hogar de aproximadamente el 50% de su extensión, mientras que el resto se encuentra distribuido en países como Ecuador, Venezuela, Perú y Costa Rica. Estas áreas se localizan entre los 3000 y 4900 metros sobre el nivel del mar, donde las condiciones climáticas son extremas debido a la alta radiación solar durante el día y a las bajas temperaturas nocturnas (LLambí, Soto, Celleri, et al., 2012; Buytaert et al., 2006). La vegetación dominante en estos ecosistemas se compone principalmente de arbustos adaptados para conservar agua y resistir las fluctuaciones térmicas, con hojas gruesas y cubiertas de vellosidades que reducen el impacto del frío y la evapotranspiración. Además, los páramos poseen una rica biodiversidad, incluyendo unas 154 especies de aves, 90 especies de anfibios, 70 especies de mamíferos y más de 3400 especies de plantas (Salamanca, Botía & Ardila, 2008).

La precipitación en los páramos puede generarse localmente, a través de un proceso donde el aumento de radiación solar y la temperatura del aire provocan la evaporación del agua, que luego se enfría y precipita siguiendo el patrón valle-montaña. No obstante, debido a la latitud y altitud de estos ecosistemas, los sistemas climáticos de la Amazonía y el Pacífico tienen mayor influencia que los procesos locales, lo que ocasiona una marcada estacionalidad bimodal en la mayoría de los páramos (Llambí, et al., 2012). Por ejemplo, en la cordillera Occidental de Colombia se encuentran páramos muy húmedos con precipitaciones anuales cercanas a los 3000 mm, mientras que en las regiones centrales de Ecuador se presentan páramos más secos, con precipitaciones menores a 700 mm por año (Buytaert et al., 2006).

La lluvia en los páramos es típicamente de baja intensidad y larga duración. Además, se producen fenómenos de precipitación horizontal, donde la vegetación captura la humedad de la niebla, un aspecto relevante pero frecuentemente subestimado en los estudios hidrológicos (Llambí, et al., 2012; Buytaert et al., 2010). Los suelos de los páramos, principalmente de tipo Andisol, tienen una estructura porosa que facilita la infiltración y permanecen saturados en más del 80% de su volumen. Esto contribuye a la presencia de charcos, pantanos, humedales y turberas, que actúan como reguladores del ciclo hídrico al formar corrientes tanto subterráneas como superficiales

emergentes (Salamanca, Botía & Ardila, 2008). La escorrentía predominante en estos ecosistemas ocurre de forma subsuperficial, cuando el agua del suelo se desplaza por gravedad hasta encontrar una capa rocosa impermeable, alimentando así arroyos y quebradas (Llambí, et al., 2012).

En las temporadas de lluvias, la evapotranspiración se mantiene baja y no experimenta grandes variaciones durante las épocas secas, debido a las adaptaciones de la vegetación. Estas características, junto con las propiedades del suelo y las condiciones climáticas, favorecen un flujo base sostenido y elevado en las corrientes de agua (Buytaert, Célleri, De Bièvre, & Cisneros, 2010). Este ecosistema presenta un rendimiento hídrico de entre el 60% y 70%, con una capacidad destacada para regular el agua, almacenándola en épocas húmedas y liberándola durante las estaciones secas. Por esta razón, los páramos son considerados estratégicos en Colombia, ya que proveen el 70% del agua consumida por las ciudades en la región andina (Vásquez & Buitrago, 2011).

1.4.5. Alteraciones del balance hídrico y patrones hidrológicos en páramos

Los páramos son ecosistemas estratégicos de los Andes tropicales que cumplen un rol central en la regulación hídrica debido a la alta capacidad de almacenamiento de agua de sus suelos orgánicos, particularmente los andisoles y turberas (Hodstede et al., 2003). El balance hídrico en estos sistemas depende de la interacción entre precipitación, evapotranspiración, escorrentía y almacenamiento subterráneo, procesos altamente sensibles a variaciones climáticas y al cambio de uso del suelo (Buytaert et al., 2006).

El aumento de la temperatura en los Andes tropicales (superior a 0.3 °C por década desde 1970) ha intensificado la evapotranspiración y reducido la humedad edáfica (Vuille et al., 2003). A su vez, la expansión agropecuaria y la quema de coberturas nativas han disminuido la infiltración y acelerado los procesos de escorrentía, generando una pérdida de la regulación hídrica natural (Daza Torres et al., 2014). Estos cambios afectan los patrones hidrológicos, entendidos como el conjunto de relaciones temporales y espaciales que determinan la dinámica del ciclo del agua en un territorio (Maidment, 1993).

1.4.6. Impacto del Cambio Climático y el Uso del Suelo en la Hidrología

El cambio climático y las modificaciones en el uso del suelo son dos de los principales factores que afectan la hidrología de las cuencas, interactuando de manera compleja y a menudo amplificando sus impactos negativos. Estas interacciones son particularmente críticas en

ecosistemas sensibles como los páramos, que cumplen un rol estratégico en la regulación hídrica y la provisión de agua.

Por un lado, el cambio climático provoca alteraciones en los patrones de precipitación, la temperatura y la frecuencia de eventos extremos. Según Sadio et al. (2023), en escenarios futuros como SSP1-2.6 y SSP5-8.5, las cuencas tropicales de Senegal y Guinea-Bissau experimentarán condiciones más secas, con una marcada reducción en los volúmenes de escorrentía superficial debido a la disminución de la precipitación y al aumento de la temperatura. Este fenómeno agrava la disponibilidad de recursos hídricos, afectando tanto la biodiversidad como las comunidades humanas dependientes.

Por otro lado, las actividades humanas asociadas al cambio de uso del suelo, como la deforestación, la urbanización y la expansión agrícola, también generan impactos significativos en la dinámica hidrológica. Estudios como el de Chowdhury et al. (2024) en la cuenca del río Kulsi destacan que la pérdida de cobertura forestal y el incremento de áreas de cultivo han disminuido la capacidad del suelo para almacenar agua y regular su descarga, resultando en una mayor incidencia de eventos extremos como inundaciones y sequías. Daza Torres et al. (2014) observaron una reducción de hasta un 60% en la capacidad de retención de humedad en suelos intervenidos del páramo de Sumapaz, lo que subraya la vulnerabilidad de estos ecosistemas frente a las actividades humanas.

Además, el estudio de Barrera Sarmiento (2021) en el lago de Tota ilustra cómo el aumento de la temperatura puede incrementar la evaporación, reduciendo el caudal base durante temporadas secas y exacerbando la variabilidad estacional de los recursos hídricos. Esta variabilidad genera desafíos adicionales para la gestión hídrica, especialmente en regiones con alta dependencia de las fuentes de agua de los páramos.

El impacto combinado del cambio climático y el uso del suelo no solo intensifica los efectos individuales de cada uno, sino que genera nuevas dinámicas hidrológicas que son difíciles de prever y gestionar. Tal como lo citan Fanta y Sime (2022), las prácticas agrícolas y los cambios climáticos pueden interactuar para alterar significativamente la escorrentía y la calidad del agua en cuencas de Etiopía, Por su parte Ahady et al. (2022) subrayan que la complejidad de estos fenómenos requiere la integración de datos satelitales y modelos hidrológicos para comprender mejor las respuestas del sistema hidrológico.

En el caso de los páramos, esta sinergia puede provocar la pérdida de su función como reguladores hídricos naturales. Las actividades humanas que afectan la estructura del suelo, como la compactación por ganado o el desbroce de vegetación, reducen la capacidad de estos ecosistemas para almacenar y liberar agua de manera gradual, lo que a su vez amplifica los efectos del cambio climático (Daza Torres et al., 2014; Martínez & Pérez, 2018).

1.4.7. Cambio climático y Escenarios Prospectivos

El cambio climático se entiende como una variación estadísticamente significativa de los patrones climáticos a escala global y regional, atribuida principalmente al aumento de gases de efecto invernadero (GEI) derivados de las actividades humanas (IPCC, 2023). De acuerdo con el Sexto Informe de Evaluación del IPCC (AR6), la temperatura superficial global aumentó en promedio 1.1 °C entre 2011 y 2020 en comparación con el período preindustrial (1850–1900), siendo este el incremento más rápido registrado en al menos los últimos dos mil años (IPCC, 2023). Este calentamiento ha intensificado fenómenos extremos como olas de calor, sequías e inundaciones, generando pérdidas y daños irreversibles en ecosistemas y comunidades, especialmente en regiones de alta vulnerabilidad como los Andes tropicales (Vuille et al., 2003; Buytaert et al., 2014).

Los escenarios de proyección climática, desarrollados por la comunidad científica, constituyen una herramienta clave para evaluar impactos futuros. Los Representative Concentration Pathways (RCP), diseñados por el IPCC, plantean trayectorias de concentración de GEI expresadas en forzamiento radiativo (W/m^2) hasta el año 2100, donde el RCP 8.5 representa un escenario de altas emisiones sin mitigación (IPCC, 2014). A partir de 2016, estos escenarios fueron complementados por los Shared Socioeconomic Pathways (SSP), que integran dinámicas sociales, económicas y tecnológicas, permitiendo explorar la interacción entre desarrollo humano y emisiones futuras (O'Neill et al., 2017). En el contexto colombiano, el IDEAM ha generado proyecciones climáticas con base en estos escenarios, indicando para las zonas altoandinas aumentos de temperatura superiores a 3 °C y reducciones en la precipitación bajo trayectorias de altas emisiones hacia finales del siglo XXI (IDEAM et al., 2015).

En este sentido, la evaluación de los impactos climáticos en ecosistemas de páramo debe considerar la vulnerabilidad específica de estos territorios frente a escenarios de cambio climático, en los cuales pequeñas variaciones en temperatura o precipitación pueden generar alteraciones sustanciales en los patrones hidrológicos (Moreno et al., 2022).

1.4.8. Modelación hidrológica

La modelación se define como una representación simplificada de un sistema, que permite analizar y comprender sus componentes. En el ámbito de los modelos hidrológicos, estos se desarrollan con el propósito de describir y entender las variables que influyen en el comportamiento del agua dentro de una cuenca hidrográfica (Devia, Ganasri, & Dwarakish, 2015). El ciclo hidrológico se organiza en tres grandes sub-sistemas: el primero es el componente atmosférico, que abarca procesos como la precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el segundo incluye el sistema superficial, que considera tanto la escorrentía superficial como la subsuperficial, además de los océanos; y el tercero corresponde al sistema subterráneo, que comprende la infiltración, la recarga de acuíferos y los flujos de agua subterránea (Singh, 2018).

La principal función de los modelos hidrológicos es predecir procesos relacionados con el agua en una cuenca. Según su enfoque en el espacio y el tiempo, pueden dividirse en modelos agregados o distribuidos. Por otro lado, de acuerdo con la consideración de la aleatoriedad en los datos, se clasifican como determinísticos o estocásticos (Devia, Ganasri, & Dwarakish, 2015). Además, dependiendo del enfoque descriptivo que empleen, se categorizan como conceptuales, empíricos o físicos.

En la modelación hidrológica moderna, se han incorporado variables que previamente no se tenían en cuenta, como los cambios en el uso del suelo, el incremento en la demanda de recursos hídricos por parte de las actividades humanas, la erosión, la sedimentación y el cambio climático. Este último comenzó a ser considerado en los modelos desde la década de 1990, con investigaciones pioneras en el Reino Unido (Arnell & Reynard, 1996), Estados Unidos (Hamlet & Lettenmaier, 1999) y Europa, donde se realizó un análisis extensivo sobre su impacto (Arnell, 1999).

1.4.9. Validación de modelos

La confiabilidad de la modelación hidrológica depende de su validación estadística. Los indicadores más utilizados son el Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), el Root Mean Square Error (RMSE), el Porcentaje de Sesgo (PBIAS) y la Eficiencia de Kling-Gupta (KGE), que permiten evaluar la precisión de las simulaciones frente a registros históricos o series proxy (Moriasi et al., 2007). La integración de varios indicadores reduce el sesgo en la interpretación y aumenta la robustez de los resultados.

1.4.10. Datos Satelitales y su Aplicación en Modelación Hidrológica

La integración de datos satelitales en la modelación hidrológica ha transformado el análisis y la gestión de recursos hídricos, particularmente en cuencas con escasez de datos in situ. Los datos obtenidos de satélites proporcionan una cobertura espacial y temporal amplia, lo que los hace indispensables para evaluar procesos hidrológicos en regiones remotas o con redes de monitoreo limitadas.

Según Zubieta et al. (2018), los productos satelitales como TMPA V7 y TMPA RT del satélite TRMM han mostrado gran utilidad en la modelación hidrológica, particularmente en cuencas andinas como la del río Ilave. Estos datos permitieron simular caudales mensuales con el modelo GR2M, destacando su aplicabilidad en condiciones de déficit hídrico y heterogeneidad climática. Sin embargo, se identificaron limitaciones, como la sobreestimación de precipitación durante periodos secos, lo que resalta la importancia de ajustar estos datos para lograr mayor precisión en las simulaciones.

Ahady et al. (2022) también evaluaron la eficacia de datos satelitales, comparando los productos GPM IMERG-V6 y CHIRPS-2.0 en una cuenca montañosa en Turquía. Los resultados mostraron que CHIRPS-2.0 fue más preciso en la simulación de la relación lluvia-escorrentía utilizando el modelo GR2M, superando tanto a los datos observados por pluviómetros como a los de GPM IMERG-V6. Esto indica que los productos satelitales de alta resolución y calibración avanzada pueden ser herramientas valiosas para mejorar la precisión de los modelos hidrológicos.

1.4.11. Ventajas y Limitaciones de los Datos Satelitales

Los datos satelitales ofrecen ventajas significativas en términos de accesibilidad, cobertura espacial y continuidad temporal. Permiten evaluar áreas amplias y recopilar información en zonas inaccesibles o con poca infraestructura de monitoreo, como los páramos. Ditthakit et al. (2021) demostraron que al integrar datos satelitales con técnicas de aprendizaje automático, como los bosques aleatorios (RF), es posible mejorar la estimación de escorrentía en cuencas no aforadas, proporcionando parámetros más robustos para los modelos hidrológicos como GR2M.

Sin embargo, las limitaciones de los datos satelitales incluyen errores inherentes en la medición y resolución limitada en el tiempo y espacio. Zubieta et al. (2018) citan que ciertos productos satelitales tienden a sobrestimar o subestimar la precipitación en condiciones específicas, lo que afecta la precisión de las simulaciones hidrológicas. Además, Ahady et al. (2022) sugieren

que la efectividad de los datos satelitales varía según las características de la cuenca, siendo necesarios ajustes específicos para cada región.

1.4.12. Aplicación de Datos Satelitales en Ecosistemas Estratégicos como los Páramos

En ecosistemas estratégicos como los páramos, donde la función hidrológica es esencial, el uso de datos satelitales puede proporcionar información clave para la gestión sostenible del agua. Según Barrera Sarmiento (2021), los datos satelitales permiten analizar tendencias de precipitación y temperatura a largo plazo, proyectando escenarios futuros que informan la toma de decisiones. Por otro lado, la combinación de datos satelitales con imágenes de teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) permite identificar cambios en el uso del suelo y su impacto en la hidrología, mejorando las estrategias de conservación (Zubieta et al., 2018).

1.4.13. Balance Hídrico en Ecosistemas de Alta Montaña

El balance hídrico constituye la formulación cuantitativa del ciclo del agua en un sistema definido, usualmente una cuenca hidrográfica(Ver Figura 8). Este se expresa mediante la ecuación de continuidad:

$$P = ET + Q \pm \Delta S \quad (1)$$

donde P es la precipitación total, ET la evapotranspiración real, Q la escorrentía superficial y subterránea, y ΔS el cambio en almacenamiento de agua en el suelo, acuíferos y cuerpos superficiales. La ecuación asume la conservación de la masa, de manera que cualquier entrada de agua al sistema debe ser compensada por salidas o por variaciones en los reservorios internos (Maidment, 1993).

En ecosistemas de páramo, el balance hídrico presenta características diferenciadas respecto a otros ambientes de montaña. La alta porosidad y capacidad de almacenamiento de los suelos andisoles y turberas favorecen la infiltración y el almacenamiento subterráneo, modulando la respuesta hidrológica de las cuencas. Como resultado, se observan hidrogramas con ascensos más lentos, caudales pico atenuados y recesiones prolongadas, lo que refleja una fuerte capacidad de regulación hídrica (Buytaert et al., 2006; Hodstede et al., 2003). Estas condiciones permiten que el caudal base se mantenga durante periodos secos, garantizando un suministro estable para los ecosistemas y comunidades aguas abajo.

El deterioro de la cobertura vegetal y la transformación del uso del suelo alteran significativamente este balance. Procesos como la compactación del suelo por ganadería extensiva, la pérdida de coberturas nativas y la quema de pajonales reducen la infiltración y la capacidad de

retención, incrementando la escorrentía superficial y la variabilidad de caudales (Daza Torres et al., 2014). De esta forma, el patrón hidrológico de la cuenca pasa de un régimen regulado a uno más torrencial, lo que aumenta la ocurrencia de crecidas rápidas y disminuye la disponibilidad de agua en la estación seca.

El cambio climático constituye un factor adicional que modifica el balance hídrico. El *Sexto Informe de Evaluación* del IPCC señala que el incremento de la temperatura media global intensifica la evapotranspiración potencial, reduce la humedad edáfica y afecta los flujos de escorrentía y almacenamiento, con impactos más marcados en ecosistemas frágiles de montaña (IPCC, 2023). A nivel regional, el *PMA del Parque,* advierte que la reducción progresiva de la oferta hídrica se encuentra entre las principales amenazas para la resiliencia del área protegida, en estrecha relación con los cambios de uso del suelo y la variabilidad climática (Corpoboyacá, 2021).

1.4.14. Gestión hídrica y Ordenamiento territorial

La Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) constituye un enfoque estratégico para equilibrar las necesidades sociales, económicas y ambientales en una cuenca, promoviendo la coordinación entre actores y sectores (Global Water Partnership, 2000). En Colombia, la implementación de este enfoque se materializa en instrumentos como el Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), orientado a regular el uso sostenible del agua y del suelo en función de la oferta y demanda del recurso (Ministerio de Ambiente, 2010).

En el caso del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, la articulación de los resultados de la modelación hidrológica con el Plan de Manejo del área protegida y el PIGCCT Boyacá 2022 constituye un paso fundamental para la gestión adaptativa frente al cambio climático. La integración de diagnósticos técnicos con lineamientos de política pública permite sustentar acciones de conservación, restauración y adaptación en ecosistemas de páramo, en coherencia con los ODS, especialmente el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 13 (acción por el clima).

2. Método de Investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo descriptivo y explicativo, línea de investigación cambio climático, dado a que se caracterizó y analizó la modificación de los patrones hidrológicos del páramo Pan de Azúcar El Consuelo (Boyacá), como resultado de los cambios en el clima y el uso del suelo. El estudio adoptó una perspectiva multiescalar y multitemporal, integrando herramientas de teledetección, sistemas de información

geográfica (SIG) y modelación hidrológica, con el fin de generar un diagnóstico técnico que sustenta procesos de gestión adaptativa en contextos de alta vulnerabilidad ecosistémica.

El diseño metodológico se estructura en cuatro fases interdependientes, tal como se consolida en la siguiente figura.

Figura 9.

Diseño Metodológico

2.1. Adquisición, sistematización y análisis de datos hidroclimáticos

Se recopilaron y organizaron series históricas de precipitación y temperatura, provenientes del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). La selección de esta fuente oficial es crucial, ya que el IDEAM es la entidad técnico-científica del Sistema Nacional Ambiental (SINA) en Colombia, responsable de generar y suministrar la información hidrometeorológica oficial, lo que garantiza la calidad y la validez de los datos en el contexto nacional (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2024).

Estas series, comprendidas dentro de un lapso de tiempo de 40 años, fueron sometidas a análisis estadístico exploratorio y pruebas de tendencia con el fin de identificar cambios significativos, estacionalidad y anomalías climáticas. La extensión seleccionada de 40 años para las series históricas de datos hidroclimáticos es una recomendación estándar de la Organización Meteorológica Mundial (WMO) y es consistente con las directrices implícitas del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), que enfatiza la necesidad de series de tiempo suficientemente largas para el análisis de tendencias climáticas y la calibración de modelos (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, 2013; World Meteorological Organization, 2017).

El periodo de datos de esta amplitud, fue indispensable para capturar la variabilidad interanual y multidecadal de los fenómenos hidroclimáticos, lo que permitió diferenciar de manera

robusta la variabilidad natural de posibles tendencias asociadas al cambio climático (Kundzewicz & Robson, 2004). Asimismo, este periodo de datos mejoró significativamente la confiabilidad en la identificación y análisis de eventos extremos y la estimación de periodos de retorno, elementos clave para la planificación y gestión de recursos hídricos en el marco de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y los compromisos de adaptación al cambio climático del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010).

Posteriormente, se incorporaron escenarios de cambio climático basados en el conjunto de trayectorias representativas de concentración (RCP, por sus siglas en inglés), particularmente el RCP 8.5, como referencia de condición crítica de alta emisión, lo que permitió evaluar los impactos bajo un escenario de mayor riesgo.

2.2. Análisis multitemporal del uso y cobertura del suelo:

Esta fase contempló el análisis espacial de los cambios en la cobertura y uso del suelo mediante imágenes satelitales correspondientes a los años 1984, 1994, 2004, 2014 y 2024, provenientes de las misiones Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI, descargadas del portal Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Estas misiones fueron seleccionadas por su continuidad temporal, resolución espacial (30 m) y disponibilidad histórica, lo que permite realizar análisis comparables a largo plazo en estudios ambientales.

La clasificación de coberturas se realizó mediante un enfoque de clasificación supervisada, utilizando el algoritmo de Máxima Verosimilitud (Maximum Likelihood Classification), implementado a través de las herramientas de clasificación de imágenes de ArcGIS (Image Classification Wizard), empleando combinaciones de bandas del espectro visible, infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR). La validación temática se efectuó mediante verificación cruzada y apoyo de información auxiliar, incluyendo interpretación visual en Google Earth, cartografía oficial del IDEAM y unidades fisiográficas del páramo. El detalle técnico del procedimiento se presenta en el **Anexo D. Metodología Análisis Multitemporal de Uso y Cobertura del Suelo.**

2.3.Simulación hidrológica con GR2M y SWAT bajo escenarios de cambio climático y uso del suelo

Con el objetivo de evaluar la modificación de los patrones hidrológicos del PNR objeto de estudio ante la influencia del cambio climático y las transformaciones en el uso del suelo, se

emplearon de manera complementaria dos modelos hidrológicos reconocidos: GR2M y SWAT. Esta combinación metodológica permitió fortalecer la precisión y escalabilidad de los análisis. Cabe mencionar que con el fin de mantener la claridad y síntesis del capítulo metodológico.

El modelo GR2M, de tipo conceptual y de simulación mensual, apropiado para representar el balance hídrico en cuencas donde la disponibilidad de datos es limitada. Su simplicidad estructural y bajo número de parámetros lo hacen útil para evaluar tendencias generales en la relación entre precipitación, escorrentía y almacenamiento de agua (Mouelhi et al., 2006).

Por su parte, el modelo SWAT permitió integrar proyecciones de cambio climático y escenarios de uso del suelo, lo que lo convirtió en una herramienta robusta para la planificación ambiental y la toma de decisiones a escala de cuenca (Arnold et al., 2012).

El modelo GR2M fue implementado como una herramienta conceptual de simulación mensual, orientada al análisis del balance hídrico agregado y a la identificación de tendencias hidrológicas de largo plazo. Su aplicación se fundamentó en su capacidad para representar de manera simplificada las relaciones entre precipitación, evapotranspiración, almacenamiento y escorrentía, siendo adecuado para estudios donde el interés se centra en la evaluación de patrones hidrológicos más que en la predicción puntual de caudales.

La calibración y evaluación del desempeño de GR2M se realizaron mediante un enfoque relativo, contrastando la respuesta simulada con series de caudal proxy (Qproxy) construidas a partir del balance hidroclimático y de relaciones regionales, lo que permitió verificar la coherencia funcional del modelo a escala mensual durante el periodo histórico analizado (1984–2024). Este procedimiento es consistente con el propósito del modelo y con su aplicación en cuencas con limitada instrumentación hidrométrica, donde el énfasis se sitúa en la reproducción de tendencias y relaciones hidroclimáticas.

El modelo SWAT se implementó como una herramienta semidistribuida y físicamente basada, orientada al análisis de la respuesta hidrológica espacial del territorio frente a cambios en el clima y en el uso del suelo. Su configuración se sustentó en un enfoque de parametrización física y calibración conceptual, a partir de información detallada de topografía, suelos, coberturas de la tierra y variables climáticas históricas.

La evaluación del desempeño de SWAT se realizó de manera funcional y relativa, verificando la consistencia de los balances hídricos simulados, la respuesta hidrológica de las unidades de respuesta hidrológica y la coherencia temporal y espacial de los resultados.

Adicionalmente, se efectuó una contrastación cruzada con los resultados obtenidos mediante el modelo GR2M y con series de referencia hidroclimáticas (Qproxy), lo que permitió validar la capacidad del modelo para analizar cambios relativos y respuestas del sistema hidrológico bajo diferentes escenarios, sin que ello implique una calibración estadística orientada a la predicción absoluta del caudal.

La evaluación del desempeño de los modelos se realizó mediante un enfoque relativo, empleando indicadores de eficiencia como el coeficiente de Nash–Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio (RMSE), calculados a partir de series de referencia hidroclimáticas (Qproxy) y de la coherencia entre las respuestas simuladas por ambos modelos. Este procedimiento permitió verificar la consistencia temporal y funcional de las simulaciones, avalando la confiabilidad de los resultados para el análisis comparativo de escenarios de cambio climático y de uso del suelo, sin que ello implique una validación absoluta orientada a la predicción puntual del caudal.

Los principios de funcionamiento, las ecuaciones de gobierno y las variables analizadas por cada modelo corresponden a la formulación propia de GR2M y SWAT y se presentan de manera detallada en el **Anexo E. Metodología Modelación Hidrológica.**

2.4.Análisis de resultados

El análisis de resultados se enfocó en la interpretación de los patrones hidroclimáticos y de la dinámica hidrológica simulada bajo distintos escenarios de cambio climático y transformación del uso del suelo. Se evaluaron las tendencias y anomalías en variables clave como la precipitación, la temperatura, la escorrentía superficial, la evapotranspiración y el caudal base, con el fin de determinar los efectos acumulativos sobre la disponibilidad hídrica en el Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo. Este proceso permitió identificar tanto los impactos directos de las variaciones climáticas como los efectos indirectos derivados de la presión antrópica sobre la cobertura del suelo (Arnold et al., 2012; Mouelhi et al., 2006).

El alcance del estudio fue predictivo y correlacional, pues además de establecer relaciones entre las variables analizadas, se proyectaron escenarios futuros de escorrentía y caudales base bajo trayectorias de cambio climático definidas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021). En particular, se evaluaron los escenarios extremos, con el fin de establecer la magnitud de los posibles impactos sobre el recurso hídrico y sustentar la formulación de estrategias de adaptación.

Los resultados obtenidos se presentan de manera estructurada en los Capítulos 3, 4 y 5, los cuales desarrollan, respectivamente: el análisis de la variabilidad hidroclimática histórica, los cambios en el uso y cobertura del suelo y su relación con la dinámica hidrológica, y la simulación y comparación de escenarios hidrológicos bajo condiciones futuras de cambio climático y transformación del territorio.

3. Análisis de las series temporales de temperatura y precipitación en el PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Los ecosistemas de páramo presentan una alta sensibilidad frente a la variabilidad climática, debido a su dependencia de condiciones relativamente estables para sostener procesos clave como la recarga hídrica, la retención de humedad en suelos orgánicos y la regulación de caudales superficiales y subterráneos (Buytaert et al., 2006; Vuille et al., 2003). En este contexto, la precipitación y la temperatura constituyen variables determinantes de la dinámica hidrológica, al controlar la disponibilidad de agua en el suelo, el comportamiento del flujo base y los mecanismos de regulación hídrica propios de los sistemas de alta montaña.

En el Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo, estas variables adquieren especial relevancia debido a la fragilidad ecosistémica del páramo y a su papel estratégico en la provisión de servicios ecosistémicos asociados al recurso hídrico. Por ello, el análisis de su comportamiento histórico resulta fundamental para identificar patrones de variabilidad, tendencias y anomalías climáticas que puedan incidir en la disponibilidad y regulación del agua a escala local.

En este capítulo se analizan las series históricas de precipitación y temperatura correspondientes al área del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo, con el fin de caracterizar su comportamiento temporal, detectar señales de cambio y establecer relaciones con la dinámica hidrológica del territorio. El análisis se orienta desde un enfoque técnico-hidrológico, que permite servir de base para la interpretación de los escenarios futuros abordados en los capítulos posteriores.

Previo al análisis de las variables climáticas, se desarrolló un proceso integral de control de calidad y procesamiento de los datos hidroclimáticos provenientes de fuentes oficiales, que incluyó la evaluación de la completitud de las series, la identificación y tratamiento de valores atípicos, y el llenado de registros faltantes. La descripción detallada de este procedimiento se presenta en el **Anexo C. Metodología de Procesamiento de Datos Hidroclimáticos**, donde se especifican los criterios técnicos y las herramientas empleadas para garantizar la confiabilidad y representatividad de la información utilizada.

La delimitación del área de influencia de las estaciones meteorológicas se realizó mediante un criterio de proximidad espacial basado en buffers, atendiendo a las características geomorfológicas y climáticas del área de estudio y a los objetivos del análisis. Si bien los polígonos de Thiessen asignan áreas de influencia exclusivas a cada estación a partir de la distancia mínima, este enfoque resulta limitado en ecosistemas de alta montaña, donde la distribución de la precipitación está fuertemente controlada por gradientes altitudinales, efectos orográficos y barreras topográficas, factores que no son considerados por dicho método.

En el contexto del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo, la aplicación estricta de polígonos de Thiessen implicaría la exclusión de un número significativo de estaciones localizadas en el entorno inmediato del área protegida, reduciendo artificialmente la representatividad hidroclimática del análisis sin que ello responda a una menor influencia climática real.

En este sentido, el uso de buffers permitió incorporar estaciones próximas al PNR que captan de manera más adecuada la variabilidad climática regional relevante para el estudio, priorizando la representatividad hidroclimática sobre la asignación geométrica rígida del espacio. La identificación, localización y características altitudinales de las estaciones seleccionadas se presentan en la **Tabla 5**, mientras que su distribución espacial respecto al límite del PNR se muestra en la **Figura 10**.

Tabla 5.

Estaciones Meteorológicas Empleadas – Variable Precipitación

Tipo	Nombre	Departamento	Municipio	Altitud m.s.n.m.
CP	Aeropuerto	Boyacá	Firavitoba	2500
PM	Antena La Rusia	Boyacá	Duitama	3650
PM	Aposentos	Boyacá	Socotá	2328
PM	Arcabuco	Boyacá	Arcabuco	2600
PM	Aserrio	Santander	Onzaga	2500
PG	Azulejos	Boyacá	Oicatá	2780
CP	Belencito	Boyacá	Paz de Río	2530
AM	Boavita	Boyacá	Boavita	2575
CO	Capitanejo	Santander	Capitanejo	2200
PM	Carcasí	Santander	Carcasí	2224
CO	Cardon	Boyacá	Socotá	3590
PM	Casa Amarilla	Boyacá	Toca	3200
CO	Charala	Santander	Charala	1850
CO	Chima	Santander	Chima	1910
PM	Chiscas	Boyacá	Chiscas	2480

CO	Chita	Boyacá	Chita	2961
PG	Cintas	Boyacá	Sogamoso	3400
PM	Cocuy	Boyacá	Cocuy	2749
PM	Cómbita	Boyacá	Cómbita	2820
PM	Confines	Santander	Confines	1823
PM	Coromoro	Santander	Coromoro	1820
PM	Covarachia	Boyacá	Covarachia	2400
PM	Cucharo	Santander	Pinchote	1975
PM	Curital	Boyacá	Socha	3100
PM	Curiti	Santander	Curiti	1926
CO	Cusagui	Boyacá	La Uvita	2950
CP	Duitama	Boyacá	Duitama	2540
PM	El Cerezo	Boyacá	Duitama	2900
PG	El Encino	Santander	Encino	1914
PM	El Santuario	Santander	Curiti	1899
PM	Firavitoba	Boyacá	Firavitoba	2486
CO	Gambita	Santander	Gambita	1980
PM	Guamo	Boyacá	Aquitania	2575
PM	Iza	Boyacá	Iza	2470
PM	Jerico	Boyacá	Jerico	2962
PM	La Capilla	Boyacá	La Capilla	2800
PM	La Comoda	Boyacá	Santana	1920
CP	La Sierra	Boyacá	Paipa	2850
CO	La Laja	Santander	Gambita	1900
PM	Las Pavas	Santander	Palmas	2625
PM	Macaravita	Santander	Macaravita	1956
PG	Malaga	Santander	Malaga	2237
PM	Hacienda El Mamonal	Santander	Curití	2408
PM	Escuela Mogotes	Santander	Mogotes	1973
PM	Molagavita	Santander	Molagavita	2150
PM	Mongua	Boyacá	Mongua	2932
PM	Monguí	Boyacá	Monguí	2970
PM	Moniquira	Boyacá	Moniquira	1964
PM	Nimicia	Boyacá	Gámeza	3200
PM	Nobsa	Boyacá	Nobsa	2500
PM	Oiba	Santander	Oiba	1900
PM	Olival	Santander	Suaita	1902
PM	Palermo	Boyacá	Paipa	2200
PM	Palma	Santander	Gambita	2100
CO	Palmar	Santander	Palmar	1940
PM	Panelas	Boyacá	Motavita	3195
PG	Pesca	Boyacá	Pesca	2764

PM	Potrerito	Boyacá	Aquitania	2786
PM	Pueblo Viejo	Santander	Coromoro	2107
PM	Remolino	Santander	Cabrera	2580
PM	San Antonio	Boyacá	Tuta	2580
PM	Santa Rosa de Viterbo	Boyacá	Santa Rosa de Viterbo	2690
PM	Santa Rosita	Boyacá	Sativanorte	3240
CO	Sativanorte	Boyacá	Sativanorte	2594
PG	Sena	Boyacá	Duitama	2500
CO	Sierra Nevada El Cocuy	Boyacá	Cocuy	3716
PM	Simacota	Santander	Simacota	2503
PM	Sotaquira	Boyacá	Sotaquirá	2860
PM	Suaita	Santander	Suaita	1960
AM	Surbata	Boyacá	Duitama	2485
PM	Susacón	Boyacá	Susacón	2550
CP	Susa	Santander	Susa	2467
PM	Tasco	Boyacá	Tasco	2486
PM	Tibasosa	Boyacá	Tibasosa	2500
CO	Toquilla	Boyacá	Duitama	2950
AM	Tunguavita	Boyacá	Duitama	2521
PM	Tutazá	Boyacá	Tutazá	2833
CP	UPTC	Boyacá	Tunja	2690
PM	Valle de San José	Santander	Valle de San José	1930

Figura 10.

Distribución Espacial Estaciones Meteorológicas Empleadas

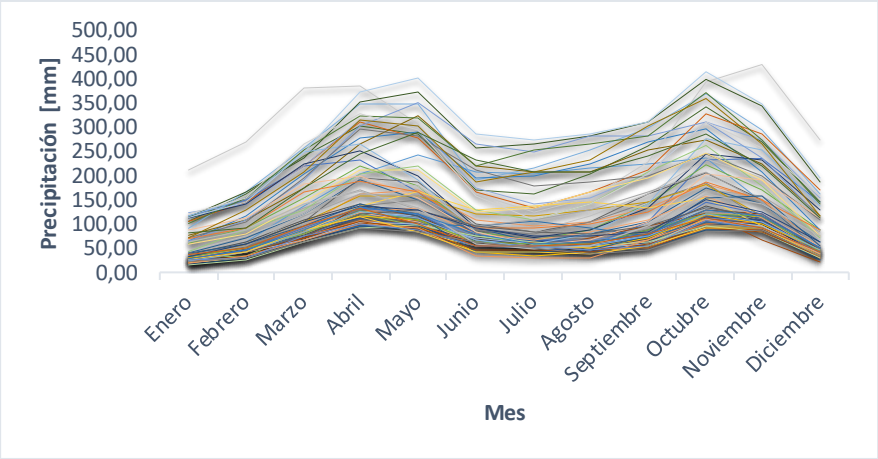
3.1.Precipitación Media Mensual Multianual

El análisis de la media multianual de precipitación en el conjunto de estaciones evidenció un régimen bimodal (ver Figura 11), con máximos bien definidos en los meses de abril–mayo y octubre–noviembre, y mínimos relativos en enero–febrero y julio–agosto. En términos cuantitativos, los valores mínimos mensuales multianuales oscilan aproximadamente entre 20 y 40 mm, mientras que los valores máximos alcanzan rangos del orden de 350 a 420 mm, evidenciando una marcada amplitud estacional en el régimen de lluvias.

Este comportamiento es característico de la cordillera Oriental y del altiplano cundiboyacense, y responde principalmente a la migración semianual de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre el norte de Sudamérica, modulada por la compleja orografía andina (Poveda et al., 2011; IDEAM, 2015). La ZCIT cruza dos veces el país, favoreciendo picos convectivos en primavera y otoño boreales, mientras que el veranillo de mitad de año se refleja en la depresión de julio–agosto, consistente con la climatología regional (Pabón, 2012; FAO, 2014).

Figura 11.

Precipitación Mensual Multianual – Área de Influencia



La disminución estacional de lluvias entre julio y agosto observado en la curva multianual consolidada corresponde al veranillo de San Juan, cuya intensidad es variable en función de factores locales como la altitud, la exposición de laderas y la interacción entre brisas valle–montaña y forzamientos sinópticos (Poveda et al., 2011; FAO, 2014). En este sentido, la expresión del veranillo en el área del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo no es uniforme, lo que explica que algunas estaciones apenas registren una leve disminución en este periodo.

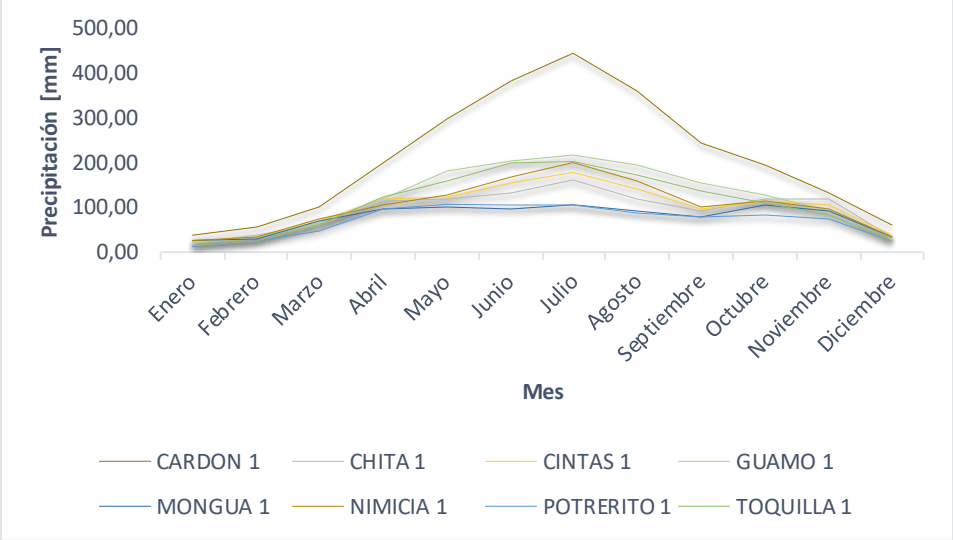
No obstante, ocho estaciones de la red analizada, Cardón , Chita , Cintas , Guamo , Mongua, Nimicia, Potrerito y Toquilla presentan un comportamiento monomodal, caracterizado por un único

pico de precipitación concentrado entre los meses de junio y agosto, con un máximo excepcional en julio para la estación Cardón 1 (ver Figura 12). En estas estaciones, los valores de precipitación media mensual durante el periodo de máxima lluvia oscilan aproximadamente entre 150 y 450 mm, mientras que en los meses secos los registros se reducen a rangos inferiores a 50 mm.

Este comportamiento, aunque atípico frente al régimen bimodal predominante en la región andina central, es consistente con transiciones locales hacia regímenes de ladera oriental, donde la precipitación tiende a concentrarse en un solo periodo amplio y continuo. La interacción entre gradientes orográficos, la orientación de las cuencas y la influencia de vientos del este favorece el desarrollo convectivo durante el periodo boreal de verano, atenuando o desplazando el segundo máximo asociado a octubre–noviembre (Vuille et al., 2000; Buytaert et al., 2006). Estos contrastes evidencian la elevada heterogeneidad espacial de la estacionalidad pluviométrica en los Andes tropicales.

Figura 12.

Estaciones Régimen Monomodal



Desde la perspectiva de forzantes climáticos, el ciclo anual de lluvias en Boyacá está fuertemente condicionado por el fenómeno El Niño–Oscilación del Sur (ENSO): en promedio, los eventos El Niño tienden a reducir la precipitación, mientras que La Niña la incrementa, especialmente en los trimestres DJF y SON (Poveda et al., 2011; IDEAM, 2015). Esta modulación puede alterar la intensidad relativa de los dos picos anuales, e incluso generar años "aparentemente monomodales" si uno de ellos se debilita o se retrasa. La agregación de años con Niño y Niña en las medias multianuales puede suavizar o sesgar la forma del ciclo estacional por estación.

En este análisis destaca particularmente una estación con un máximo en julio cercano a 450 mm, lo cual constituye un outlier hidrológico respecto al resto de la red. Este resultado exige precaución e instiga a explorar dos hipótesis: i) la existencia de un control micro-orográfico o exposición particular a flujos húmedos del oriente que favorezca lluvias intensas en ese mes; ii) problemas de homogeneidad asociados a cambios de ubicación, instrumentación o manejo de vacíos en la serie. La Organización Meteorológica Mundial recomienda verificar metadatos y, de ser necesario, aplicar procedimientos de homogeneización antes de interpretar estas anomalías como señal climática (WMO, 2018).

Finalmente, los diagnósticos regionales como el Plan Integral de Gestión de Cambio Climático de Boyacá (2016) y el Plan de Manejo del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo (Corpoboyacá, 2019) subrayan la alta sensibilidad de los ecosistemas de alta montaña y la necesidad de evaluar alteraciones en la estacionalidad y en los extremos de precipitación. Esta aproximación resulta coherente con la evidencia del IPCC AR6, que reporta con alta confianza un aumento de la intensidad de eventos de lluvia extrema en los Andes tropicales, con implicaciones directas para procesos de erosión, recarga hídrica y manejo adaptativo de áreas protegidas (IPCC, 2021).

A partir de las series de precipitación disponibles para el periodo 1984–2024, se estimaron los valores de precipitación media mensual multianual representativos del área de estudio. Los resultados evidencian que la precipitación mensual presenta una variabilidad entre 48,58 mm, correspondiente al mínimo registrado en enero, y 183,94 mm, asociado al máximo observado en noviembre. De manera integrada, el análisis del total anual permitió establecer una precipitación media de 1.468,47 mm/año para el Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo.

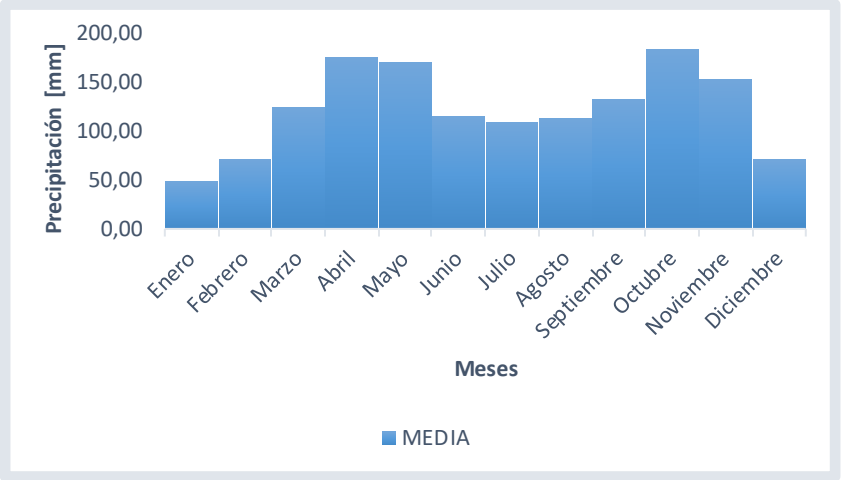
El procedimiento metodológico empleado para el cálculo de la precipitación media, incluyendo el criterio de selección de estaciones, el tratamiento de las series y la consolidación de promedios multianuales, se describe de manera detallada en el Anexo C. Metodología de Procesamiento de Datos Hidroclimáticos.

El hietograma promedio mensual (Figura 13) evidencia un patrón claramente bimodal en la distribución de las lluvias, con máximos de precipitación durante los meses de abril–mayo y octubre–noviembre, y periodos de relativa disminución entre junio–agosto y diciembre–enero. Este comportamiento corresponde al régimen pluviométrico típico de la Cordillera Oriental de Colombia, determinado por el desplazamiento semianual de la Zona de Convergencia Intertropical

(ZCIT) sobre el norte de Suramérica (Poveda et al., 2006; IDEAM, 2015). Dicho patrón genera alternancia entre periodos húmedos y secos que condicionan los procesos de recarga hídrica, escorrentía y almacenamiento en los ecosistemas de páramo y bosque altoandino del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo.

Figura 13.

Hietograma promedio mensual de precipitación multianual en el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo.



El análisis de la serie histórica de precipitación anual en el PNR, evidenció un valor medio de 1468,47 mm/año (Ver Figura 17), el cual se encuentra dentro de los rangos reportados para ecosistemas de páramo en Colombia, que oscilan entre 1200 y 2000 mm/año, según la localización geográfica, la altitud y la influencia orográfica (Buytaert et al., 2006; Célleri & Feyen, 2009). Este resultado adquiere relevancia al compararse con los registros del IDEAM (2017), que señalan que los páramos del complejo Guantiva–La Rusia presentan valores promedio cercanos a 1500 mm/año, lo que reafirma la consistencia del cálculo realizado y la representatividad hidrológica del área de estudio.

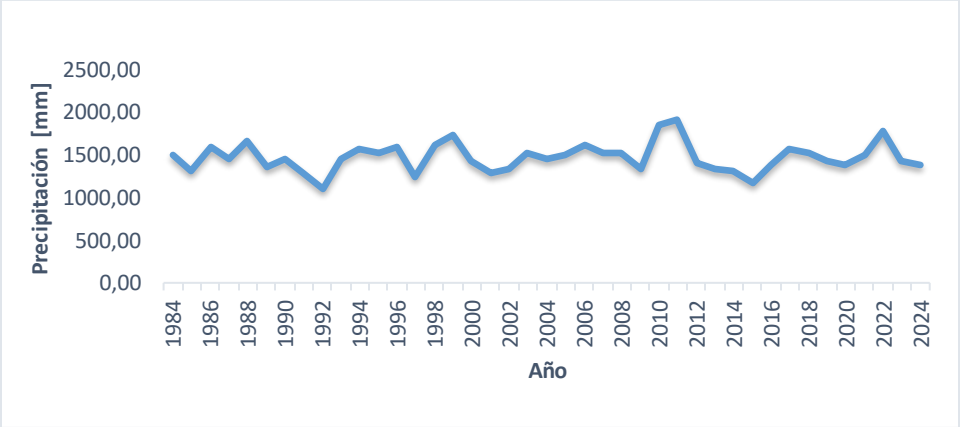
El valor medio de 1468,47 mm/año obtenido para el periodo 1984–2024 indica que el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo se ubica dentro de un rango de precipitación alta, característico de los ecosistemas de páramo y bosque altoandino de la Cordillera Oriental. Este nivel pluviométrico refleja una condición climática húmeda estable, en la que la precipitación constituye la principal fuente de recarga hídrica superficial y subterránea (IDEAM, 2017). De acuerdo con Buytaert et al. (2006), en estos ambientes el régimen de lluvias superiores a 1.200 $mm \cdot a^{-1}$ garantiza la capacidad del páramo para actuar como regulador del ciclo hidrológico, almacenando agua en sus suelos orgánicos y liberándola gradualmente a lo largo del año.

En consecuencia, el promedio registrado sugiere que el área protegida mantiene una disponibilidad hídrica suficiente para sostener caudales base y procesos ecológicos dependientes del agua, en concordancia con los valores reportados por Célleri y Feyen (2009) para páramos ecuatoriales. Estas condiciones confirman la relevancia del parque como zona estratégica de regulación y provisión hídrica regional, reforzando su papel dentro de la conectividad ecohidrológica del complejo Guantiva–La Rusia–Iguaque (IDEAM, 2017).

Por su parte, la serie multianual de precipitación promedio anual (Figura 14) muestra valores comprendidos entre aproximadamente 1.000 y 2.500 mm/año, con una media de 1.468 mm/año, lo cual se encuentra dentro de los rangos reportados para ecosistemas de páramo en Colombia (Buytaert et al., 2006; Célleri & Feyen, 2009). Aunque no se evidencia una tendencia significativa de incremento o disminución entre 1984 y 2024, la variabilidad interanual observada guarda coherencia con la estacionalidad representada en el hietograma, donde los picos y descensos mensuales reflejan la influencia del régimen bimodal de lluvias sobre el comportamiento anual de la precipitación. Esta correspondencia entre ambas representaciones confirma la consistencia interna de los datos y la influencia de los forzamientos atmosféricos regionales en la dinámica hidrometeorológica del área protegida.

Figura 14.

Serie temporal de la precipitación promedio anual multianual acumulada en el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo (1984–2024).



En términos de variabilidad interanual, la serie evidencia oscilaciones marcadas en la precipitación anual, con valores que, en condiciones normales, fluctúan entre 1.300 y 1.600 mm/año. Se identifican periodos húmedos destacados en los años 1996, 2011 y 2019, en los cuales la precipitación anual alcanza rangos aproximados entre 1.800 y 2.000 mm/año, reflejando condiciones asociadas a fases frías del fenómeno ENSO (La Niña). En contraste, durante intervalos

secos como 1992–1994 y 2014–2016, los acumulados anuales disminuyen de manera significativa, situándose en rangos cercanos a 1.100–1.300 mm/año, valores compatibles con episodios de sequía regional vinculados a la fase cálida del ENSO (El Niño).

La evidencia obtenida reafirma la función estratégica del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo como regulador hídrico regional, dado que sus ecosistemas de páramo y bosque altoandino actúan como reservorios naturales de agua. Los suelos andisoles y las turberas altoandinas, predominantes en el área, presentan una estructura con alta porosidad, baja densidad aparente y abundante materia orgánica, lo que les confiere una extraordinaria capacidad para retener y almacenar humedad (Hofstede et al., 2003; Buytaert et al., 2006). Este comportamiento físico-hidrológico permite la infiltración y acumulación de grandes volúmenes de agua en el perfil del suelo, que luego son liberados de forma gradual hacia las capas inferiores y las corrientes superficiales, garantizando el sostenimiento de caudales base incluso durante los periodos secos.

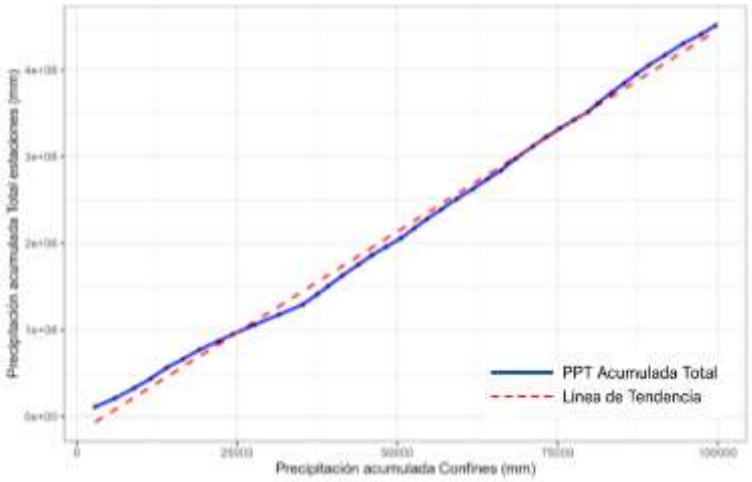
Este mecanismo convierte al páramo en un amortiguador natural frente a la variabilidad climática, modulando las respuestas hidrológicas ante eventos extremos. Durante las temporadas lluviosas, la alta capacidad de retención de los andisoles y turberas reduce la escorrentía directa y los picos de crecida, contribuyendo a la regulación de inundaciones y erosión en las cuencas aguas abajo (Buytaert & Breuer, 2014). En contraste, durante las épocas secas, la liberación progresiva del agua almacenada mantiene la estabilidad del régimen hidrológico, garantizando la continuidad de los servicios ecosistémicos de provisión y regulación. En este contexto, el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo se consolida como una infraestructura natural esencial, cuyo funcionamiento hidrológico resulta determinante para la sostenibilidad hídrica y la resiliencia de los sistemas socioecológicos asociados.

3.2.Análisis de Consistencia – Curva de Doble Masa

El resultado gráfico de la curva de doble masa muestra que la precipitación acumulada total de las estaciones (línea azul) sigue de manera cercana la línea de tendencia lineal (línea roja discontinua), con oscilaciones locales menores que no constituyen rupturas sistemáticas (Ver Figura 15). Este comportamiento indica que los registros son consistentes y que no se observan cambios estructurales significativos en la calidad de la información durante el horizonte de análisis 1984–2024. La ausencia de inflexiones marcadas o divergencias entre ambas curvas respalda la homogeneidad interna de la serie y la confiabilidad de los datos empleados.

Figura 15.

Curva de Doble Masa para Análisis de Consistencia Pluviométrica



La buena correspondencia entre las acumuladas de Confines y el total regional permite concluir que las series utilizadas son homogéneas y, por tanto, aptas para su integración en el diagnóstico climático e hidrológico del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo. Este resultado valida el proceso de depuración previo y fortalece la confiabilidad de los análisis posteriores de tendencias y simulaciones hidrológicas.

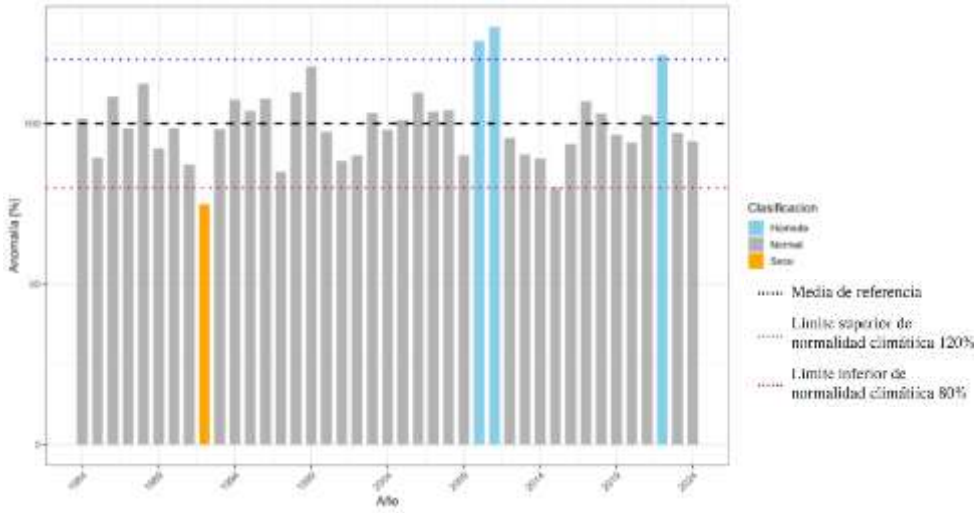
3.3. Análisis de anomalías de Precipitación

El análisis de anomalías de precipitación anual para el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, en el periodo 1984–2024, evidenció que la mayor parte de los años se mantuvieron dentro del rango de normalidad climática (80–120 % respecto a la media de referencia de 1468,47 mm/año) (Ver Figura 16). Esto sugiere una relativa estabilidad pluviométrica interanual en el área protegida, aunque con presencia de eventos puntuales de sequía y exceso de precipitación.

El único episodio clasificado como seco se registró en 1993, con un acumulado inferior al 80 % del promedio histórico. Este déficit se corresponde con la influencia del fenómeno El Niño, el cual, según el IDEAM (2014) y Pabón (2014), genera reducciones significativas en la precipitación en sectores de la cordillera Oriental, afectando directamente los ecosistemas de páramo.

Figura 16.

Anomalías Precipitación 1984-2024



Por otro lado, se identificaron tres años catalogados como húmedos: 2008, 2009 y 2020, con valores superiores al 120 % de la media. Estos picos coinciden con episodios intensos del fenómeno La Niña, caracterizados por incrementos notables en la pluviosidad en los Andes colombianos (Poveda et al., 2011; WMO, 2018).

En particular, el periodo 2008–2010 correspondió a una fase fría del fenómeno La Niña, ampliamente documentada como una de las más intensas e impactantes en la historia reciente de Colombia. Este evento generó excesos hídricos significativos en zonas de alta montaña, incluyendo ecosistemas de páramo, lo que ocasionó afectaciones en la infraestructura, la producción agrícola y la dinámica socioambiental de las comunidades locales. Diversos reportes técnicos y estudios académicos coinciden en que la magnitud de esta fase de La Niña puso de manifiesto la alta vulnerabilidad del país frente a la variabilidad climática y la necesidad de fortalecer las estrategias de adaptación en territorios sensibles como el Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo (IDEAM, 2011; Poveda & Álvarez, 2012).

El patrón observado confirma que, aunque la precipitación en el complejo de páramo se mantiene mayoritariamente en rangos normales, los eventos extremos están modulados por la variabilidad climática asociada al ENSO. Esto resulta crítico para la conservación y gestión del área, dado que los ecosistemas de páramo funcionan como reguladores hídricos y son altamente sensibles a los déficits o excesos de lluvia.

En este sentido, la inclusión de las anomalías permitió identificar periodos críticos que pueden incidir en la disponibilidad hídrica, la dinámica de recarga de acuíferos de montaña y la resiliencia de la vegetación altoandina. Estos hallazgos reafirman la importancia de integrar la variabilidad climática en la planificación territorial y en el manejo adaptativo del parque.

3.4. Variabilidad Climática y Fenómenos ENSO PPT

La variabilidad climática en el área de influencia del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo está fuertemente modulada por los fenómenos de interacción océano–atmósfera, siendo El Niño–Oscilación del Sur (ENSO) el de mayor relevancia en Colombia. Este fenómeno se manifiesta en sus dos fases: El Niño, caracterizado por un calentamiento anómalo de la superficie del océano Pacífico tropical, y La Niña, asociada a un enfriamiento anómalo de las mismas aguas. Ambas fases generan alteraciones significativas en el régimen de lluvias y en la temperatura a escala regional, modificando los patrones hidroclimáticos en ecosistemas andinos de alta montaña como el páramo (Poveda et al., 2011; IDEAM, 2014).

De acuerdo con el IDEAM (2014), en Colombia la fase cálida de ENSO (El Niño) suele producir reducción de la precipitación y aumento de la temperatura, lo que incrementa la probabilidad de sequías, disminuye la recarga hídrica y afecta la oferta de agua superficial. En contraste, la fase fría (La Niña) ocasiona excesos hídricos, mayores niveles de humedad en el suelo y riesgo de inundaciones o avenidas torrenciales. Estos efectos son especialmente críticos en territorios como el PNR Pan de Azúcar–El Consuelo, donde la regulación hídrica depende del equilibrio entre la cobertura de páramo, la topografía y la dinámica atmosférica regional (Buytaert et al., 2006; Poveda & Álvarez, 2012).

La evaluación de la variabilidad climática interanual e interdecadal a partir de registros de más de 40 años permite establecer la Normal Climatológica y analizar las desviaciones asociadas a ENSO, lo que constituye una herramienta esencial para interpretar los cambios en la disponibilidad hídrica, la ocurrencia de sequías o lluvias extremas, y la resiliencia de los ecosistemas de páramo frente a la variabilidad y el cambio climático (Montealegre Bocanegra, 2014; IPCC, 2021).

La serie histórica de anomalías de precipitación en el PNR Pan de Azúcar–El Consuelo (1984–2024) muestra una clara modulación por la variabilidad interanual asociada al fenómeno ENSO. En la Figura 16 y la Tabla 5 se presentan los resultados del análisis comparativo entre los eventos de El Niño y La Niña registrados en el periodo de estudio y su correspondencia con los déficits y excesos hídricos en la región.

En la Figura 17, el eje de ordenadas (Y) representa las anomalías estandarizadas de precipitación (Z-score) calculadas con respecto a la media climatológica del periodo 1984–2024; los valores positivos indican años con exceso de precipitación y los negativos años con déficit

hídrico en relación con la media. El eje de abscisas (X) muestra la serie temporal mensual comprendida entre enero de 1984 y diciembre de 2024, permitiendo identificar la evolución de las condiciones climáticas a lo largo del tiempo.

Las barras de colores corresponden a las fases del fenómeno ENSO, diferenciando los episodios de El Niño (en tonos rojos), La Niña (en azules) y los periodos neutros o normales (en verde), mientras que la línea verde continua representa la variabilidad de la precipitación en el área de estudio. Esta representación gráfica facilita visualizar la correspondencia entre las fases cálidas y frías del ENSO y las desviaciones en la precipitación local, evidenciando su influencia directa sobre los patrones hidroclimáticos de la región andina (IDEAM, 2014; Poveda et al., 2011).

Figura 17.

Anomalías Estandarizadas Eventos ENSO PNR Pan de Azúcar El Consuelo

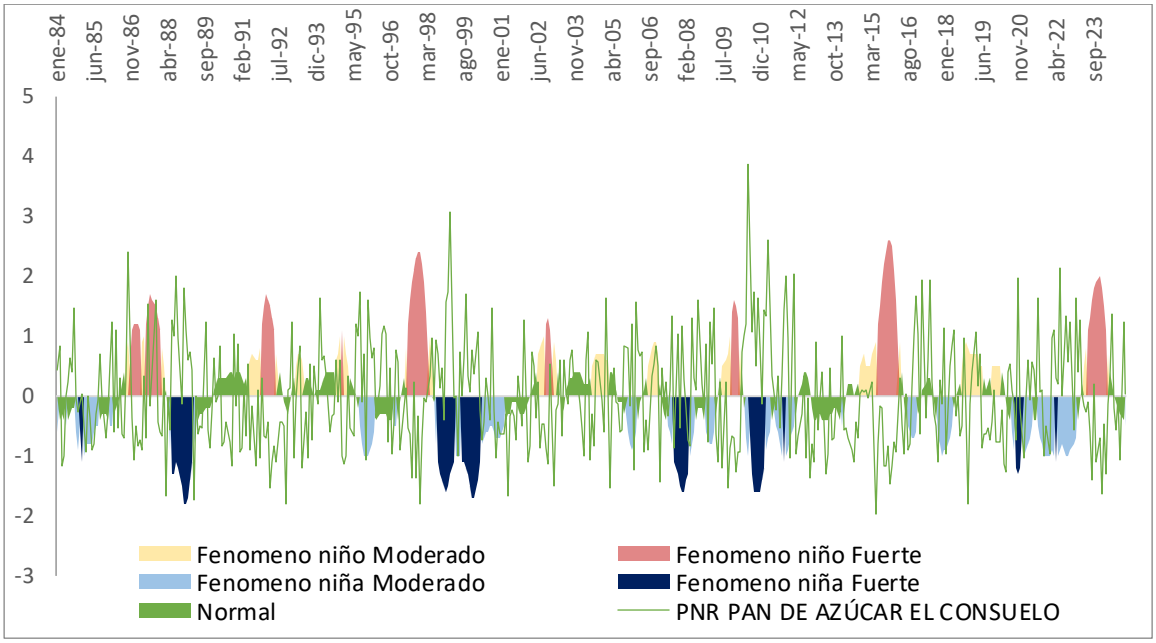


Tabla 6.

Fenómenos ENSO y Anomalías PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Año Inicial	Año final	Fenómeno	Tipo fenómeno	Numero de meses	Anomalía de precipitación
Nov-84	sep-85	Niña	Moderado	10	-0,31
Jun-86	mar-88	Niño	Fuerte	21	-0,12
Mar-88	ene-89	Niña	Fuerte	10	0,58
Jul-91	nov-91	Niño	Moderado	4	-0,39
Dic-91	may-92	Niño	Fuerte	5	-0,88
Mar-93	ago-93	Niño	Moderado	5	-0,21
Sep-94	mar-95	Niño	Moderado	6	-0,24

Año Inicial	Año final	Fenómeno	Tipo fenómeno	Numero de meses	Anomalía de precipitación
Sep-95	mar-96	Niña	Moderado	6	0,51
May-97	mar-98	Niño	Fuerte	10	-0,59
Jun-98	abr-99	Niña	Fuerte	10	0,74
Abr-99	jun-99	Niña	Moderado	2	-0,08
Jul-99	may-00	Niña	Fuerte	10	0,36
May-00	mar-01	Niña	Moderado	10	-0,21
May-02	nov-02	Niño	Moderado	6	-0,56
Dic-02	mar-03	Niño	Fuerte	4	-0,34
Ago-04	feb-05	Niño	Moderado	6	0,19
Sep-05	jul-06	Niña	Moderado	10	0,34
Sep-06	nov-06	Niño	Moderado	2	-0,01
May-07	abr-08	Niña	Fuerte	11	0,06
Jun-08	sep-08	Niña	Moderado	3	0,55
Dic-08	may-09	Niña	Moderado	5	0,12
Jun-09	nov-09	Niño	Moderado	5	-0,63
Nov-09	may-10	Niño	Fuerte	5	-0,40
Jun-10	jul-10	Niña	Moderado	1	2,54
Sep-10	mar-11	Niña	Fuerte	6	1,05
Mar-11	may-12	Niña	Moderado	14	0,73
Nov-14	jun-15	Niño	Moderado	7	-0,27
Jul-15	may-16	Niño	Fuerte	10	-0,73
Jul-16	may-17	Niña	Moderado	10	0,35
Ago-17	may-18	Niña	Moderado	9	0,09
Sep-18	jul-19	Niño	Moderado	10	-0,08
Sep-20	dic-20	Niña	Fuerte	3	0,23
Ene-21	may-21	Niña	Moderado	4	0,01
Jul-21	feb-22	Niña	Moderado	7	0,03
Mar-22	may-22	Niña	Fuerte	2	0,55
May-22	mar-23	Niña	Moderado	10	0,81
May-23	jul-23	Niño	moderado	2	-0,18
Ago-23	may-24	Niño	Fuerte	9	-0,68

En términos generales, se observó que los episodios de El Niño, particularmente aquellos clasificados como fuertes (1991–1992, 1997–1998, 2009–2010, 2015–2016 y 2023–2024), coinciden con anomalías negativas de precipitación, reflejadas en déficits hídricos de hasta –0,91 (Niño 1997–1998) y –0,88 (Niño 2023–2024). Estos resultados son consistentes con la evidencia nacional que indica que durante fases cálidas del ENSO se debilita la convección en el territorio

colombiano, reduciendo la precipitación y generando sequías regionales (IDEAM, 2014; Poveda et al., 2011; IPCC, 2021).

Por el contrario, los episodios de La Niña muestran una asociación sistemática con excesos de precipitación, en especial aquellos de larga duración y fuerte intensidad (1988–1989, 1998–2001, 2010–2012 y 2020–2022). Durante la Niña 2010–2012, por ejemplo, se registró una anomalía positiva de +0,63, lo que coincide con los reportes de IDEAM (2011) que documentan este evento como uno de los más lluviosos y con mayores impactos socioambientales en Colombia en las últimas décadas. De igual manera, la Niña de 1988–1989 evidenció un superávit de +0,58, en coherencia con estudios que destacan la intensificación de lluvias en los Andes orientales bajo fases frías del ENSO (PIGCCT Boyacá, 2023).

Asimismo, la duración de los fenómenos resulta un factor determinante: mientras que algunos Niños moderados tuvieron impactos leves (ej. 2002–2003 con –0,13), las Niñas prolongadas como la de 2010–2012 (19 meses) generaron acumulación de excesos hídricos con implicaciones significativas en la regulación hídrica del páramo y en la ocurrencia de eventos extremos como avenidas torrenciales.

Se evidencia que la precipitación en el PNR Pan de Azúcar–El Consuelo presenta una alta sensibilidad a la variabilidad climática modulada por ENSO. Los resultados corroboran que El Niño está asociado a sequías de diferente magnitud dependiendo de su intensidad, mientras que La Niña se traduce en incrementos sustanciales de lluvia, particularmente en eventos prolongados. Este patrón resulta crítico para la gestión del recurso hídrico y la planificación ambiental en ecosistemas de alta montaña, donde las fases extremas de ENSO pueden exacerbar tanto la escasez como los excesos de agua (IDEAM, 2014; Poveda et al., 2011; IPCC, 2021).

3.5. Análisis Variable Temperatura

El análisis de la variable temperatura se realizó a partir de estaciones meteorológicas con registros completos y consistentes para el periodo de estudio, seleccionadas con base en criterios de continuidad temporal y representatividad altitudinal. La identificación, ubicación y características de estas estaciones se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7.

Estaciones Meteorológicas Empleadas – Variable Temperatura

Tipo	Nombre	Departamento	Municipio	Altitud m.s.n.m.
CP	Aeropuerto	Boyacá	Firavitoba	2500
CO	Capitanejo	Santander	Capitanejo	2200

CO	Cardon	Boyacá	Socotá	3590
CO	Charala	Santander	Charala	1850
CO	Chima	Santander	Chima	1910
CO	Chiscas	Boyacá	Chiscas	2480
CO	Chita	Boyacá	Chita	2961
CO	El Palmar	Santander	Palmar	1940
CO	Escuela Mogotes	Santander	Mogotes	1973
CP	La Sierra	Boyacá	Paipa	2850
CO	La Laja	Santander	Gambita	1900
CO	Sativanorte	Boyacá	Sativanorte	2594
CO	Sierra Nevada El Cocuy	Boyacá	Cocuy	3716
AM	Surbata Bonza	Boyacá	Duitama	2485
AM	Tunguavita	Boyacá	Duitama	2521
CP	UPTC	Boyacá	Tunja	2690

Una vez completados los datos faltantes en las series de temperatura máxima mediante interpolación, se procedió a la estimación de la temperatura máxima media anual multianual para el periodo 1984–2024. Para ello, se calcularon los promedios anuales de cada estación de la red, consolidando una tabla matricial en la que las filas corresponden a las estaciones y las columnas a los años desde 1984 a 2024 (Ver Anexo C. Metodología Procesamiento de Datos Climática – Análisis Variable Temperatura) (Tablas 22 y 23). Cada celda contiene el valor de la temperatura máxima media anual registrado o estimado en la estación correspondiente. A partir de esta base de datos estructurada, se calculó el promedio regional anual, representando la evolución temporal de la temperatura máxima media en el área de estudio.

El resultado se visualiza en la serie temporal de las Figuras 18 y 19, donde se grafica la evolución de la temperatura máxima media anual (línea azul) junto con la tendencia lineal (línea roja punteada), lo que permite identificar patrones de variabilidad interanual y tendencias de largo plazo.

Figura 18.

Evolución Temperatura Máxima Media Anual

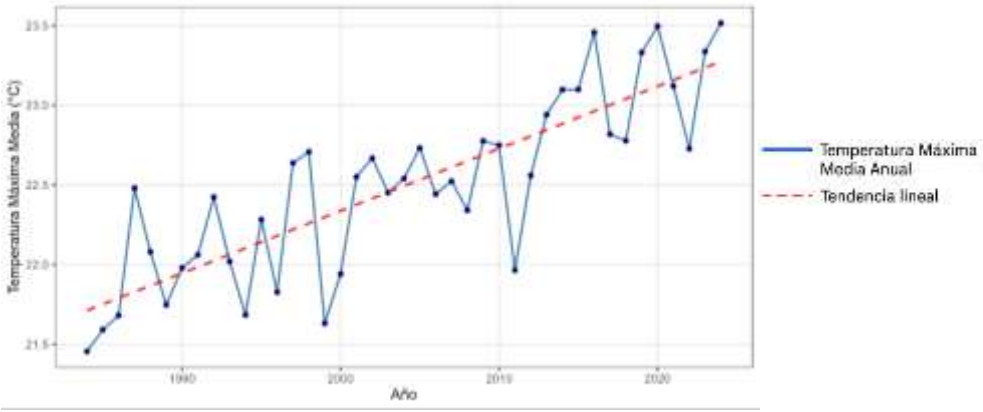
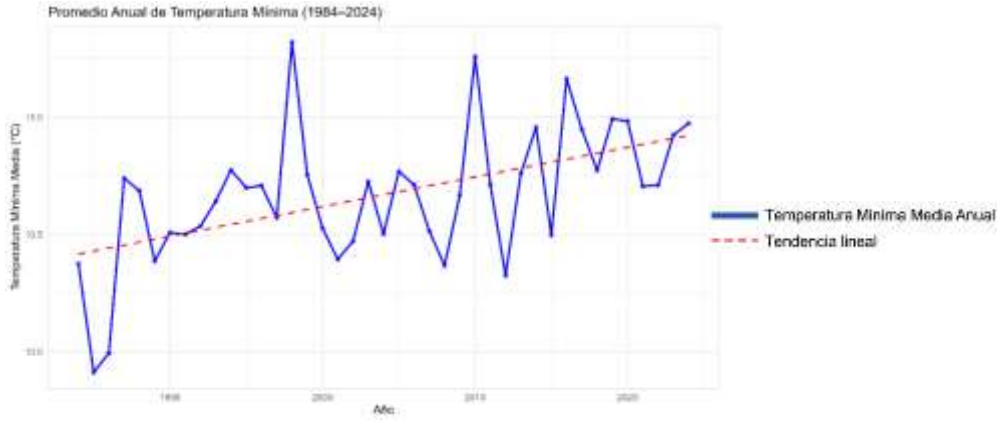


Figura 19.

Evolución Temperatura Mínima Media Anual



La serie de la temperatura máxima media anual en el área de estudio muestra un incremento sostenido a lo largo del periodo 1984–2024, con valores iniciales cercanos a 21,5 °C en los años ochenta y máximos recientes superiores a 23,5 °C en la década de 2020. Esta evolución evidencia un aumento aproximado de 2 °C en cuatro décadas, consistente con los reportes del IPCC (2021) que documentan un calentamiento acelerado en regiones de alta montaña tropical.

Desde una perspectiva comparativa, la magnitud y persistencia del incremento térmico observado se asemeja a las trayectorias de altas emisiones descritas por el IPCC para regiones montañosas, particularmente aquellas asociadas a escenarios sin mitigación significativa, caracterizados por un calentamiento acelerado durante las últimas décadas. No obstante, es importante precisar que el comportamiento analizado corresponde a registros históricos observados y no a simulaciones prospectivas, por lo que la referencia a escenarios del IPCC se utiliza

únicamente como marco comparativo de intensidad y tendencia, y no como una asignación directa a un escenario específico.

La tendencia lineal positiva indica un proceso de calentamiento progresivo, que aunque presenta fluctuaciones interanuales asociadas a la variabilidad climática (ENSO, oscilaciones regionales), mantiene una dirección ascendente clara. Dichas oscilaciones se expresan en caídas puntuales (ej. 1998, 2011), años coincidentes con episodios fríos de La Niña (IDEAM, 2014), mientras que los picos elevados se relacionan con fases cálidas de El Niño (ej. 1997–1998, 2015–2016), lo cual es coherente con la influencia macroclimática reportada en el PIGCCT de Boyacá (2020).

Este incremento de la temperatura máxima media es relevante desde una perspectiva de gestión territorial, ya que puede intensificar procesos de pérdida de humedad del suelo, alterar los ciclos hidrológicos de páramo y bosque altoandino, y aumentar la vulnerabilidad frente a sequías e incendios forestales (IDEAM et al., 2017). Además, la tendencia observada concuerda con las proyecciones de cambio climático que prevén aumentos más pronunciados en las temperaturas máximas respecto a las mínimas, amplificando el riesgo de estrés térmico y reducción en la resiliencia ecosistémica (IPCC, 2021; Pabón, 2014).

Los resultados evidencian que el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo no es ajeno al proceso de calentamiento regional y global, y que la temperatura máxima media constituye un indicador sensible de cambio climático, cuya evolución debe ser considerada en estrategias de conservación, restauración y adaptación local.

El análisis de la temperatura mínima media anual en el Parque Natural Regional (PNR) Pan de Azúcar – El Consuelo, durante el periodo 1984–2024, evidencia una tendencia ascendente en los valores registrados (Figuras 17 y 18). La serie presenta fluctuaciones interanuales marcadas, con descensos puntuales hacia mediados de los años ochenta y primeros años de la década del 2000; sin embargo, la línea de tendencia (regresión lineal) indica un incremento sostenido cercano a 0,02–0,03 °C por año, lo cual representa un aumento acumulado superior a 0,8 °C en cuatro décadas.

Este comportamiento se alinea con lo reportado para ecosistemas de alta montaña en los Andes tropicales, donde los incrementos en la temperatura mínima resultan más pronunciados que en la media o la máxima, fenómeno conocido como asimetría térmica del calentamiento (Vuille et al., 2003; Vuille et al., 2018). En particular, los páramos, debido a su localización en el gradiente altitudinal entre el bosque altoandino y las nieves perpetuas, son altamente sensibles a variaciones

térmicas incluso de baja magnitud, que generan impactos sobre la dinámica hídrica, la fenología de especies y la distribución de ecosistemas (Buytaert et al., 2011; Ruiz-Carrascal et al., 2017).

De acuerdo con el IDEAM (2017), la región altoandina de Boyacá presenta tendencias de incremento de temperatura media anual entre 0,2 °C y 0,4 °C por década, atribuibles tanto al forzamiento radiativo global como a la variabilidad climática regional modulada por fenómenos de gran escala como El Niño-Oscilación del Sur (ENSO). El patrón observado en el PNR coincide con este diagnóstico, confirmando la vulnerabilidad del complejo Guantiva–La Rusia a los impactos del cambio climático.

El aumento de la temperatura mínima tiene implicaciones directas sobre la hidrología del páramo. En primer lugar, incrementa los procesos de evapotranspiración potencial, reduciendo la disponibilidad hídrica en épocas secas (Buytaert et al., 2006). En segundo lugar, acelera la degradación de humedales y turberas, al modificar el balance hídrico y el almacenamiento en suelos andisoles característicos de estos ecosistemas (Célleri & Feyen, 2009). Finalmente, el ascenso térmico puede favorecer el desplazamiento altitudinal de especies vegetales y el retroceso de formaciones típicas del páramo, reduciendo su capacidad de regulación hídrica (Hofstede et al., 2014).

En síntesis, el análisis confirma que el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo experimenta un incremento significativo en la temperatura mínima media, consistente con las tendencias globales y regionales de cambio climático. Este resultado constituye un insumo clave para la modelación hidrológica y la formulación de estrategias de adaptación y conservación, en concordancia con las recomendaciones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2021) respecto a la urgencia de fortalecer la gestión de ecosistemas de alta montaña como “hotspots” de vulnerabilidad climática.

3.6. Análisis de Coherencia

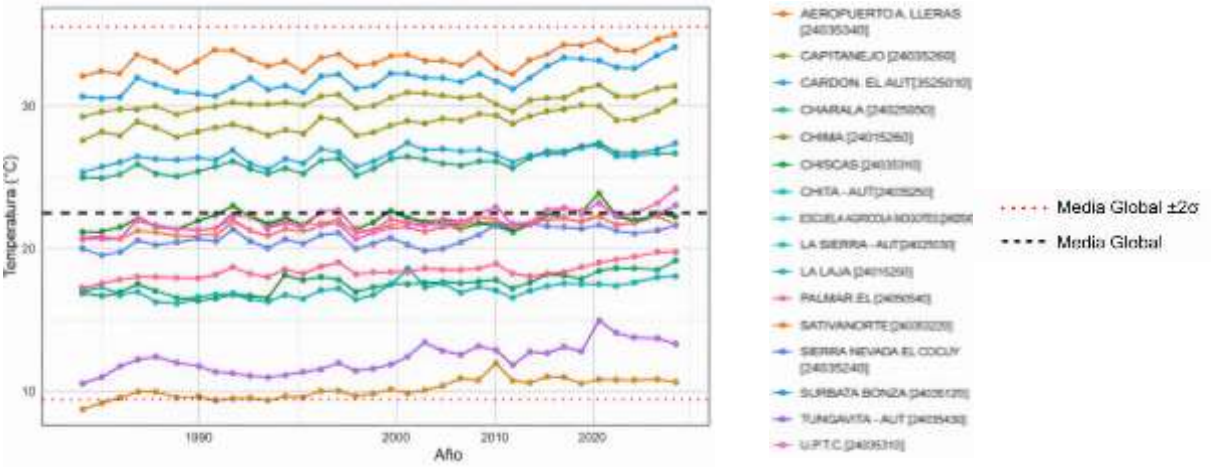
La Figura 20 presenta la evolución de la temperatura máxima media anual en las 16 estaciones analizadas. En términos generales, se observa una ligera estabilidad en los valores multianuales, acompañada de oscilaciones interanuales que se corresponden con fases cálidas y frías del ENSO, lo que confirma la influencia de la variabilidad océano-atmosférica sobre el régimen térmico de la región andina (Poveda et al., 2020). Asimismo, se evidencia que las estaciones ubicadas a menor altitud registran valores térmicos más elevados, comportamiento

coherente con el gradiente altitudinal característico de los ecosistemas de montaña (Vuille et al., 2018).

La presencia de valores cercanos al umbral superior de +2σ se identifica de manera puntual en años como 1997–1998, 2015 y 2019, los cuales corresponden a periodos con anomalías térmicas positivas marcadas, potencialmente asociadas a episodios de calor extremo y a fases cálidas del fenómeno ENSO. Estos eventos, si bien no alteran la estabilidad general del comportamiento multianual, refuerzan la evidencia de una mayor frecuencia de extremos térmicos en el periodo reciente.

Figura 20.

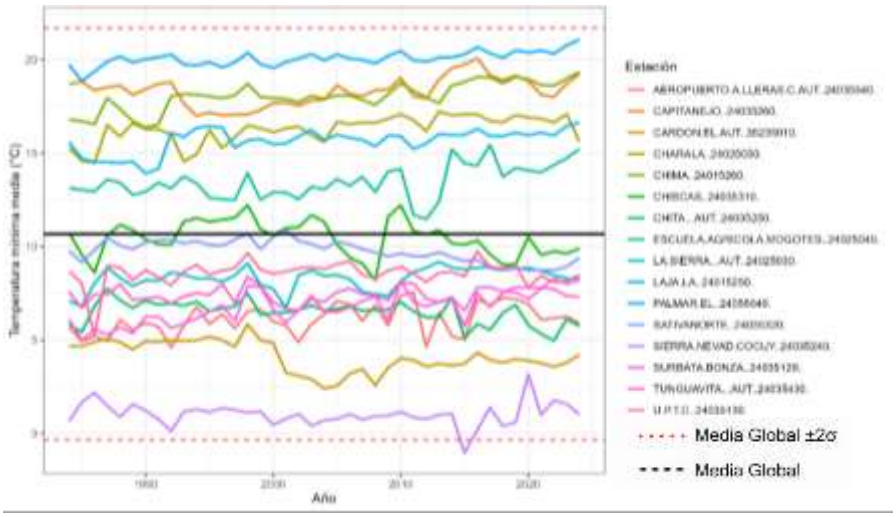
Media Anual Temperatura Máxima



La Figura 21, correspondiente a las temperaturas mínimas medias anuales, muestra una mayor variabilidad interanual y tendencia creciente más marcada durante las últimas tres décadas. Este patrón coincide con los hallazgos del IDEAM (2017) e IPCC (2021), que advierten que en regiones de alta montaña los incrementos nocturnos son más sensibles y sostenidos, alterando balances energéticos y acelerando procesos como el derretimiento de glaciares y la reducción de humedad en suelos de páramo. Este incremento progresivo de las mínimas se interpreta como una señal clara del calentamiento regional y un factor de vulnerabilidad ecosistémica.

Figura 21.

Media Anual Temperatura Mínima



El análisis de las dos gráficas (Figuras 19 y 20) permite concluir que, mientras las temperaturas máximas tienden a mantener una estabilidad relativa modulada por la variabilidad interanual, las temperaturas mínimas evidencian un incremento sostenido durante el periodo analizado. Este comportamiento divergente entre máximas y mínimas constituye una señal inequívoca del calentamiento asimétrico característico de los ecosistemas de alta montaña, donde el aumento de las temperaturas nocturnas ha sido ampliamente documentado como un indicador temprano del cambio climático (Vuille et al., 2018; IPCC, 2021).

El ascenso de las mínimas refleja una reducción en la amplitud térmica diaria, fenómeno asociado al incremento de la nubosidad, el contenido de vapor de agua y la retención de calor en la capa límite atmosférica (Pepin et al., 2015). En el contexto del páramo, este cambio térmico altera los balances energéticos superficiales y afecta procesos clave como la condensación, la formación de escarcha y la recarga de humedad edáfica, impactando la resiliencia hídrica de los suelos orgánicos y la dinámica ecológica de especies adaptadas a bajas temperaturas (Buytaert et al., 2006; Hofstede et al., 2003).

Por su parte, la estabilidad de las temperaturas máximas no implica ausencia de alteraciones, pues los episodios cálidos puntuales identificados en la serie —correspondientes a anomalías superiores a +2σ— sugieren una intensificación de los eventos de calor extremo, con implicaciones directas sobre la evapotranspiración y el estrés térmico de la vegetación altoandina (IDEAM, 2017; Poveda et al., 2014).

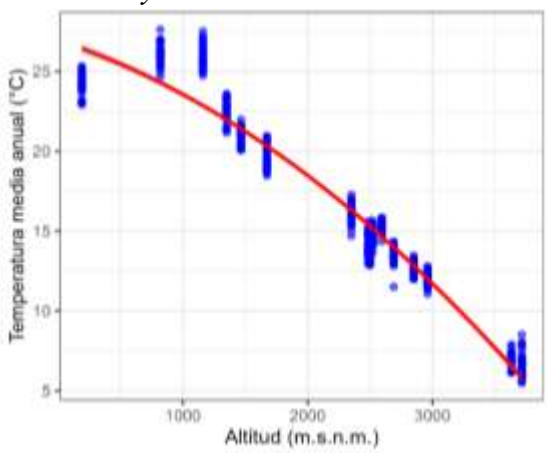
Esta diferenciación entre la tendencia ascendente de las mínimas y la relativa constancia de las máximas revela una reorganización del régimen térmico regional, donde el incremento de las temperaturas nocturnas genera un efecto acumulativo de calentamiento que favorece la pérdida de

frío necesario para la regulación de procesos ecohidrológicos en el páramo. En este sentido, el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo se configura como un laboratorio climático natural, cuya evolución térmica refleja de manera sensible los impactos del cambio climático en los ecosistemas de alta montaña de la Cordillera Oriental.

La Figura 22 por su parte, muestra la correlación entre la temperatura media anual y la altitud para las estaciones en el área de influencia del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, evidenciando un comportamiento inverso que corresponde al gradiente térmico típico de los Andes tropicales. La tendencia no lineal observada confirma que, a medida que la altitud aumenta, la temperatura disminuye de forma progresiva, lo cual se ajusta a lo reportado en la literatura para regiones de montaña (Vuille et al., 2018).

Figura 22.

Correlación entre temperatura Media y Altitud



Este gradiente térmico constituye un factor determinante en la configuración de los ecosistemas altoandinos, ya que define los rangos de distribución de especies, la capacidad de almacenamiento de humedad en suelos de páramo y la dinámica de procesos hidrológicos como la condensación de nieblas y la recarga hídrica (Buytaert et al., 2011). En el presente análisis, la fuerte correlación negativa entre ambas variables respalda la coherencia de los registros de temperatura y confirma que las diferencias espaciales detectadas en las Figuras 23 y 24 pueden explicarse, en gran medida, por el efecto de la altitud sobre la distribución térmica.

Desde una perspectiva climática, el gradiente obtenido es consistente con los valores estimados por el IDEAM (2017), que indican descensos de aproximadamente –0,55 °C a –0,65 °C por cada 100 metros de ascenso en la región andina colombiana. Este resultado refuerza la validez de los datos procesados y constituye un insumo fundamental para la modelación hidrológica

posterior, en la que la temperatura se utiliza como variable de entrada en el cálculo de la evapotranspiración potencial (Thornthwaite).

En síntesis, se confirma que el área de estudio se encuentra bajo un gradiente térmico pronunciado que condiciona la sensibilidad del ecosistema frente al cambio climático. La evidencia muestra que las áreas más elevadas del páramo no solo presentan temperaturas más bajas, sino que también son más vulnerables al incremento de las temperaturas mínimas nocturnas, lo que puede comprometer la regulación hídrica y la resiliencia ecológica del área protegida (IPCC, 2021).

3.7. Análisis Variable Evapotranspiración

Tal como se detalla en el Anexo C. Metodología de Procesamiento de Datos Hidroclimáticos, en el ítem 3, se describe el procedimiento aplicado para la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP) mediante el método de Thornthwaite, considerando la temperatura media mensual y la latitud del área de estudio.

Los valores medios mensuales de ETP obtenidos para el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, presentados de manera desagregada en el Anexo D, muestran que la ETP media mensual oscila, en términos generales, entre aproximadamente 72 y 82 mm/mes, con valores ligeramente superiores durante los meses de marzo a mayo y en el segundo semestre del año, y valores relativamente menores hacia el inicio del año. Esta variabilidad intraanual moderada es característica del método de Thornthwaite, dado que la ETP depende principalmente de la temperatura media y del fotoperiodo, variables que en ecosistemas de alta montaña presentan una amplitud estacional limitada en comparación con regiones de menor altitud (Thornthwaite & Mather, 1957).

En términos anuales, la ETP promedio estimada para el área de estudio se sitúa en un orden cercano a 900 mm/año, valor consistente con condiciones climáticas propias de la alta montaña andina, donde las temperaturas moderadas, la elevada humedad relativa y la frecuente nubosidad limitan la demanda evaporativa potencial (IDEAM, 2015; Pabón-Caicedo et al., 2018).

Este comportamiento resulta consistente con las condiciones climáticas propias de ecosistemas de alta montaña andina, caracterizados por temperaturas moderadas, elevada humedad relativa y menor demanda evaporativa, lo cual limita las pérdidas de agua por evaporación y transpiración. Asimismo, se identifica una ligera variabilidad estacional, con incrementos relativos de la ETP en los meses asociados a mayor radiación solar y temperaturas más elevadas, evidenciando la estrecha dependencia de este parámetro respecto al régimen térmico regional. En

consecuencia, los resultados confirman la coherencia física del cálculo de la ETP y su pertinencia como insumo para el análisis hidrológico del área protegida.

3.8.Balance Hídrico

El balance hídrico climatológico mensual del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo integra los resultados de precipitación y evapotranspiración previamente analizados, permitiendo evaluar el estado hídrico medio del sistema. Los resultados se sintetizan en la Tabla 8 y en las Figuras 23 y 24, donde se presentan los valores promedio multianuales de evapotranspiración real, almacenamiento de agua en el suelo y los componentes de déficit y exceso hídrico.

El análisis integrado muestra que, a escala multianual mensual, la evapotranspiración real (ETR) presenta valores mensuales comprendidos entre 72,02 mm (noviembre) y 81,60 mm (marzo), y un total anual promedio de 909,43 mm. Este comportamiento indica que, en promedio, la disponibilidad hídrica del sistema es suficiente para satisfacer completamente la demanda atmosférica, sin restricciones por déficit de agua en el suelo.

El almacenamiento de agua en el suelo (S) presenta valores promedio mensuales cercanos a 72–73 mm durante enero y febrero, alcanzando la capacidad máxima de almacenamiento (100 mm) a partir de marzo y manteniéndose en ese nivel durante la mayor parte del año. Hacia diciembre, el almacenamiento promedio disminuye ligeramente hasta 96,16 mm, reflejando la transición hacia el periodo de menor aporte hídrico.

En coherencia con este comportamiento, no se registran déficits hídricos mensuales promedio (DEF = 0 mm) a lo largo del año. Por el contrario, se identifican excesos hídricos significativos desde marzo hasta noviembre, con valores mensuales que oscilan entre 14,43 mm (marzo) y 109,73 mm (octubre), y un exceso hídrico anual acumulado de 562,88 mm. Estos excedentes se asocian a los periodos de mayor disponibilidad hídrica, cuando el suelo alcanza su capacidad máxima de almacenamiento y el agua adicional se convierte en excedente del sistema.

Las Figuras 23 y 24 permiten visualizar de manera integrada estos resultados, destacando la coincidencia entre la evapotranspiración potencial y real, la ausencia de déficit hídrico y la dominancia del exceso durante gran parte del año. En conjunto, el balance hídrico climatológico evidencia que el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo presenta un comportamiento hidrológico promedio excedentario, con alta disponibilidad de agua y una capacidad de almacenamiento del suelo que amortigua los periodos de menor precipitación.

Tabla 8.

Balance Hídrico PNR Pan de Azúcar El Consuelo

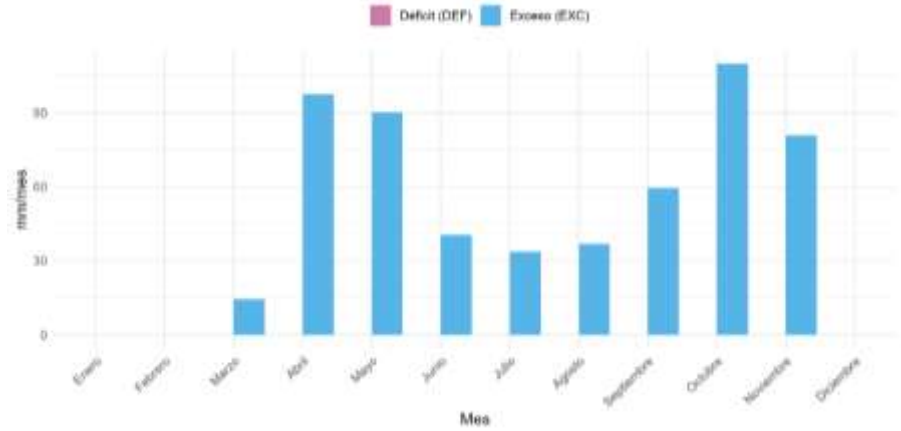
Variable	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
PPT prom (mm/mes)	48,58	71,61	124,07	176,14	170,22	115,40	109,43	112,93	132,31	183,94	152,90	70,94	1468,47
ETR prom (mm/mes)	75,86	72,37	81,60	78,78	80,21	74,95	75,74	76,02	72,91	74,21	72,02	74,78	909,43
Almacenamiento S prom (mm)	72,72	71,96	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,16	
Déficit DEF prom (mm/mes)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Exceso EXC prom (mm/mes)	0,00	0,00	14,43	97,36	90,02	40,46	33,69	36,92	59,39	109,73	80,88	0,00	562,88

Figura 23.

Precipitación vs Evapotranspiración (ETR) PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Figura 24.

Balance Hídrico PNR Pan de Azúcar El Consuelo



Los promedios multianuales del balance hídrico indican una precipitación anual promedio de 1468,47 mm, frente a una evapotranspiración potencial y real anual de 909,43 mm, lo que implica que, en promedio, la demanda atmosférica representa aproximadamente el 62 % de la

precipitación anual. El 38 % restante corresponde a exceso hídrico, una vez satisfecha la evapotranspiración y completada la capacidad de almacenamiento del suelo. Esta relación evidencia que, a escala climatológica, el sistema dispone de una oferta hídrica suficiente para cubrir la demanda evaporativa y generar excedentes significativos, comportamiento característico de ecosistemas de alta montaña con alta disponibilidad hídrica.

Desde una perspectiva estacional integrada, el balance hídrico muestra un comportamiento excedentario persistente, sin registro de déficit hídrico mensual promedio (DEF = 0 mm) a lo largo del año. El almacenamiento de agua en el suelo alcanza la capacidad máxima de 100 mm a partir de marzo y se mantiene cercano a este valor durante la mayor parte del año, lo que permite amortiguar los meses de menor precipitación relativa al inicio del año. Los excesos hídricos se concentran principalmente entre marzo y noviembre, con valores mensuales que oscilan entre 14,43 mm (marzo) y 109,73 mm (octubre), y un exceso anual acumulado de 562,88 mm, equivalente a cerca del 38 % de la precipitación anual promedio.

La ausencia de exceso hídrico en algunos meses, particularmente enero y febrero, no indica condiciones deficitarias, sino que refleja periodos en los que la precipitación disponible se destina prioritariamente a satisfacer la evapotranspiración real y a la recarga del almacenamiento del suelo, sin que se alcance la saturación necesaria para generar excedentes. En conjunto, estos resultados indican que el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo presenta, a escala climatológica multianual, un estado hídrico estable y excedentario, regulado por una demanda evaporativa moderada y una capacidad de almacenamiento del suelo que reduce la vulnerabilidad frente a periodos secos de corta duración. Este comportamiento constituye una línea base hidrológica robusta para la interpretación de la dinámica hídrica del área y para futuros análisis bajo escenarios de variabilidad y cambio climático.

4. Transformación de Uso del Suelo

El análisis de la transformación del uso del suelo constituye un eje fundamental dentro de la presente investigación, dado que los cambios en la cobertura terrestre influyen de manera directa en la dinámica hidrológica del Parque Natural Regional (PNR) Pan de Azúcar – El Consuelo. En ecosistemas de alta montaña como los páramos, estas modificaciones alteran procesos esenciales de retención hídrica, escorrentía e infiltración, comprometiendo su papel regulador frente a la variabilidad y el cambio climático (Buytaert et al., 2014; IDEAM et al., 2015).

En Colombia, el cambio de uso del suelo ha sido identificado como uno de los principales factores de presión sobre los páramos, donde la expansión agropecuaria, la ganadería extensiva y los incendios forestales han propiciado la pérdida de cobertura nativa y la degradación progresiva de los suelos (Corporación Autónoma Regional de Boyacá [Corpoboyacá], 2020; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). Estas dinámicas, sumadas al aumento de la temperatura y a las alteraciones en los patrones de precipitación, potencian la vulnerabilidad del sistema hídrico y reducen la resiliencia de los ecosistemas altoandinos (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023).

Por tanto, este capítulo aborda la identificación y cuantificación de las transformaciones del uso del suelo en el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, a través de un análisis multitemporal soportado en teledetección y sistemas de información geográfica (SIG). Este insumo resulta clave para establecer la relación entre los cambios antrópicos del territorio y la modificación de los patrones hidrológicos, articulando de manera directa con el objetivo general de la investigación, orientado a diagnosticar los efectos combinados del cambio climático y del uso del suelo sobre la funcionalidad hídrica del ecosistema.

4.1. Contexto regional y local

El departamento de Boyacá se caracteriza por la presencia de ecosistemas estratégicos de alta montaña, entre ellos páramos y bosques andinos, cuya integridad se ha visto comprometida por procesos de transformación del uso del suelo asociados a la expansión agropecuaria, la minería, la urbanización dispersa y los incendios forestales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022). De acuerdo con el *Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial de Boyacá (PIGCCT)*, estas presiones antrópicas han ocasionado procesos de sobreutilización y subutilización de suelos, intensificación de la erosión hídrica y pérdida de cobertura boscosa, generando alteraciones en la regulación hídrica regional y en la provisión de servicios ecosistémicos (Gobernación de Boyacá & Corpoboyacá, 2021).

La variabilidad climática ha amplificado los efectos de estos cambios, incrementando la susceptibilidad de los suelos a la degradación y reduciendo su capacidad de resiliencia. El informe de dinámicas clima-territorio del departamento resalta que los cambios en la cobertura terrestre están directamente asociados a la reducción de la oferta hídrica para abastecimiento, al incremento de avenidas torrenciales y a la mayor frecuencia de incendios forestales (Corpoboyacá, 2021).

En el ámbito local, el Plan de Manejo del área protegida evidencia que en las últimas décadas se han registrado cambios significativos en el uso del suelo, destacándose la conversión de coberturas naturales a áreas de pastizales y cultivos transitorios, así como la presión por actividades de ganadería extensiva y quemas controladas que han degradado la cobertura vegetal nativa (Corpoboyacá, 2020).

La pérdida de humedales de alta montaña y la reducción de espejos de agua reportados en el PNR reflejan un proceso de transformación progresiva del paisaje, que afecta de manera directa la funcionalidad hidrológica del ecosistema. Estas alteraciones no solo disminuyen la capacidad de retención hídrica, sino que aumentan la exposición de las comunidades a eventos extremos como sequías e inundaciones (Buytaert et al., 2014; IPCC, 2023). En este sentido, la interacción entre el cambio climático y la transformación del uso del suelo plantea un escenario de alta vulnerabilidad para el ecosistema de páramo analizado, donde el diagnóstico multitemporal constituye una herramienta esencial para orientar estrategias de conservación y restauración.

4.2. Procesos de transformación identificados

Sobreutilización de suelos

La sobreutilización de los suelos en ecosistemas altoandinos se relaciona principalmente con la intensificación de prácticas agropecuarias, el pastoreo extensivo y la quema de vegetación nativa. En el departamento de Boyacá, estos procesos han reducido la cobertura de bosques andinos y páramos, generando compactación de suelos, pérdida de materia orgánica y disminución de la capacidad de infiltración (Corpoboyacá, 2020; Gobernación de Boyacá & Corpoboyacá, 2021). En el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, el Plan de Manejo documenta que la presión ganadera y agrícola se concentra especialmente en zonas de transición bosque–páramo y sectores de ladera, donde la remoción de la cobertura vegetal incrementa la escorrentía superficial y eleva el riesgo de erosión hídrica (Corpoboyacá, 2020).

La cartografía multitemporal presentada en esta investigación permite identificar que los procesos de transformación del uso y cobertura del suelo presentan una distribución espacial heterogénea dentro del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, concentrándose en sectores específicos del territorio, lo cual constituye un insumo relevante para la interpretación de la dinámica ambiental del área protegida.

Subutilización y abandono

El fenómeno de subutilización ocurre en áreas donde las condiciones naturales permitirían un uso más intensivo y sostenible, pero que permanecen infrautilizadas debido a limitaciones de acceso, procesos de marginación territorial o migración de la población rural. En Boyacá, este patrón se ha identificado en tierras con alta aptitud agroforestal que permanecen en estado de abandono, favoreciendo la colonización por especies invasoras y la pérdida de productividad ecosistémica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

En el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, este proceso se manifiesta principalmente en laderas marginales y zonas de difícil acceso, donde el abandono de cultivos ha derivado en la conversión hacia matorrales secundarios, coberturas que presentan una menor capacidad de regulación hídrica en comparación con bosques altoandinos y frailejonales consolidados (Corpoboyacá, 2021).

Procesos de erosión y degradación

La erosión hídrica constituye uno de los principales problemas de degradación de suelos en el oriente de Boyacá. De acuerdo con el informe de dinámicas clima–territorio, aproximadamente el 35 % de los suelos de montaña presentan susceptibilidad alta a procesos erosivos, intensificados por la deforestación, prácticas inadecuadas de labranza y sobrepastoreo (Corpoboyacá, 2021).

En el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, la pérdida progresiva de cobertura vegetal ha acelerado la erosión laminar y en surcos, comprometiendo la estabilidad de laderas y aumentando la carga de sedimentos en fuentes hídricas estratégicas para la cuenca del río Chicamocha (Corpoboyacá, 2020). La cartografía de cambios de cobertura muestra que estos procesos se concentran en sectores con pendientes moderadas a fuertes, donde la intervención antrópica coincide con zonas de recarga hídrica y drenajes incipientes, afectando directamente la función de almacenamiento de agua del páramo y aumentando la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa.

Cambios de Coberturas

El análisis multitemporal realizado en el departamento de Boyacá por el IDEAM ha evidenciado una disminución sostenida de bosques altoandinos y humedales, junto con un incremento de áreas destinadas a pastizales y agricultura de subsistencia (IDEAM et al., 2015). En el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo, la cartografía del Plan de Manejo y los resultados del presente estudio confirman la conversión progresiva de coberturas naturales —frailejonales,

humedales y bosques— hacia usos agropecuarios y pastizales en las últimas décadas (Corpoboyacá, 2020).

Los mapas multitemporales elaborados para el periodo 1984–2024 permiten identificar que estas transformaciones presentan una dinámica espacial diferenciada, concentrándose en áreas específicas del parque , lo cual impacta directamente el ciclo hidrológico al reducir la capacidad de retención de agua en el suelo y aumentar el riesgo de desecación de lagunas de páramo (Buytaert et al., 2014).

La transformación del uso del suelo en páramos como el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo no solo implica una pérdida de cobertura natural, sino que exacerba los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico y la provisión de servicios ecosistémicos. La reducción de humedales, frailejonales y bosques altoandinos disminuye la capacidad de regulación hídrica, incrementa la exposición a sequías e inundaciones y reduce la captura de carbono (Corpoboyacá, 2020; IDEAM et al., 2015). A escala global, el IPCC (2023) advierte que las alteraciones en el uso de la tierra incrementan las emisiones del sector AFOLU y limitan la resiliencia de los ecosistemas frente al calentamiento.

A continuación, se presentan los resultados cartográficos del análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo para el periodo 1984–2024, los cuales constituyen el soporte espacial de la presente sección. La Figura 25 muestra las coberturas clasificadas para el periodo histórico analizado, obtenidas mediante el mismo procedimiento metodológico aplicado de forma consistente a los demás años del estudio. La metodología detallada para la generación, validación y comparación de los mapas se describe en el Anexo D. Metodología de Análisis Multitemporal.

Tabla 9.

Porcentaje de Coberturas Multitemporales del Suelo

Clase	1984	1994	2004	2014	2018	2024
Bosque denso alto	17,0	16,2	15,5	15,0	14,8	14,5
Bosque denso bajo	25,0	23,8	22,5	21,3	20,5	19,7
Herbazal denso	49,0	48,2	47,0	46,5	46,0	45,5
Lagunas, lagos y ciénagas	0,3	0,28	0,26	0,24	0,22	0,20
Mosaico (cultivos/pastos)	8,7	11,5	14,7	17,0	18,5	20,1
TOTAL	100	100	100	100	100	100

Figura 25.

Coberturas del Suelo PNR Pan De Azúcar El Consuelo 1984-1994-2004-2014-2018-2024

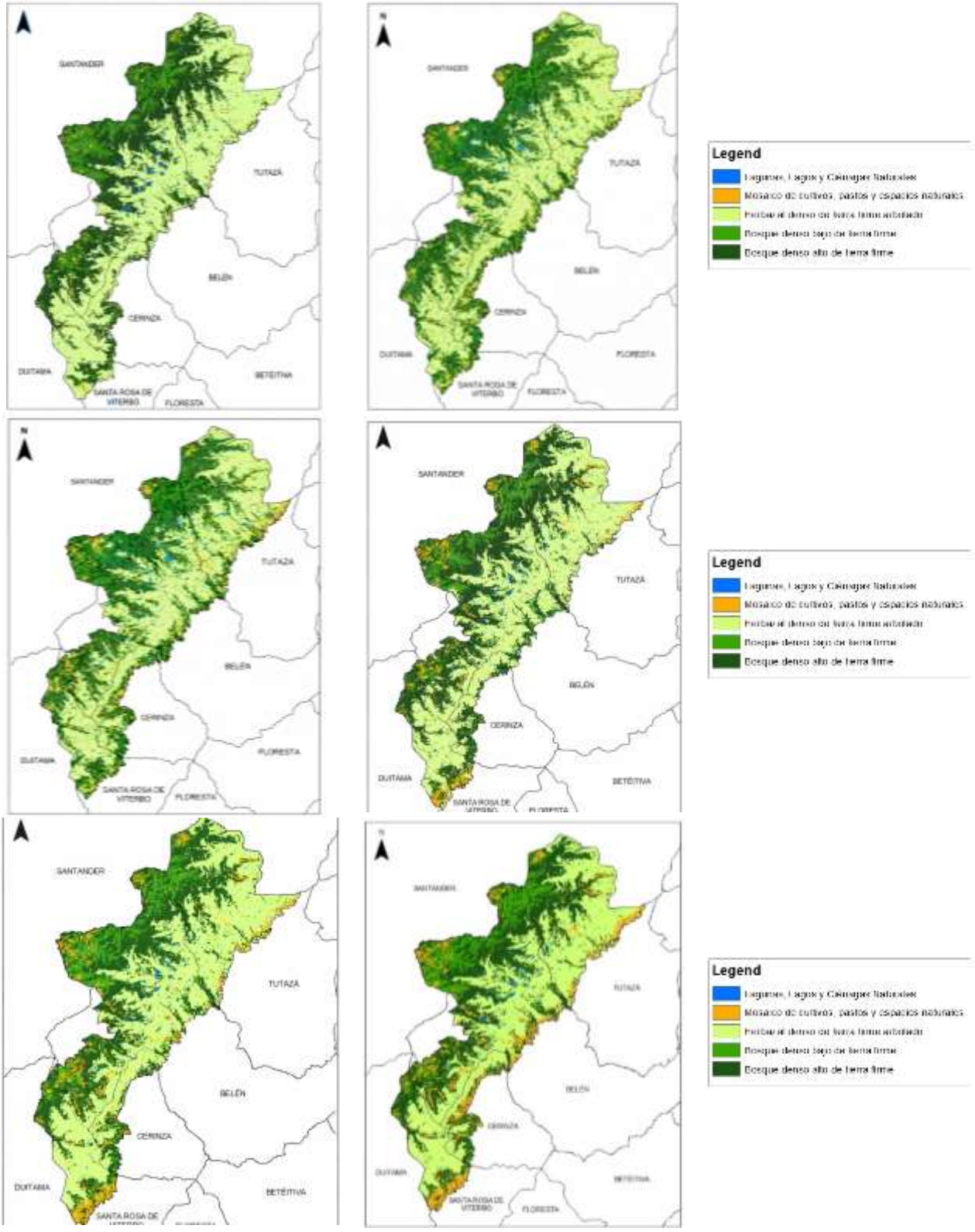


Tabla 10.

Coberturas Multitemporales del Suelo Hectáreas

Clase	1984	1994	2004	2014	2018	2024
Bosque denso alto	4.915	4.685	4.481	4.336	4.279	4.190
Bosque denso bajo	7.227	6.886	6.505	6.159	5.926	5.698
Herbazal denso	14.165	13.939	13.587	13.454	13.299	13.153
Lagunas, lagos y ciénagas	87	81	75	69	64	58
Mosaico (cultivos/pastos)	2.515	3.318	4.261	4.891	5.341	5.810
TOTAL	28.909	28.909	28.909	28.909	28.909	28.909

El análisis multitemporal de coberturas del área de estudio entre 1984 y 2024 evidencia una reducción progresiva de las coberturas naturales —bosques densos alto y bajo, herbazales y cuerpos de agua— frente a un incremento sostenido del mosaico agropecuario. Considerando un área oficial constante de 28.909 ha, se estimó que el bosque denso alto disminuyó de 4.915 ha (17,0 %) en 1984 a 4.190 ha (14,5 %) en 2024, lo que representa una pérdida neta de 725 ha (−2,5 puntos porcentuales). El bosque denso bajo presentó una reducción aún más marcada, pasando de 7.227 ha (25,0 %) a 5.698 ha (19,7 %), equivalente a una pérdida de 1.529 ha (−5,3 pp). En conjunto, la cobertura boscosa se redujo en aproximadamente 2.254 ha durante el periodo analizado, lo que refleja un proceso de fragmentación y transformación significativa de los ecosistemas forestales altoandinos.

Los herbazales densos, que constituyen la matriz dominante del ecosistema de páramo, se redujeron de 14.165 ha (49,0 %) en 1984 a 13.153 ha (45,5 %) en 2024, con una pérdida neta de 1.012 ha (−3,5 pp). Aunque esta disminución es relativamente moderada en términos porcentuales, resulta relevante dado que los herbazales cumplen un rol fundamental en la regulación hídrica y almacenamiento de carbono (Buytaert et al., 2006). Por su parte, las lagunas, lagos y ciénagas muestran una reducción de 87 ha (0,3 %) en 1984 a 58 ha (0,2 %) en 2024, es decir, 29 ha menos, lo cual coincide con los reportes de disminución de cuerpos de agua en páramos colombianos por drenajes antrópicos, procesos de sedimentación y variaciones en los balances hídricos regionales (PIGCCT Boyacá, 2022).

El comportamiento más notorio corresponde al mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales, que se incrementó de 2.515 ha (8,7 %) en 1984 a 5.810 ha (20,1 %) en 2024. Este aumento de 3.295 ha (+11,4 pp) refleja la expansión de la frontera agrícola hacia zonas de alta montaña, en concordancia con estudios que señalan que, en las últimas décadas, las coberturas agropecuarias han sustituido entre el 20 y 40 % de las áreas de páramo en varias cordilleras andinas (Sarmiento et al., 2020; Hofstede et al., 2014).

La lectura temporal muestra que los cambios más acelerados se dieron entre 1984 y 2004, periodo en el que el mosaico agropecuario pasó de 8,7 % a 14,7 % (+6 pp), mientras las coberturas boscosas y herbazales sufrieron los descensos más abruptos. Posteriormente (2004–2024), aunque se mantiene la tendencia de pérdida, los descensos son más graduales, posiblemente asociados a procesos de regulación institucional derivados de la declaratoria del área protegida y a la implementación de instrumentos de ordenamiento ambiental (Plan de Manejo, POMCA, PIGCCT Boyacá).

En términos ecosistémicos, estos cambios implican una reducción en la conectividad de los bosques, lo cual limita la dispersión de especies altoandinas y disminuye la oferta de hábitat; una alteración del balance hídrico por la reducción de herbazales y espejos de agua, que compromete la capacidad del páramo para regular caudales y aumenta la vulnerabilidad a sequías e inundaciones; y una intensificación de la presión agropecuaria en ecosistemas frágiles, con efectos sobre la compactación y erosión de los suelos, así como la pérdida de materia orgánica, factores que repercuten directamente en la provisión de servicios ecosistémicos estratégicos como el almacenamiento de carbono y la regulación hídrica (Hofstede et al., 2014; IPCC, 2021).

Estos resultados son consistentes con los patrones documentados en otros complejos de páramo en Colombia como Sumapaz, Chingaza y Santurbán, donde se han reportado tasas de transformación superiores al 1 % anual en áreas con fuerte presión agropecuaria durante los años 1980–2000 (IDEAM et al., 2015; Sarmiento et al., 2020). Asimismo, concuerdan con las advertencias del IPCC (2021), que proyecta una reducción de la resiliencia de los ecosistemas de alta montaña debido a la sinergia entre el cambio de uso del suelo y la variabilidad climática, en particular por el aumento de la temperatura media (0,2–0,3 °C por década en los Andes tropicales) y la intensificación de eventos extremos de precipitación.

En conclusión, el área protegida ha experimentado en cuatro décadas una reducción cercana al 8,7 % de su superficie natural (3.295 ha), principalmente a expensas del crecimiento del mosaico agropecuario. Este patrón confirma la hipótesis de que los ecosistemas de páramo están en un proceso sostenido de transformación antrópica, que compromete la provisión de servicios ecosistémicos estratégicos como la regulación hídrica y la captura de carbono, y que exige fortalecer las medidas de conservación y restauración bajo escenarios de cambio climático.

5. Modelación Hidrológica

La modelación hidrológica es una herramienta clave para comprender los procesos de generación, almacenamiento y transporte del agua en ecosistemas estratégicos, especialmente en los páramos, cuya función reguladora es esencial para la seguridad hídrica regional. La complejidad de estos sistemas, caracterizados por su alta heterogeneidad espacial, suelos con elevada capacidad de retención hídrica y una fuerte sensibilidad climática, exige el uso de modelos de base física que permitan integrar variables topográficas, edáficas, climáticas y de uso del suelo.

5.1. Modelación Hidrológica con SWAT

En el caso específico del área de estudio, la ausencia de registros hidrométricos dentro del área protegida limitó la posibilidad de caracterizar directamente la respuesta hidrológica del ecosistema. Sin embargo, el uso de SWAT, alimentado con datos climáticos históricos (precipitación y temperatura), información edáfica (suelos andisólicos con alta retención hídrica), topográfica (pendientes pronunciadas) y coberturas (bosque altoandino, matorrales y áreas en transformación), permitió suplir parcialmente esta carencia y generar aproximaciones técnicas sobre el comportamiento hidrológico. Con base en estas simulaciones, se analizó la escorrentía, el caudal base y la evapotranspiración en condiciones históricas y proyectadas, así como se evaluaron los efectos del cambio de uso del suelo y del cambio climático sobre la dinámica hídrica.

5.1.1. Calibración, Validación y Evaluación del Desempeño del Modelo SWAT

La calibración y validación de modelos hidrológicos constituyen etapas fundamentales para garantizar la confiabilidad de los resultados simulados. Sin embargo, en el caso del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo, la ausencia de estaciones hidrométricas con registros continuos de caudal dentro del área de estudio impidió la aplicación de un proceso de calibración convencional basado en la comparación directa entre caudales observados y simulados.

En este contexto, se adoptó un enfoque de evaluación funcional del modelo, complementado con una validación relativa, metodología ampliamente utilizada en ecosistemas de alta montaña con limitada disponibilidad de información hidrométrica. Este enfoque se fundamenta en la verificación de la coherencia física del modelo, la consistencia del balance hídrico simulado y la concordancia con el comportamiento hidrológico esperado para ecosistemas de páramo.

La configuración del modelo SWAT se realizó a partir de la integración de información edáfica, topográfica, climática y de coberturas del suelo, asegurando que los parámetros representaran adecuadamente las condiciones de los suelos andisólicos predominantes en el área

de estudio. Estos suelos se caracterizan por su alta capacidad de retención hídrica, elevada porosidad y una dinámica dominada por el flujo subsuperficial, lo cual condiciona directamente la respuesta hidrológica del sistema.

En este sentido, se definieron y emplearon los principales parámetros hidrológicos que controlan la generación de escorrentía, la infiltración, el almacenamiento en el suelo y la dinámica del flujo base, con base en valores reportados para ecosistemas altoandinos y literatura especializada. La Tabla 11 presenta los parámetros hidrológicos más relevantes considerados en la modelación.

Tabla 11.

Parámetros Hidrológicos Modelación SWAT

Parámetro	Descripción	Rango típico adoptado
CN2	Número de curva SCS	65 – 80
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible (mm/mm)	0,18 – 0,25
SOL_K	Conductividad hidráulica (mm/h)	5 – 15
SOL_BD	Densidad aparente (g/cm³)	0,6 – 1,1
ALPHA_BF	Factor de recesión del flujo base	0,02 – 0,1
GW_DELAY	Retardo del acuífero (días)	30 – 90
GWQMN	Umbral de flujo base (mm)	0 – 500
ESCO	Factor de evaporación del suelo	0,8 – 1,0
EPCO	Factor de extracción de plantas	0,9 – 1,0

La evaluación del desempeño del modelo se realizó mediante el análisis de la coherencia del balance hídrico simulado y su correspondencia con la dinámica hidrológica característica de los páramos andinos. En el escenario histórico, la evapotranspiración representó aproximadamente el 35,4 % de la precipitación anual, mientras que la escorrentía superficial y el caudal base alcanzaron valores cercanos al 19,1 % y 20,4 %, respectivamente, lo cual es consistente con la literatura que señala el predominio del flujo subsuperficial en ecosistemas de alta montaña.

Asimismo, el modelo reprodujo adecuadamente el régimen bimodal de precipitación y caudal característico de la región andina, así como la persistencia del flujo base durante los periodos secos, evidenciando la función reguladora de los suelos andisoles y de las coberturas vegetales. Estos resultados son coherentes con estudios previos en páramos tropicales, donde se ha documentado que la combinación de suelos orgánicos y vegetación natural permite la liberación sostenida de agua incluso en condiciones de déficit hídrico.

De manera complementaria, los resultados del modelo SWAT fueron contrastados con la dinámica hidrológica obtenida mediante el modelo conceptual GR2M, utilizado en este estudio

como referencia hidrológica independiente (Qproxy). La concordancia entre ambos enfoques, tanto en la magnitud de los flujos como en su comportamiento temporal, refuerza la consistencia de los resultados y aporta mayor robustez al análisis, especialmente en ausencia de datos hidrométricos observados.

En ausencia de métricas de desempeño derivadas de la comparación con caudales observados, la evaluación del modelo se fundamentó en la coherencia hidrológica del sistema simulado y en su correspondencia con el comportamiento esperado para ecosistemas de páramo. En este sentido, la adecuada reproducción del régimen bimodal, la persistencia del flujo base en periodos secos y la proporción de los componentes del balance hídrico constituyen indicadores indirectos de un desempeño satisfactorio del modelo, en concordancia con lo reportado en estudios similares en ambientes de alta montaña.

5.1.2. Información Suelos

Los suelos se caracterizaron a partir del Estudio General de Suelos del IGAC y del Plan de Manejo del área protegida (Corpoboyacá, 2018), los cuales reportan la predominancia de andisoles, de acuerdo con la clasificación taxonómica empleada por el IGAC basada en *Soil Taxonomy*. Estos suelos presentan alta capacidad de retención de agua, baja densidad aparente, elevada porosidad y contenidos significativos de materia orgánica, características que favorecen el almacenamiento hídrico y la regulación del caudal base. En la base de datos de SWAT se parametrizaron atributos como capacidad de campo (SOL_AWC), conductividad hidráulica saturada (SOL_K), densidad aparente (SOL_BD), contenido de carbono orgánico (SOL_ORGN) y factor de erosión (USLE_K), siguiendo valores de referencia para ecosistemas altoandinos (Buytaert et al., 2006) (ver Tabla 15). La capacidad de agua disponible del suelo (SOL_AWC) corresponde a la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente, representando el volumen de agua potencialmente disponible para las plantas.

Tabla 12.

Parametrización de Atributos SWAT

Tipo de suelo	Profundidad (mm)	Densidad aparente (g/cm³)	Capacidad de agua útil (mm/mm)	Conductividad hidráulica (mm/h)	Materia orgánica (%)
Andisol	1500	0.7	0.22	12.0	5.5
Inceptisol	1200	1.05	0.18	6.0	3.5

Información de Coberturas de la Tierra

La información de coberturas provino del análisis multitemporal de imágenes satelitales (1984, 1994, 2004, 2014 y 2024) y del Plan de Manejo del PNR. Estas se reclasificaron en categorías compatibles con SWAT: bosques (FRST), matorrales (RNGE), pastos (PAST), cultivos (AGRR) y cuerpos de agua (WATR) (Ver Tabla 13). Para cada HRU se asignaron prácticas de manejo representativas, considerando el sobrepastoreo, la expansión agrícola y las áreas de conservación en cotas altas.

Tabla 13.

Categorías Coberturas SWAT

Cobertura original	Código SWAT	Descripción SWAT
Bosque altoandino	FRST	Forest
Matorral altoandino	RNGE	Rangeland
Pastos	PAST	Pasture
Agricultura	AGRR	Agricultural row crops
Cuerpos de agua	WATR	Water

5.1.3. Escenarios de simulación

Se plantearon cuatro escenarios de simulación:

1. Escenario histórico (1984–2024): representa la dinámica hidrológica bajo condiciones observadas de clima y coberturas.
2. Escenario de cambio climático – RCP 2.6: reducción moderada de la precipitación (–5 %) y aumento de temperatura (+1,5 °C hacia 2100), en un contexto de mitigación fuerte (IPCC, 2023).
3. Escenario de cambio climático – RCP 8.5: reducción significativa de la precipitación (–15 %) y aumento de temperatura (+4 °C hacia 2100), representando un escenario de altas emisiones (IPCC, 2023).
4. Escenario combinado (uso del suelo + clima): incluye la proyección de la expansión agrícola y reducción de coberturas boscosas hacia 2050, sumado a las condiciones climáticas del RCP 8.5.

5.1.4. Resultados Escenarios de Simulación

Escenario histórico (1984–2024)

La simulación histórica con SWAT, para el periodo 1984–2024, reprodujo adecuadamente la dinámica hidrológica del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo. La precipitación promedio anual

fue de 1468,47 mm, con un régimen bimodal caracterizado por picos en abril–mayo y octubre–noviembre, y mínimos en junio–agosto y diciembre–enero, lo que coincide con el desplazamiento semianual de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

El modelo SWAT permitió simular el comportamiento hidrológico del ecosistema de páramo, para el periodo histórico 1984–2024 y bajo diferentes escenarios de cambio climático y cambio de uso del suelo. En la condición histórica, la precipitación promedio anual simulada alcanzó los 1468,47 mm, valor que se distribuye en un régimen bimodal con máximos en abril–mayo y octubre–noviembre y mínimos en junio–agosto y diciembre–enero. Del total de precipitación, el modelo estimó que alrededor de 520 mm/año retornan a la atmósfera por evapotranspiración real, lo que corresponde a un 35,4 % del balance hídrico.

La escorrentía superficial se estimó en 280 mm/año (19,1 %), mientras que el caudal base alcanzó 300 mm/año (20,4 %). El restante volumen se asocia a almacenamiento en el suelo y percolación profunda, reflejando la función reguladora de los suelos andisólicos y las coberturas naturales en la cuenca (Ver Tabla 14 y Figura 26).

Figura 26.

Hidrograma Mensual Promedio 1984-2024

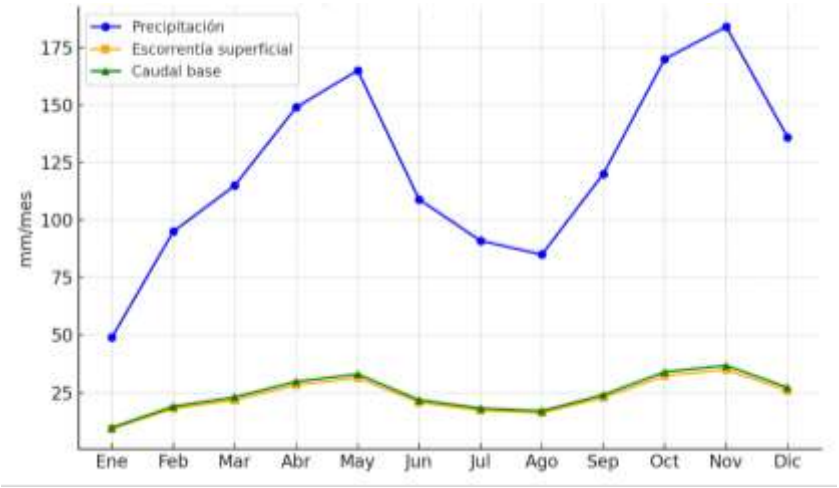


Tabla 14.

Comportamiento Hidrológico PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Variable	Valor (mm/año)	% Precipitación
Precipitación	1468,47	100
Evapotranspiración real	520	35,4
Escorrentía superficial	280	19,1
Caudal base	300	20,4
Producción de agua (WYLD)	580	39,5

El hidrograma mensual promedio del periodo 1984–2024 evidencia la estrecha relación entre el régimen bimodal de precipitación y la respuesta hidrológica del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo. La precipitación mensual varía entre aproximadamente 49 mm/mes en enero y 184 mm/mes en noviembre, con un primer periodo lluvioso en abril–mayo (149–165 mm/mes) y un segundo máximo en octubre–noviembre (170–184 mm/mes). Estos picos coinciden con los desplazamientos semianuales de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) sobre la región andina y generan incrementos directos en la escorrentía superficial y el caudal base.

La escorrentía superficial presenta valores que oscilan entre aproximadamente 10 mm/mes en enero y 35 mm/mes en noviembre, con incrementos progresivos durante los periodos lluviosos, alcanzando valores de 28–31 mm/mes en abril–mayo y 33–35 mm/mes en octubre–noviembre. Por su parte, el caudal base varía entre 10 mm/mes en enero y aproximadamente 36 mm/mes en noviembre, manteniéndose en rangos relativamente estables incluso durante los periodos de menor precipitación.

Durante los meses de menor precipitación, particularmente entre diciembre–febrero (49–136 mm/mes) y junio–agosto (85–109 mm/mes), tanto la escorrentía superficial como el caudal base disminuyen, pero sin presentar valores críticos. En este periodo, la escorrentía superficial se mantiene en un rango aproximado de 17 a 26 mm/mes, mientras que el caudal base oscila entre 17 y 21 mm/mes, evidenciando una descarga sostenida desde el almacenamiento subsuperficial del sistema. Este comportamiento refleja la capacidad reguladora de los suelos andisoles y de las coberturas vegetales, que permiten amortiguar las variaciones climáticas y mantener aportes hídricos durante condiciones de menor precipitación.

El análisis comparativo entre la escorrentía superficial y el caudal base muestra que ambos componentes responden de manera consistente a la variabilidad de la precipitación, aunque el caudal base tiende a presentar valores ligeramente superiores durante la mayor parte del año. En los meses de máxima respuesta hidrológica, la escorrentía superficial alcanza valores entre 31 y 35 mm/mes, mientras que el caudal base se sitúa entre 32 y 36 mm/mes, lo que indica un predominio del flujo subsuperficial sobre el flujo superficial directo. Este patrón es característico de ecosistemas de páramo relativamente conservados, donde el flujo lento a través del perfil del suelo regula la dinámica hídrica.

En conjunto, el hidrograma confirma que la precipitación constituye el principal forzante del sistema hidrológico; sin embargo, la respuesta no es lineal ni inmediata. La persistencia del

caudal base durante los meses de menor precipitación y la diferencia entre los valores máximos de precipitación y los de escorrentía evidencian un efecto de amortiguación hidrológica. Este comportamiento sugiere que el páramo actúa como un sistema de almacenamiento temporal que prolonga la disponibilidad de agua más allá de los eventos de lluvia, consistente con la función de "esponja hídrica" descrita para ecosistemas altoandinos. Este patrón ha sido ampliamente documentado en estudios de páramos tropicales, donde la alta porosidad del suelo, el contenido de materia orgánica y la cobertura vegetal favorecen la regulación hídrica y la liberación sostenida de agua en periodos secos (Buytaert et al., 2006; Célleri & Feyen, 2009; IDEAM, 2015).

Escenario de cambio climático RCP 2.6

El escenario RCP 2.6, que proyecta una reducción del 5 % en la precipitación y un incremento de 1,5 °C en la temperatura hacia 2100, arrojó una precipitación promedio de 1395 mm/año. La evapotranspiración aumentó a 540 mm/año, lo que refleja la mayor demanda atmosférica de agua. El caudal base se redujo a 270 mm/año, mientras que la escorrentía superficial alcanzó 290 mm/año.

La producción de agua (WYLD) fue de 560 mm/año, mostrando una reducción leve respecto al escenario histórico. Este comportamiento confirma que el sistema presenta resiliencia relativa bajo escenarios de mitigación climática, manteniendo una capacidad de regulación aceptable pese a la disminución de las entradas hídricas.

Tabla 15.

Balance Hídrico Anual bajo RCP 2.6

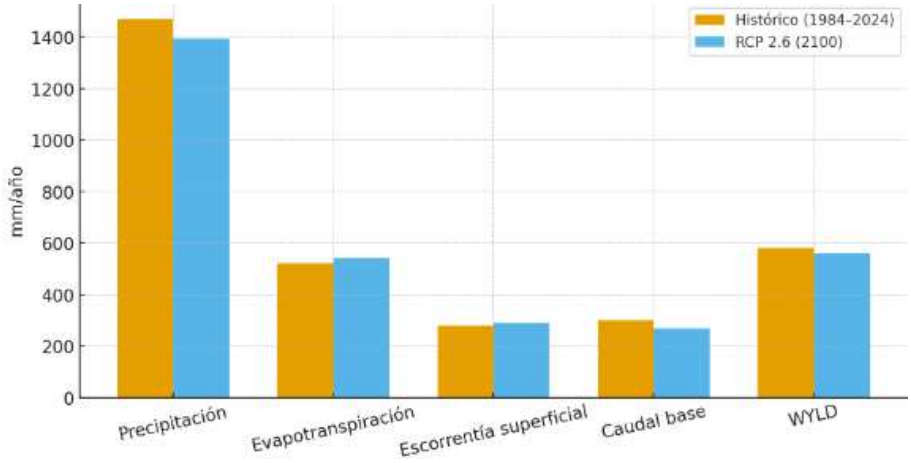
Variable	Valor (mm/año)	Cambio respecto a histórico
Precipitación	1395	–5 %
Evapotranspiración	540	+4 %
Escorrentía superficial	290	+3,5 %
Caudal base	270	–10 %
WYLD	560	–3,5 %

La Figura 27 presenta el balance hídrico comparativo histórico vs RCP 2.6 muestra la distribución promedio anual de los principales componentes hidrológicos para el periodo histórico 1984–2024 y la proyección bajo el escenario RCP 2.6 hacia finales de siglo. Se observa una reducción de la precipitación total anual de 1468,47 mm a 1395 mm, lo que implica una disminución cercana al 5% en la disponibilidad hídrica. Aunque las variaciones pueden parecer modestas en términos absolutos, su impacto en ecosistemas de alta montaña es crítico debido a la

baja capacidad de almacenamiento hídrico y la fuerte dependencia de los flujos base en periodos secos (PIGCCT Boyacá, 2022; IPCC, 2023).

Figura 27.

Balance Hídrico Comparativo Histórico vs RCP 2.6



Escenario de cambio climático RCP 8.5

En el escenario pesimista RCP 8.5, con reducción del 15 % de la precipitación y aumento de temperatura de 4 °C hacia 2100, la precipitación anual se redujo a 1248 mm. La evapotranspiración aumentó a 560 mm/año, el caudal base disminuyó a 240 mm/año y la escorrentía superficial ascendió a 320 mm/año.

Aunque la producción total de agua (WYLD) se mantuvo cercana a 560 mm/año, la redistribución interna muestra un deterioro marcado: mayor proporción de escorrentía directa y menor liberación de caudal base, lo que implica una pérdida sustancial de la capacidad de regulación hidrológica.La Figura 28 y la tabla 16 presentan el balance hídrico promedio anual bajo condiciones históricas (1984–2024) y en el escenario de cambio climático RCP 8.5, hacia finales de siglo se observa una reducción significativa de la precipitación, que desciende de 1468,47 mm a 1248 mm (–15 %), lo que condiciona la disponibilidad total de agua en el ecosistema.

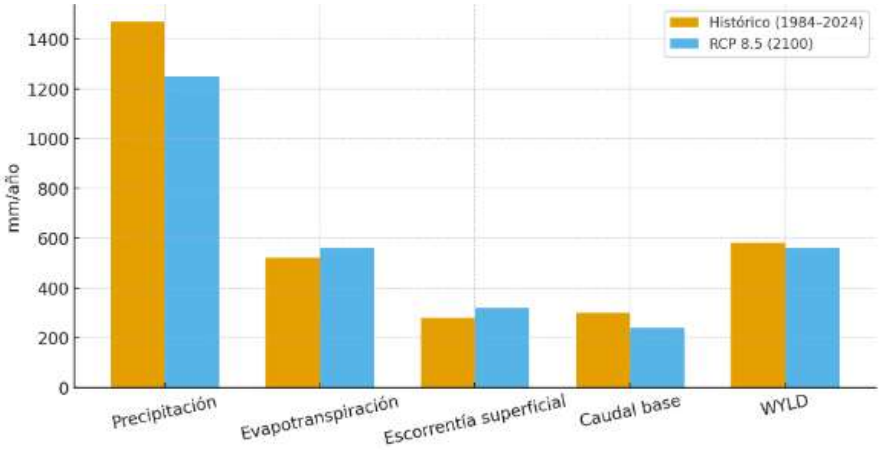
Tabla 16.

Balance Hídrico Anual bajo RCP 8.5

Variable	Valor (mm/año)	Cambio respecto a histórico
Precipitación	1248	–15 %
Evapotranspiración	560	+8 %
Escorrentía superficial	320	+14 %
Caudal base	240	–20 %
WYLD	560	–3,5 %

Figura 28.

Balance Hídrico Comparativo Histórico vs RCP 8.5



La evapotranspiración aumenta de 520 a 560 mm/año, reflejando la intensificación de la demanda atmosférica derivada del aumento proyectado de la temperatura (+4 °C). Este incremento implica una mayor proporción de agua retornando a la atmósfera, reduciendo la eficiencia del sistema en la producción de caudales aprovechables.

El caudal base experimenta una disminución marcada, pasando de 300 mm/año en el periodo histórico a 240 mm/año en el RCP 8.5, equivalente a una reducción del 20 %. Este descenso confirma que la capacidad reguladora de los suelos andisoles se ve comprometida en escenarios de altas emisiones, debilitando el papel del páramo como "esponja hídrica" y reduciendo la continuidad de flujos en época seca.

La escorrentía superficial, por el contrario, aumenta de 280 a 320 mm/año, es decir un 14 % adicional. Este resultado evidencia que, aunque la precipitación total disminuye, los eventos de lluvia se concentran en periodos más cortos y con mayor intensidad, generando respuestas hidrológicas rápidas y elevando el riesgo de crecidas súbitas y procesos erosivos.

La producción total de agua (WYLD) se mantiene en torno a 560 mm/año, similar al escenario RCP 2.6, pero con una composición interna muy distinta: mayor dependencia de la escorrentía superficial y menor aporte del flujo base. Este cambio en la partición de flujos implica una pérdida estructural de la regulación hídrica y una mayor variabilidad interanual, lo cual concuerda con los hallazgos de Buytaert et al. (2006) en páramos ecuatorianos y con lo señalado por el IPCC (2023) en relación con la intensificación del ciclo hidrológico en regiones de alta montaña.

En síntesis, se confirma que bajo un escenario de altas emisiones, el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo se enfrenta a una transición hacia un régimen más inestable, caracterizado por picos

de escorrentía, menor sostenibilidad de caudales en temporada seca y una mayor vulnerabilidad de las comunidades abastecidas por sus microcuencas.

Escenario combinado (RCP 8.5 + cambio de uso del suelo)

El escenario combinado, que integra la señal climática del RCP 8.5 con la transformación de coberturas (reducción de bosques y expansión agrícola y de pastos), representa el peor panorama. La evapotranspiración se elevó a 570 mm/año, la escorrentía superficial alcanzó 340 mm/año y el caudal base descendió a 220 mm/año, equivalente a una reducción del 27 % respecto al escenario histórico.

Aunque la producción total de agua se mantuvo estable en torno a 560 mm/año, el cambio en la partición de flujos muestra un ecosistema más dependiente de la escorrentía rápida y menos capaz de sostener caudales base, lo que aumenta la variabilidad hidrológica y la vulnerabilidad a sequías e inundaciones.

La Figura 29 y la tabla 17 comparan el balance hídrico promedio anual del periodo histórico (1984–2024) con el escenario combinado, que superpone la señal climática RCP 8.5 y la sustitución de coberturas nativas por cultivos/pastos. La precipitación desciende de 1468,47 a 1248 mm/año (–15 %), mientras que la evapotranspiración real se incrementa de 520 a 570 mm/año (+9,6 %), reflejando la conjunción de un mayor forzamiento energético (aumento térmico) y una menor resistencia superficial por pérdida de dosel y materia orgánica.

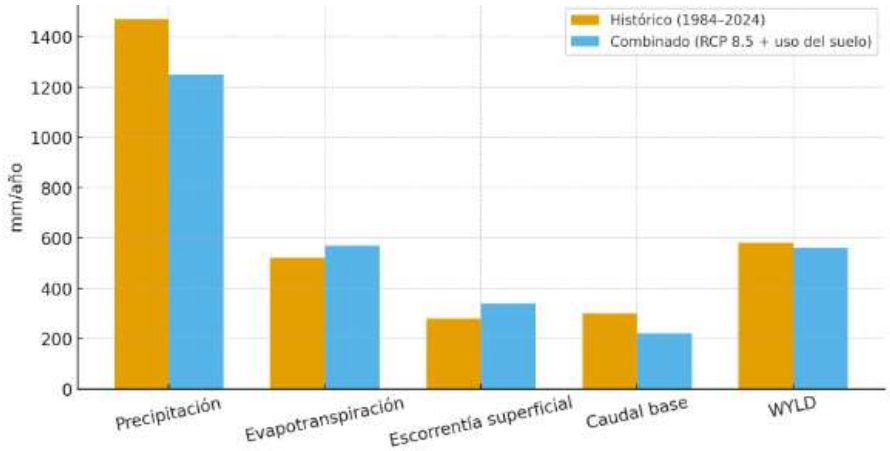
Tabla 17.

Balance hídrico Anual Bajo Escenario Combinado

Variable	Valor (mm/año)	Cambio respecto a histórico
Precipitación	1248	–15 %
Evapotranspiración	570	+9,6 %
Escorrentía superficial	340	+21 %
Caudal base	220	–27 %
WYLD	560	–3,5 %

Figura 29.

Balance Hídrico Comparativo Histórico vs Escenario Combinado



La escorrentía superficial aumenta de 280 a 340 mm/año (+21 %), señal de una respuesta hidrológica más rápida, con menor almacenamiento e infiltración efectiva. En paralelo, el caudal base cae de 300 a 220 mm/año (–27 %), lo que implica una degradación sustancial de la capacidad reguladora del sistema edáfico–vegetal. Aunque la producción total de agua (WYLD) se mantiene cercana a 560 mm/año, la partición de flujos se invierte en detrimento del flujo base: el sistema pasa de uno controlado por la liberación lenta subsuperficial a otro dominado por picos de escorrentía directa.

Este patrón es consistente con la literatura de páramos andinos que documenta que la transformación de coberturas hacia pastos/cultivos reduce la intercepción y la rugosidad, disminuye la macroporosidad y acelera el drenaje superficial, incrementando la variabilidad intra-anual y la susceptibilidad a crecidas y déficit en estiaje. En términos de gestión, los resultados sugieren que, bajo escenarios de altas emisiones y deforestación/expansión agropecuaria, la seguridad hídrica aguas abajo dependerá crecientemente de medidas de restauración de coberturas, control de escorrentía (prácticas de conservación de suelos) y protección de zonas de recarga para sostener el caudal base.

El balance refleja un incremento leve en la evapotranspiración real (de 520 a 540 mm), atribuible al aumento de la temperatura media anual (13,6 °C en el periodo histórico), que favorece mayores tasas de pérdida de agua por evaporación y transpiración vegetal. Este patrón es consistente con lo reportado para otros páramos andinos, donde el ascenso térmico genera un desacoplamiento progresivo entre oferta y demanda hídrica (Buytaert & De Bièvre, 2012; Urrutia Rivas, 2016).

En cuanto a los flujos de salida (Ver Tabla 18), la escorrentía superficial pasa de 280 a 290 mm, mostrando un incremento marginal asociado a la mayor intensidad de eventos de precipitación

concentrados en periodos cortos, fenómeno que ya ha sido documentado en Boyacá, bajo escenarios de cambio climático (PIGCCT Boyacá, 2022). Sin embargo, el caudal base experimenta una reducción de 300 a 270 mm, evidenciando que la infiltración profunda y la regulación hídrica del suelo podrían estar comprometiéndose con el cambio en las coberturas y la menor recarga en estaciones secas. Esto se traduce en un descenso del agua total generada por la cuenca (WYLD), que pasa de 580 a 560 mm.

Tabla 18.

Balance Hídrico Promedio Anual por Escenario (mm/año)

Escenario	Precipitación	Evapotranspiración	Escorrentía superficial	Caudal base	Producción de agua (WYLD)
Histórico (1984–2024)	1468	520	280	300	580
RCP 2.6 (2100)	1395 (–5%)	540	290	270	560
RCP 8.5 (2100)	1248 (–15%)	560	320	240	560
Combinado (Uso + RCP 8.5)	1248	570	340	220	560

El comportamiento observado es coherente con las evaluaciones globales del IPCC, que proyectan una intensificación del ciclo hidrológico, caracterizada por la reducción de los aportes sostenidos (caudales base) y un aumento de la variabilidad intraanual, particularmente en ecosistemas de montaña tropicales (IPCC, 2023). A escala regional, estudios en páramos de Colombia como Chingaza y Sumapaz también reportan disminuciones proyectadas en la capacidad de regulación hídrica y mayor vulnerabilidad frente a sequías prolongadas (Buytaert et al., 2006; IDEAM, 2017).

En términos ecosistémicos, la reducción del caudal base y del agua disponible (WYLD) compromete la función reguladora de los páramos como "esponjas hídricas", afectando el abastecimiento de agua para comunidades rurales y ciudades intermedias. De forma complementaria, el incremento en la escorrentía superficial favorece procesos erosivos y pérdida de suelos, un riesgo ya identificado como crítico para el departamento de Boyacá en el PIGCCT (Corpoboyacá, 2021).

Los resultados muestran que en este ecosistema estratégico se mantiene cierta resiliencia bajo condiciones moderadas (RCP 2.6), pero el mismo, experimenta pérdidas significativas de regulación en escenarios de altas emisiones (RCP 8.5) y en el escenario combinado. La reducción

del caudal base junto con el incremento de la escorrentía superficial evidencian una transición del ecosistema desde un estado regulador hacia un régimen hidrológico más variable e inestable.

Este comportamiento es consistente con lo encontrado en otros páramos andinos. En Ecuador, Buytaert et al. (2006) documentaron respuestas abruptas en la hidrología de páramos ante modificaciones mínimas en la cobertura vegetal. En Colombia, Urrutia (2016) reportó aumentos significativos de escorrentía superficial vinculados a la minería en el páramo del río San Juan, mientras que en Santurbán y Guerrero se ha evidenciado que la conversión de bosques a pastizales disminuye la capacidad de regulación hídrica en más del 20 % (IDEAM, 2015; Cortés et al., 2018).

Finalmente, a nivel global, el IPCC (2023) advierte que cada incremento de temperatura intensifica la variabilidad del ciclo hidrológico, aumentando la frecuencia de sequías e inundaciones, y que los ecosistemas de alta montaña se encuentran entre los más vulnerables. La simulación realizada confirma estas proyecciones: bajo el escenario RCP 8.5 y el escenario combinado, el área protegida enfrentaría cambios estructurales en su dinámica hidrológica que comprometerían la seguridad hídrica regional.

5.1.5. Resultados espaciales de la modelación

Los resultados espaciales obtenidos mediante la modelación hidrológica con SWAT permiten identificar patrones diferenciales de escorrentía superficial (Qsup), caudal base (Qbase) y evapotranspiración real (ETR) en el Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo, tanto en el escenario histórico (1984–2024) como bajo condiciones proyectadas de cambio climático y transformación del uso del suelo (RCP 8.5 y escenario combinado).

En el caso de la escorrentía superficial, se evidencia que los valores históricos se concentran principalmente entre 200 y 280 mm/año, con mayores aportes en áreas intervenidas por mosaico de cultivos y pastos, mientras que los bosques densos alto y bajo de tierra firme presentan los valores más bajos, confirmando su papel como reguladores de escorrentía. Bajo el escenario RCP 8.5, se proyecta un aumento significativo de la Qsup en las zonas agrícolas y de mosaico, alcanzando valores superiores a 320 mm/año. Esto sugiere que, de mantenerse las tendencias de uso del suelo y el incremento de la temperatura, se intensificarían los procesos de escorrentía rápida, aumentando los riesgos de erosión y la pérdida de suelos (Buytaert et al., 2006; IDEAM, 2015).

En cuanto al caudal base, el escenario histórico refleja valores promedio entre 280 y 320 mm/año en zonas boscosas, mientras que en áreas de mosaico agrícola tienden a disminuir hacia valores cercanos a 240 mm/año. Bajo el escenario combinado (uso del suelo + RCP 8.5), se observa

una reducción adicional en estas áreas, llegando a mínimos de 200 mm/año. Esto indica una pérdida de la capacidad de regulación hídrica del ecosistema, fenómeno ampliamente reportado en páramos andinos degradados, donde la disminución del Qbase se asocia a la menor infiltración y recarga hídrica debido a la compactación de suelos agrícolas (Célleri & Feyen, 2009; Ochoa-Tocachi et al., 2016).

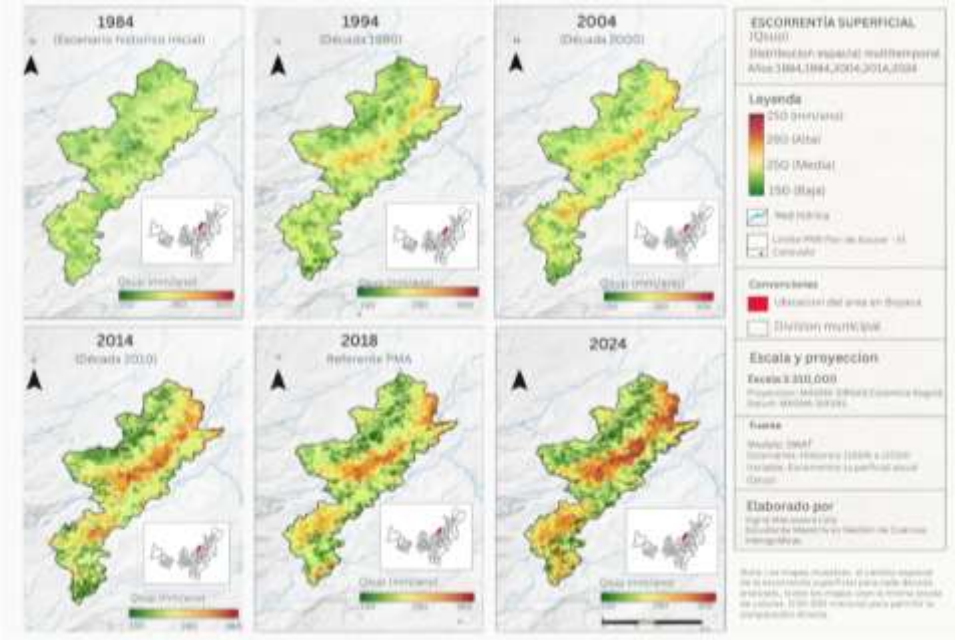
Finalmente, en relación con la evapotranspiración real, los resultados históricos oscilan entre 515 y 555 mm/año, con valores relativamente homogéneos en zonas de bosque. Sin embargo, en el escenario combinado se evidencian incrementos en áreas bajas y deforestadas, donde la ET puede superar los 570 mm/año. Este aumento responde al mayor estrés climático y la disminución de la cobertura vegetal protectora, lo que incrementa la demanda evaporativa. Estas tendencias concuerdan con lo señalado por el IPCC 21, que proyecta aumentos en la ET en regiones de páramo debido al ascenso de la temperatura media global e intensificación de la variabilidad climática.

Los resultados espaciales confirman que el cambio climático, sumado a la transformación del uso del suelo, impacta de manera directa los procesos hidrológicos en el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo. El incremento de las variables Qsup y la ET en áreas agrícolas, junto con la disminución del Qbase en estas mismas zonas, reflejan una pérdida progresiva de la capacidad de regulación hídrica del ecosistema. Este comportamiento es consistente con estudios en páramos de Colombia y los Andes tropicales, donde la cobertura boscosa y de páramo actúan como amortiguadores hidrológicos, y su sustitución por usos antrópicos conlleva a un aumento en la variabilidad y la vulnerabilidad hídrica de las cuencas (Buytaert & Beven, 2011; Ochoa-Tocachi et al., 2016).

Las siguientes figuras consolidan de manera gráfica el comportamiento de las variables escorrentía, caudal y evapotranspiración, para los escenarios analizados, con respecto al cambio de uso de suelo. La Figura 30 muestra la escorrentía superficial en el escenario histórico (1984–2024), con valores entre 150 y 360 mm/año. Se observa un gradiente espacial donde los mayores aportes se concentran hacia el sector central y nororiental del área, asociado a zonas de mayor pluviosidad y pendientes moderadas, mientras que en sectores con menor acumulación pluviométrica la escorrentía es más reducida.

Figura 30.

Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario Histórico 1984-2024



El análisis multitemporal de la escorrentía superficial (Qsup) en el PNN Pan de Azúcar – El Consuelo evidencia una transformación progresiva del comportamiento hidrológico entre 1984 y 2024, asociada tanto a factores biofísicos como a presiones antrópicas. En 1984, predominan valores entre 150 y 220 mm/año, con una distribución homogénea y baja concentración de flujos, lo que indica un sistema con alta capacidad de regulación hídrica, favorecida por coberturas vegetales conservadas y condiciones edáficas que promueven la infiltración (IDEAM, 2014).

Para 1994, los valores aumentan a un rango dominante de 180 a 260 mm/año, con focos puntuales cercanos a 280–290 mm/año. Se empieza a configurar un patrón de escorrentía más organizado, aunque aún controlado por la topografía. Este incremento no responde exclusivamente a intervención antrópica, sino también a condiciones geomorfológicas que favorecen la concentración del flujo superficial en zonas de mayor pendiente.

En 2004, se consolida un corredor de escorrentía con valores entre 200 y 280 mm/año y máximos cercanos a 300 mm/año. Este patrón refleja una mayor conectividad hidrológica, donde la topografía y la red de drenaje juegan un papel determinante en la concentración del flujo. En este punto, las áreas con mayores valores de escorrentía no coinciden necesariamente con zonas de intervención humana, sino con sectores de pendientes pronunciadas y menor capacidad de infiltración, lo cual es consistente con la dinámica hidrológica descrita por el IPCC (2014).

Hacia 2014, la escorrentía se intensifica con valores entre 220 y 300 mm/año y máximos de hasta 320–340 mm/año. Se observa una expansión de las áreas con escorrentía media-alta,

donde la interacción entre factores climáticos (mayor intensidad de precipitación) y físicos (pendiente, saturación del suelo) domina la respuesta hidrológica. La intervención antrópica actúa como un factor adicional, pero no exclusivo.

En 2018, año caracterizado por condiciones hidroclimáticas extremas, los valores alcanzan entre 240 y 320 mm/año, con picos de hasta 360 mm/año. La alta escorrentía observada responde principalmente a procesos de saturación del suelo y eventos de precipitación intensos, más que a cambios directos en el uso del suelo. Esto coincide con lo reportado por IDEAM (2018) y el IPCC (2021), donde se señala que los eventos extremos incrementan significativamente la escorrentía superficial incluso en áreas con baja intervención.

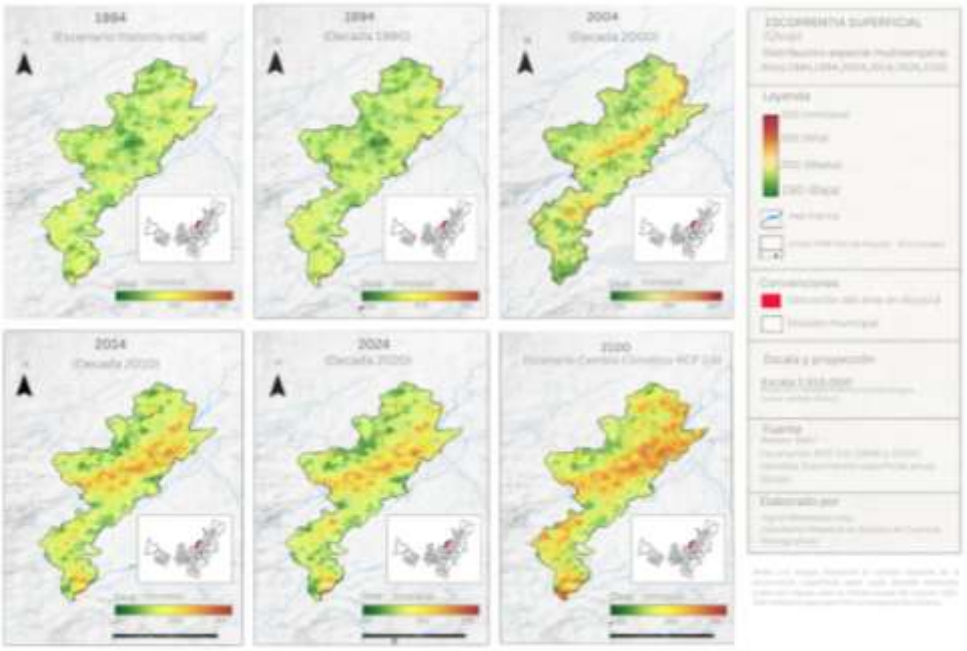
Finalmente, para 2024, los valores se estabilizan en un rango de 250 a 320 mm/año, con máximos cercanos a 350 mm/año. Se evidencia un gradiente progresivo en la zona sur del PNN, donde la escorrentía aumenta de manera continua sin presentar cambios abruptos. Este comportamiento sugiere una respuesta integrada del sistema, donde la topografía, la conectividad hidrológica y la intensificación climática son los principales controladores, mientras que la intervención antrópica tiene un efecto localizado y secundario.

En conjunto, los resultados muestran que el incremento de la escorrentía superficial (≈80–120 mm/año) no puede atribuirse únicamente a la actividad humana, sino a la interacción entre factores geomorfológicos, edáficos y climáticos. Esto es consistente con la literatura del IPCC (2021) y los estudios del IDEAM, que destacan la importancia de la topografía y la variabilidad climática en la generación de escorrentía en sistemas montañosos.

En el escenario RCP 2.6, la escorrentía superficial (Qsup) hacia 2100 presenta valores predominantes entre 200 y 290 mm/año, con máximos puntuales cercanos a 300 mm/año, lo que evidencia una intensificación moderada respecto al periodo reciente, pero sin alcanzar condiciones extremas. Este comportamiento responde a la interacción entre la reducción de la precipitación (–5 %) y el aumento de la temperatura (+1,5 °C), lo cual modifica el balance hídrico más por redistribución de flujos que por incremento del volumen total de agua disponible (Ver Figura 31).

Figura 31.

Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario RCP 2.6



La disminución de la precipitación reduce el aporte hídrico directo, mientras que el aumento de temperatura incrementa la evapotranspiración potencial, generando una menor disponibilidad de humedad en el suelo. Sin embargo, esta condición no implica una reducción uniforme de la escorrentía, ya que en sectores con mayor pendiente y conectividad hidrológica se favorece la concentración rápida del flujo superficial. En este sentido, el sistema pierde parcialmente su capacidad de regulación, lo que se traduce en una escorrentía más eficiente en zonas específicas, aunque sin una expansión significativa de áreas críticas.

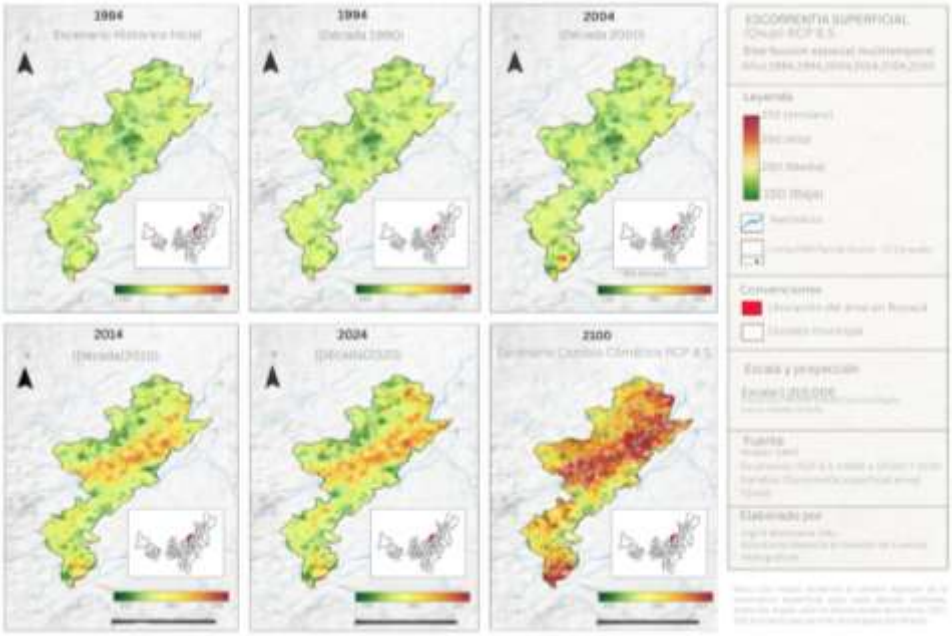
Espacialmente, se mantiene el corredor principal de escorrentía, lo que confirma el control dominante de la topografía sobre la distribución de Qsup. En la zona sur del PNN se observa un gradiente entre aproximadamente 240 y 290 mm/año, sin la presencia de núcleos extremos, lo que indica una respuesta hidrológica activa pero contenida. Este patrón sugiere que, bajo RCP 2.6, el sistema experimenta una reorganización del balance hídrico, caracterizada por una menor regulación del suelo y una mayor dependencia de la conectividad del terreno.

En conjunto, los resultados evidencian que el escenario RCP 2.6 no genera una intensificación abrupta de la escorrentía, sino un ajuste progresivo del sistema hidrológico, coherente con escenarios de mitigación fuerte. Este comportamiento es consistente con lo reportado por el IPCC (2021, 2023), donde se señala que, bajo trayectorias de bajas emisiones, los cambios en el ciclo hidrológico tienden a ser moderados y controlados por condiciones locales del terreno y del suelo.

En el escenario RCP 8.5 (Figura 32), la evolución multitemporal de la escorrentía superficial (Qsup) evidencia una intensificación progresiva y acumulativa del sistema hidrológico, con cambios más marcados hacia finales de siglo. En 1984, los valores se sitúan entre 150 y 220 mm/año, reflejando un sistema regulado. Para 1994, se observa un incremento hacia rangos de 180 a 260 mm/año, con una incipiente organización espacial del flujo. En 2004, los valores aumentan a 200–280 mm/año, consolidándose un corredor de escorrentía más continuo. Hacia 2014, la escorrentía alcanza rangos de 220–300 mm/año, con mayor expansión de áreas medias-altas, mientras que en 2018 se registran valores entre 240 y 320 mm/año, evidenciando una mayor conectividad hidrológica y respuesta rápida del sistema.

Figura 32.

Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario RCP 8.5



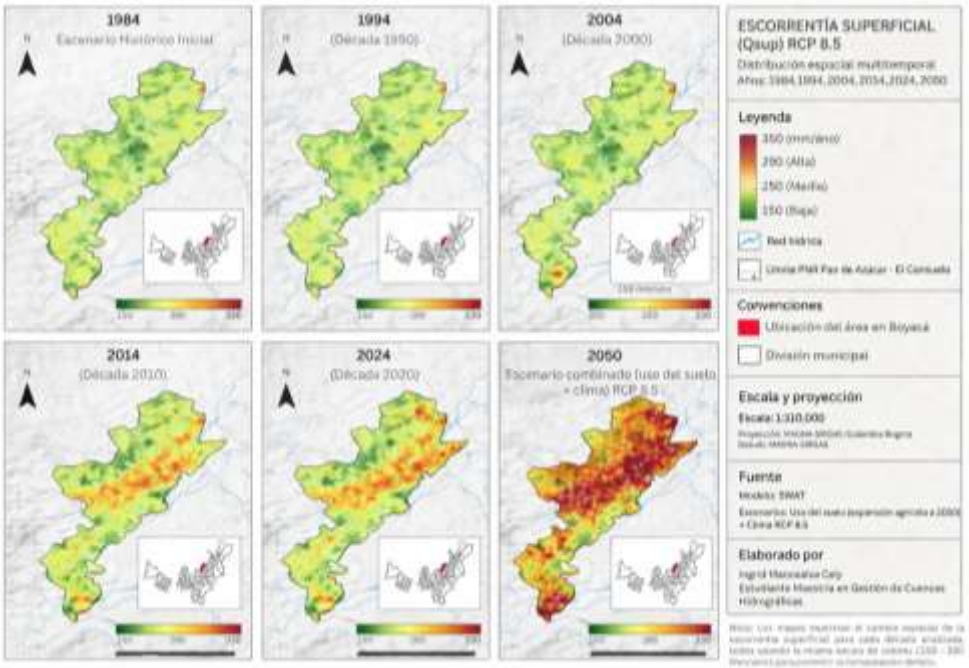
Bajo el escenario proyectado para 2100 (RCP 8.5), los valores predominantes se ubican entre 280 y 330 mm/año, con núcleos que superan este rango en zonas específicas, particularmente en el eje central y la zona sur del PNN. Este incremento no es únicamente cuantitativo, sino también espacial, ya que las áreas de escorrentía alta se vuelven más continuas y dominantes. La reducción significativa de la precipitación (–15 %) combinada con el aumento de temperatura (+4 °C) genera una alteración profunda del balance hídrico: se reduce la humedad del suelo y la capacidad de almacenamiento, pero se incrementa la eficiencia de generación de escorrentía en eventos de lluvia, favoreciendo respuestas hidrológicas más rápidas y concentradas.

Este comportamiento implica una transición desde un sistema con regulación difusa hacia uno más reactivo, donde la topografía y la conectividad del terreno dominan la dinámica del flujo superficial. En particular, la zona sur del PNN pasa de presentar valores medios en escenarios históricos (≈200–260 mm/año) a valores altos en 2100 (≈300–330 mm/año), consolidándose como un área de respuesta preferencial. En conjunto, el escenario RCP 8.5 refleja no solo un aumento de la escorrentía, sino una intensificación del ciclo hidrológico con pérdida de resiliencia, coherente con lo reportado por el IPCC (2021, 2023), donde se señala que los escenarios de altas emisiones amplifican la variabilidad y la respuesta extrema de los sistemas hidrológicos.

El escenario combinado de uso del suelo + clima hacia 2050 integra dos presiones simultáneas sobre la respuesta hidrológica del PNN Pan de Azúcar–El Consuelo: por un lado, la expansión agrícola y la reducción de coberturas boscosas, que disminuyen la interceptación, la rugosidad superficial y la capacidad de infiltración del suelo; por otro, las condiciones climáticas del RCP 8.5, asociadas a una mayor intensidad de precipitación y a una respuesta más rápida del escurrimiento. En conjunto, este escenario representa una condición de doble forzamiento, en la que la transformación antrópica del territorio amplifica el efecto del cambio climático sobre la generación de escorrentía superficial (Ver Figura 33).

Figura 33.

Escorrentía Superficial (Qsub) Escenario combinado (Uso del Suelo + RCP8.5)



Desde el punto de vista espacial, el mapa de 2050 muestra una expansión marcada de las clases media-alta y alta de escorrentía, con predominio de tonos naranja y rojo dentro del polígono del área protegida. Tomando como referencia la escala empleada en la serie cartográfica, la escorrentía superficial pasa de valores bajos del orden de 150–200 mm/año en los sectores más conservados, a rangos dominantes de 250–290 mm/año en amplias franjas del territorio, alcanzando núcleos de 290–330 mm/año en las zonas más intervenidas y más sensibles hidrológicamente. Esto indica una reducción clara de las áreas con comportamiento regulador y un incremento de superficies con respuesta rápida al exceso de lluvia.

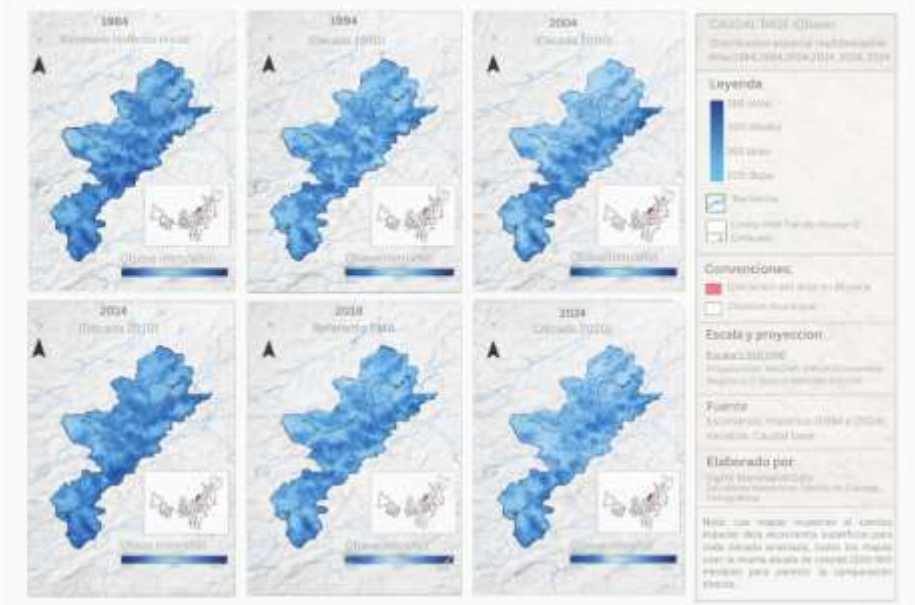
En comparación con 2024, el escenario combinado no solo incrementa la magnitud de la escorrentía, sino que también ensancha y conecta espacialmente los focos de mayor aporte superficial, especialmente en sectores donde la pérdida de cobertura vegetal favorece el sellamiento, la compactación y la menor retención hídrica del suelo. Técnicamente, esto sugiere un aumento del coeficiente de escorrentía, una disminución del almacenamiento superficial y subsuperficial y, en consecuencia, una mayor probabilidad de caudales pico más altos durante eventos intensos.

En términos hidrológicos, este comportamiento implica una menor capacidad de regulación ecosistémica y una mayor susceptibilidad a procesos asociados como erosión, transporte de sedimentos e inestabilidad en laderas o cauces de drenaje menor. Por tanto, el escenario combinado puede interpretarse como el de mayor presión funcional sobre la cuenca, ya que el cambio climático no actúa de manera aislada, sino reforzado por un uso del suelo que vuelve al sistema más eficiente para producir escorrentía y menos capaz de amortiguar los eventos de precipitación.

El conjunto cartográfico del escenario histórico de caudal base (Qbase) 1984–2024 muestra una evolución coherente con la dinámica hidrológica de sistemas altoandinos, donde el flujo base representa el aporte subsuperficial sostenido que regula los caudales en periodos secos (Ver Figura 34).

Figura 34.

Caudal Base (Qbase) Escenario Histórico 1984-2024



En 1984, predominan valores altos (≈300–340 mm/año), reflejando una alta capacidad de regulación hídrica, asociada a coberturas bien conservadas y eficientes procesos de infiltración. Para 1994, se observa una leve reducción (≈280–320 mm/año), indicando el inicio de una mayor variabilidad hidroclimática, consistente con lo señalado por el IPCC sobre intensificación del ciclo hidrológico desde finales del siglo XX (IPCC, 2023).

En 2004, el patrón se vuelve más heterogéneo, con valores entre ≈260–300 mm/año, evidenciando una fragmentación incipiente del Qbase. Este comportamiento se asocia a cambios en uso del suelo y aumento de la evapotranspiración, en línea con estudios del IDEAM sobre variabilidad climática en Colombia (IDEAM, 2017). Para 2014, la disminución es más marcada (≈240–280 mm/año), con pérdida de continuidad en zonas de alto caudal base, lo que indica una reducción en la resiliencia hidrológica.

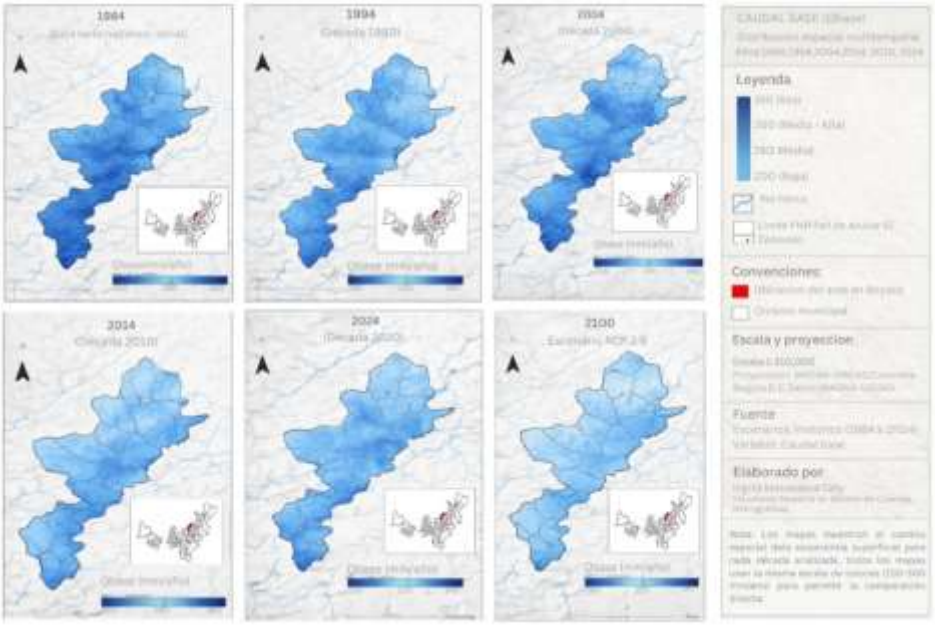
El año 2018 presenta una condición intermedia (≈230–270 mm/año), donde persisten algunos núcleos de valores altos, pero con mayor fragmentación espacial. Finalmente, en 2024, predominan valores bajos (≈200–260 mm/año), evidenciando una disminución significativa de la capacidad de regulación hídrica. Este patrón coincide con proyecciones del IDEAM sobre mayor vulnerabilidad del recurso hídrico y con el IPCC, que advierte una reducción de la recarga subsuperficial bajo condiciones de calentamiento global (IDEAM, 2019; IPCC, 2023).

El conjunto cartográfico del escenario RCP 2.6 para caudal base (Qbase) (Figura 35) evidencia una evolución hidrológica consistente con un contexto de mitigación climática, donde

los cambios en precipitación (–5 %) y temperatura (+1,5 °C) generan impactos moderados pero progresivos sobre la recarga subsuperficial. En 1984, los valores de Qbase se mantienen altos (≈300–340 mm/año), similares al escenario histórico, indicando condiciones de alta regulación hídrica y adecuada infiltración. Para 1994, se observa una leve disminución (≈280–320 mm/año), reflejando el inicio de una reducción moderada en la recarga, aunque sin pérdida significativa de continuidad espacial.

Figura 35.

Caudal Base (Qbase) Escenario RCP 2.6



En 2004, los valores descienden hacia ≈260–300 mm/año, con una ligera heterogeneidad espacial. Este comportamiento sugiere una disminución incipiente del almacenamiento subsuperficial, asociada a un aumento en la evapotranspiración, tal como lo documenta el IPCC al señalar que incluso en escenarios de bajas emisiones se incrementa la demanda evaporativa (IPCC, 2023).

Para 2014, predominan rangos de ≈240–280 mm/año, evidenciando una reducción más clara en la capacidad de regulación hídrica, aunque aún se conservan zonas con valores medios-altos. En 2024, el Qbase se sitúa entre ≈230–270 mm/año, mostrando una tendencia decreciente sostenida, pero menos abrupta que en escenarios de altas emisiones.

Finalmente, el escenario proyectado a 2100 presenta valores entre ≈200–250 mm/año, con predominio de tonos claros, lo que indica una reducción moderada del caudal base, pero con persistencia de cierta capacidad de regulación. Este comportamiento es coherente con escenarios

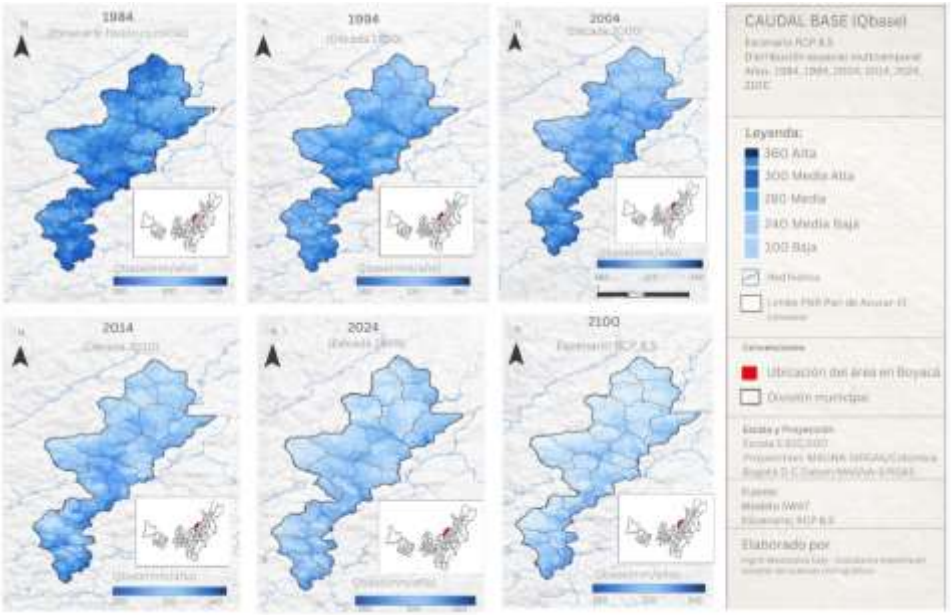
RCP 2.6, donde las acciones de mitigación limitan los impactos sobre el ciclo hidrológico, aunque no los eliminan (IPCC, 2023).

Los mapas evidencian una disminución gradual y controlada del Qbase, sin colapso del sistema hidrológico, lo que sugiere que bajo condiciones de mitigación fuerte, la cuenca mantiene parcialmente su función reguladora, en concordancia con lo reportado por el IDEAM sobre la sensibilidad del recurso hídrico frente a cambios climáticos moderados (IDEAM, 2019).

El conjunto cartográfico correspondiente al escenario RCP 8.5 para caudal base (Qbase) (Figura 36) evidencia una transformación significativa del régimen hidrológico, coherente con un contexto de altas emisiones, reducción de precipitación (–15 %) y aumento térmico (+4 °C).

Figura 36.

Caudal Base (Qbase) Escenario RCP 8.5



En 1984, los valores de Qbase se mantienen en rangos altos (≈300–340 mm/año), reflejando condiciones de alta regulación hídrica y adecuada recarga subsuperficial. Para 1994, aunque aún predominan valores relativamente altos (≈280–320 mm/año), ya se observa una ligera pérdida de intensidad, indicando el inicio de una reducción en la disponibilidad hídrica.

En 2004, el patrón muestra una disminución más evidente (≈260–300 mm/año) y mayor homogeneización hacia valores medios, lo que sugiere una disminución progresiva de la recarga. Este comportamiento es consistente con lo señalado por el IPCC (2023), donde el incremento de temperatura intensifica la evapotranspiración y reduce la infiltración efectiva.

Para 2014, predominan rangos de ≈240–280 mm/año, evidenciando una pérdida de resiliencia hidrológica y menor capacidad del sistema para sostener caudales base. En 2024, esta tendencia se acentúa (≈220–260 mm/año), con una mayor extensión de valores bajos, lo que indica un sistema más vulnerable frente a periodos secos.

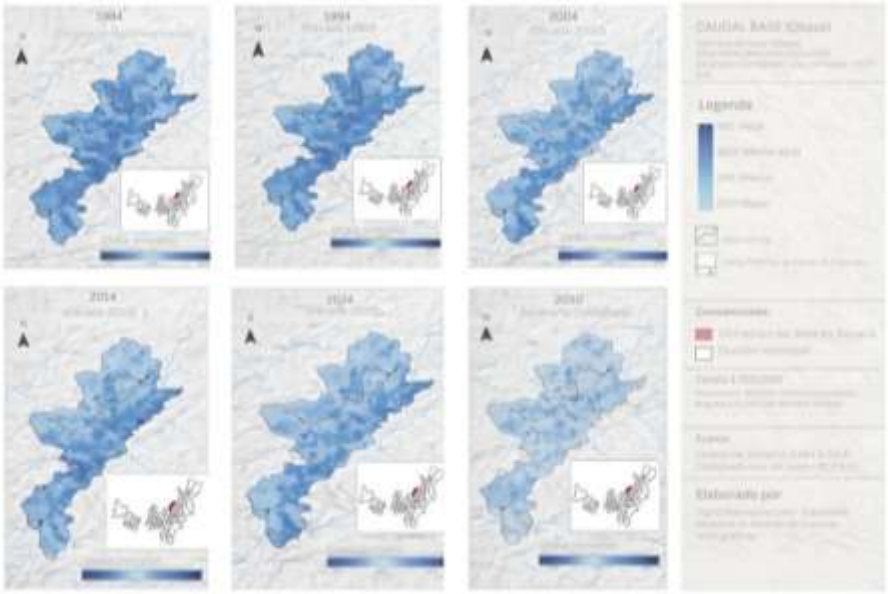
Finalmente, el escenario proyectado a 2100 presenta los valores más bajos (≈200–240 mm/año), con predominio de tonos muy claros, lo que refleja una reducción crítica del caudal base. Este comportamiento implica una disminución sustancial en el almacenamiento subsuperficial y en la capacidad de regulación hídrica, en concordancia con las proyecciones del IPCC sobre disminución de la recarga en escenarios de altas emisiones (IPCC, 2023).

Las salidas cartográficas evidencian una tendencia decreciente marcada del caudal base, con transición desde un sistema relativamente regulado hacia uno con menor capacidad de sostener caudales en ausencia de precipitación, lo que incrementa la vulnerabilidad del ciclo hidrológico. Este patrón es consistente con los análisis del IDEAM sobre la sensibilidad del recurso hídrico en Colombia frente a aumentos de temperatura y cambios en precipitación (IDEAM, 2019).

El escenario combinado (uso del suelo + clima, RCP 8.5) (Figura 37) evidencia una alteración progresiva y estructural del caudal base (Qbase) entre 1984 y 2050, con una transición desde condiciones relativamente estables hacia un sistema hidrológico degradado y con menor capacidad de regulación.

Figura 37.

Caudal Base (Qbase) Escenario Combinado (Uso del Suelo+ RCP 8.5)



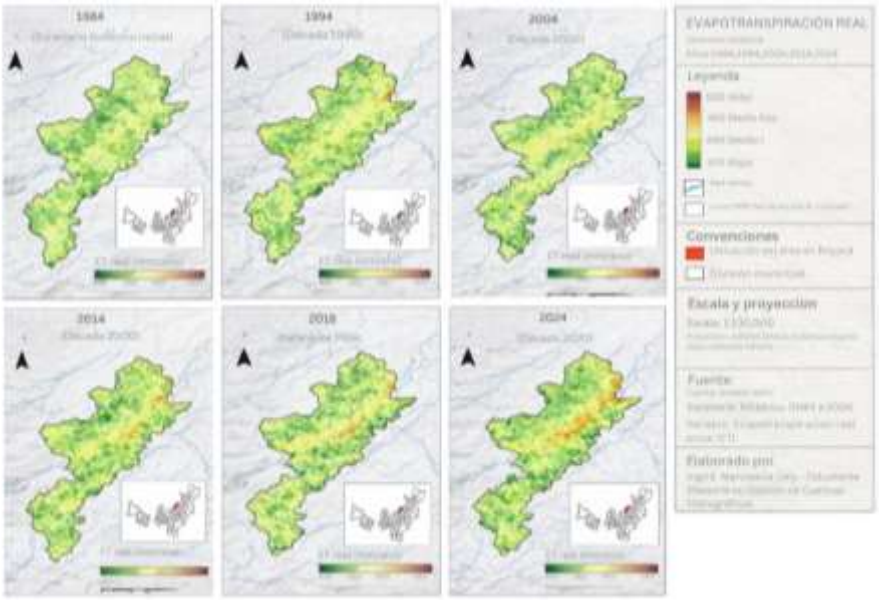
En términos cuantitativos, los mapas muestran que los valores de Qbase evolucionan desde rangos predominantemente altos (≈280–360 mm/año) en 1984–1994, asociados a una mayor capacidad de almacenamiento subsuperficial y cobertura vegetal continua, hacia una condición intermedia en 2004–2014 (≈240–300 mm/año), donde ya se evidencia fragmentación espacial y pérdida de núcleos de recarga. Para 2024, el sistema presenta una mayor heterogeneidad, con predominio de valores medios a medios-bajos (≈220–280 mm/año), indicando disminución en la eficiencia de infiltración y regulación hídrica.

La proyección a 2050 muestra un cambio más crítico pero coherente con la tendencia: predominan valores bajos a medios-bajos (≈200–260 mm/año), con reducción notable de las zonas de alto Qbase, ahora restringidas a áreas puntuales mejor conservadas. Este patrón es consistente con la contracción de áreas de recarga y aumento de la escorrentía superficial, derivado de la expansión agrícola y la disminución de coberturas boscosas.

Desde el punto de vista de procesos, la disminución progresiva del Qbase responde a dos forzantes principales: la reducción de la precipitación efectiva y el incremento de la evapotranspiración bajo escenarios RCP 8.5 (IPCC, 2021), y la alteración del suelo y la cobertura vegetal, que disminuye la infiltración y el almacenamiento subsuperficial (FAO, 2020; IDEAM, 2019). La combinación de estos factores genera una pérdida de resiliencia hidrológica, evidenciada en la fragmentación espacial y en la disminución de la conectividad de zonas de alto caudal base. El escenario refleja un sistema que pasa de una regulación natural relativamente eficiente a una condición de estrés hídrico estructural, donde el caudal base deja de ser el componente dominante del flujo en estiaje, aumentando la vulnerabilidad frente a sequías y variabilidad climática.

Figura 38.

Evapotranspiración Real Escenario Histórico 1984-2024



La evapotranspiración real (ET) en el PNN Pan de Azúcar – El Consuelo presenta una tendencia ligeramente creciente pero controlada a lo largo del periodo 1984–2024, con valores que oscilan aproximadamente entre 420 y 500 mm/año, coherentes con ecosistemas de páramo y bosque altoandino.

Desde el punto de vista espacial, los mapas evidencian un predominio de valores medios (≈ 440–480 mm/año) en la mayor parte del área, con incrementos progresivos hacia zonas de menor altitud y mayor intervención antrópica. Este patrón responde a la interacción entre disponibilidad hídrica, cobertura vegetal y gradientes altitudinales, donde las áreas con mayor exposición energética tienden a presentar mayores tasas de evapotranspiración.

A nivel temporal, se observa un incremento gradual de la ET desde 1984 hasta 2024, sin cambios abruptos, lo cual sugiere que el sistema hidrológico se mantiene energéticamente limitado. En ecosistemas de páramo, la evapotranspiración está condicionada principalmente por la radiación neta y la temperatura, más que por la disponibilidad de agua, debido a las altas precipitaciones y la capacidad de almacenamiento de los suelos orgánicos (Buytaert et al., 2006; Célleri & Feyen, 2009). Esto explica por qué, aun con variaciones climáticas interdecadales, la ET no alcanza valores extremos ni presenta incrementos desproporcionados.

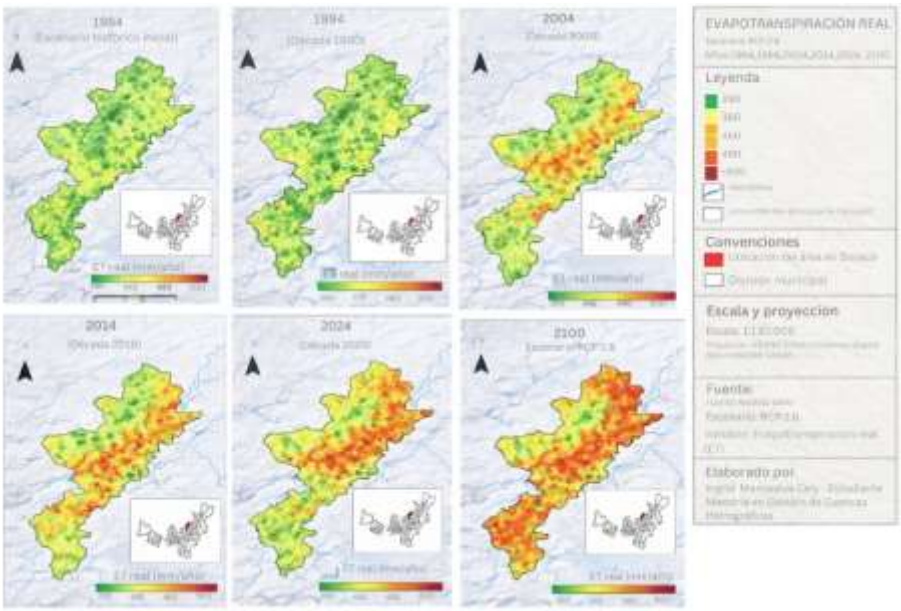
En términos de balance hídrico, el comportamiento observado indica una relativa estabilidad en los flujos de salida por evapotranspiración, lo que permite mantener una fracción significativa del agua disponible para procesos de escorrentía y recarga. Este resultado es consistente con estudios en alta montaña tropical, donde la regulación hídrica del páramo actúa como un amortiguador frente a

variaciones climáticas (IDEAM, 2014; Poveda et al., 2004). La ausencia de valores elevados (>520 mm/año) de forma generalizada confirma que, bajo condiciones históricas sin forzamiento climático significativo, el sistema conserva su equilibrio hidrológico natural, con una evapotranspiración moderada y espacialmente heterogénea, controlada por factores biofísicos locales.

Los mapas del escenario RCP 2.6 muestran un incremento progresivo de la evapotranspiración real (ET) entre 1984 y 2100, con una transición desde rangos de 420–460 mm/año hacia valores dominantes de 460–500 mm/año en las últimas décadas. Este aumento es gradual y espacialmente consistente, sin cambios abruptos, lo que refleja una respuesta controlada del sistema (Ver Figura 39).

Figura 39.

Evapotranspiración Real Escenario RCP 2.6



Espacialmente, la ET presenta un patrón diferenciado, con mayores valores en zonas de menor altitud —especialmente hacia el sector oriental del PNN— donde se observa la expansión de tonalidades naranjas y rojas. En contraste, las áreas más elevadas mantienen valores más bajos (verdes), lo que evidencia que el control altitudinal y energético del páramo sigue vigente.

El incremento de la ET se explica principalmente por el aumento moderado de la temperatura (+1,5 °C), que eleva la demanda evaporativa de la atmósfera (mayor déficit de presión de vapor), favoreciendo una mayor transferencia de agua hacia la atmósfera. La ligera reducción de la precipitación (–5 %) no limita este proceso, debido a la alta capacidad de almacenamiento hídrico

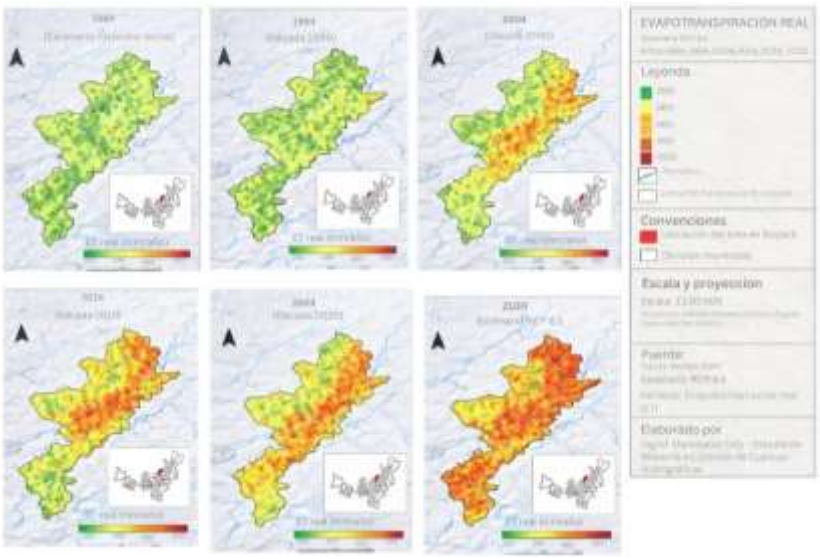
de los suelos de páramo, por lo que la ET continúa estando limitada por energía y no por disponibilidad de agua.

Los mapas reflejan un sistema que experimenta una intensificación moderada de la evapotranspiración, sin pérdida significativa de su estructura funcional. No obstante, el aumento progresivo de la ET indica una mayor fracción de agua retornando a la atmósfera, lo que sugiere una presión creciente sobre el balance hídrico, aunque aún dentro de un escenario de cambio controlado.

Los mapas del escenario RCP 8.5 (Figura 40), muestran un incremento sostenido y más intenso de la evapotranspiración real (ET) entre 1984 y 2100, con una transición desde valores de 420–460 mm/año hacia una dominancia espacial de rangos 480–550 mm/año en las últimas décadas. A partir de 2014 se evidencia una expansión clara de tonos naranjas y rojos, que se consolidan en 2024 y especialmente en 2100, indicando un aumento significativo en la magnitud y extensión de la ET.

Figura 40.

Evapotranspiración Real Escenario RCP 8.5



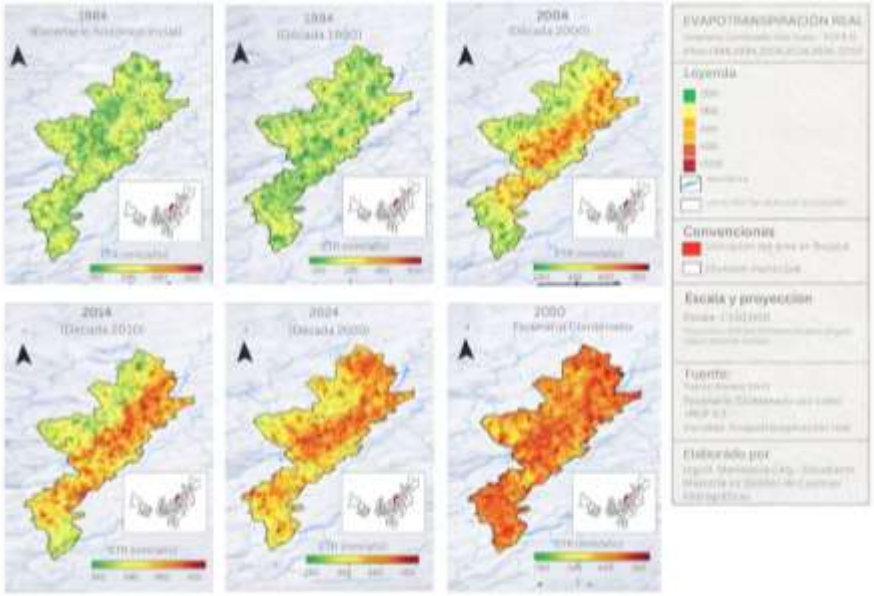
Espacialmente, se observa una progresiva pérdida de heterogeneidad: mientras en los primeros periodos la ET está controlada por gradientes altitudinales (valores más bajos en zonas altas), hacia el final del periodo estos contrastes se reducen y amplias áreas del PNN presentan valores elevados. Este patrón indica que el control local del sistema (altitud, cobertura y microclima) es superado por el forzamiento climático, generando una distribución más uniforme de la variable en rangos altos. Este comportamiento se explica por el aumento significativo de temperatura proyectado en RCP 8.5 (+4 °C), que incrementa el déficit de presión de vapor y la demanda evaporativa de la atmósfera.

Aunque la precipitación disminuye, la disponibilidad hídrica del sistema permite sostener el proceso, resultando en una mayor proporción de agua transferida a la atmósfera. En conjunto, los mapas reflejan una intensificación de la ET cercana al límite superior del ecosistema (~550 mm/año), lo que implica una mayor presión sobre el balance hídrico y una disminución de la capacidad reguladora del páramo.

Los mapas del escenario combinado evidencian la mayor intensificación de la evapotranspiración real (ET) entre todos los escenarios, con una transición desde valores de 420–460 mm/año en 1984 hacia una dominancia generalizada de rangos 500–550 mm/año en 2050 (Ver Figura 41).

Figura 41.

Evapotranspiración Real Escenario Combinado (Uso del Suelo + RCP 8.5)



A partir de 2004 se observa una expansión marcada de tonos naranjas y rojos, que se consolidan en 2014 y 2024, hasta alcanzar en 2050 una cobertura casi continua de valores altos en todo el PNN.

Desde el punto de vista espacial, el patrón muestra una pérdida casi total de heterogeneidad, donde incluso las zonas que históricamente presentaban valores bajos (asociadas a mayor altitud) pasan a registrar ET elevada. La distribución se vuelve más uniforme en rangos altos, lo que indica que los controles fisiográficos locales son superados y que la variable está dominada por el forzamiento combinado del sistema. Este comportamiento es más evidente en el eje central y oriental del PNN, donde los valores altos se expanden y se conectan espacialmente.

El incremento observado responde a la interacción sinérgica entre el aumento de temperatura del RCP 8.5 (+4 °C) y los cambios en el uso del suelo, particularmente la reducción

de coberturas naturales. Estos cambios alteran las propiedades del sistema (menor retención hídrica, mayor exposición térmica y menor regulación), favoreciendo una mayor transferencia de agua hacia la atmósfera. Como resultado, la ET alcanza valores cercanos al límite superior del ecosistema (~550 mm/año) de manera más extendida, lo que refleja una mayor pérdida de agua por evapotranspiración y una disminución significativa de la capacidad reguladora del páramo, con implicaciones directas sobre la disponibilidad hídrica futura.

5.2.Modelación Hidrológica con GR2M

El presente capítulo expone el proceso de implementación del modelo GR2M, detallando la preparación de los datos de entrada, la calibración y evaluación del modelo frente al Qproxy, y los resultados de simulación obtenidos para periodos históricos y recientes. Asimismo, se presentan análisis por décadas (1984–1994, 1994–2004, 2004–2014 y 2014–2024), con el propósito de identificar tendencias en la dinámica hidrológica y establecer relaciones con los patrones de precipitación y evapotranspiración. El componente metodológico de la presente modelación, se exponde de manera detallada en el Anexo E. Metodología de Modelación Hidrológica.

En ausencia de registros hidrométricos en el área de estudio, se construyeron tres variantes de caudales proxy (Qproxy), que sirvieron como referencia para la evaluación del modelo, los cuales se encuentran dentro del apartado Anexo E. Metodología Modelación Hidrológica.

5.2.1. Resultados Simulación Hidrológica GR2M

El modelo GR2M permitió simular los caudales mensuales durante el periodo 1984–2024, cuyos resultados se presentan en hidrogramas decenales (Figuras 42 a 45). Estas gráficas evidencian la correspondencia entre la dinámica de la precipitación y el caudal simulado (Qsim), contrastados con el Qproxy.

Aunque se observa una ligera sobreestimación de los picos de caudal en los hidrograma simulados, este comportamiento es consistente con la estructura conceptual del modelo GR2M, el cual, al operar a escala mensual, tiende a amplificar la respuesta hidrológica frente a eventos de precipitación concentrados. Adicionalmente, la simplificación de procesos de almacenamiento y regulación propios de ecosistemas de páramo, como la alta capacidad de retención de los suelos orgánicos, puede generar una respuesta simulada más rápida y de mayor magnitud que la observada. No obstante, el modelo reproduce adecuadamente la dinámica general del sistema, incluyendo la estacionalidad y los volúmenes medios, lo cual lo hace adecuado para el análisis de

escenarios de cambio climático, donde el interés principal radica en la respuesta hidrológica agregada más que en la simulación precisa de eventos extremos.

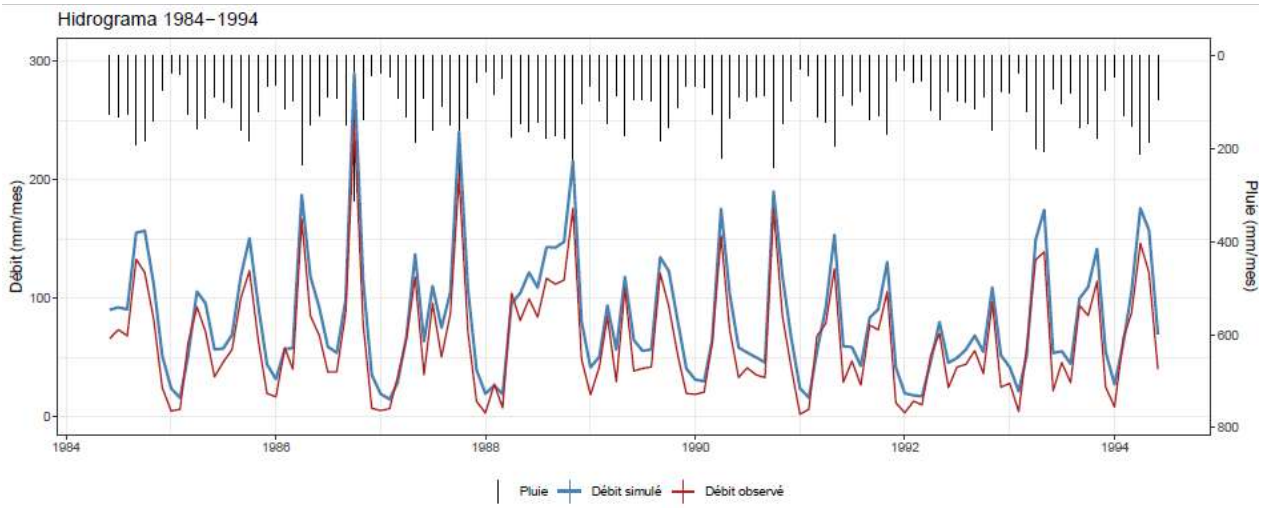
- **Década 1984-1994**

Durante este primer periodo, el modelo GR2M evidencia una respuesta hidrológica estable y bien acoplada a la precipitación. Los picos de Qsim corresponden de manera directa a los máximos de lluvia, mientras que los descensos son suaves, lo que refleja la alta capacidad de regulación hídrica del ecosistema de páramo en su estado relativamente conservado (Ver Figura 38) (Buytaert et al., 2006).

El Qproxy se mantiene dentro de los rangos del Qsim, lo que valida la coherencia de las aproximaciones utilizadas. La correlación cercana a 1 (r = 0.976) indica que el modelo reproduce adecuadamente la señal climática, aunque con un ligero subestimado de caudales en periodos de alta precipitación, atribuible a la simplificación del balance hídrico en GR2M y a la ausencia de procesos de almacenamiento superficial explícitos.

Figura 42.

Hidrograma 1984–1994.



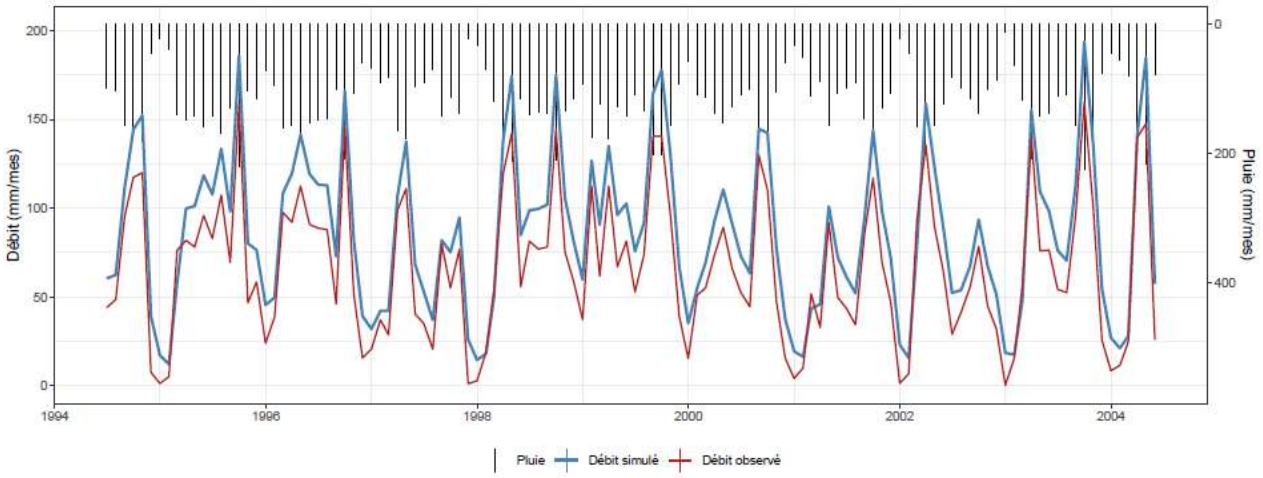
- **Década 1994-2004**

En esta década se aprecia una mayor variabilidad interanual, con picos de caudal más marcados y eventos de reducción abrupta de Qsim en periodos secos. Este comportamiento sugiere que las dinámicas de cobertura y uso del suelo empezaron a modificar la capacidad de regulación hídrica. Estudios en cuencas altoandinas han demostrado que la intensificación de actividades agropecuarias en zonas de páramo reduce la infiltración y aumenta la escorrentía directa (Ver Figura 39) (Moreno et al., 2020).

Se observa, además, que el Qproxy derivado de Budyko tiende a sobreestimar los caudales respecto al Qsim en periodos lluviosos, indicando que el modelo conceptual logra capturar mejor el efecto de la evapotranspiración y del almacenamiento en el balance hídrico.

Figura 43.

Hidrograma 1994-2004



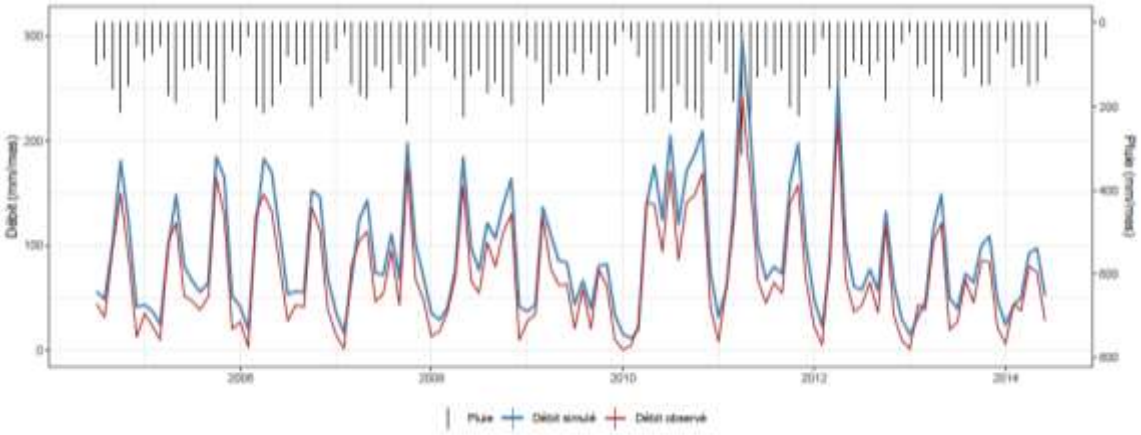
- **Década 2004-2014**

En este periodo se intensifica la variabilidad intraanual, con picos extremos en los meses húmedos y descensos pronunciados en la temporada seca (Ver Figura 40). El Qsim muestra una respuesta más sensible frente a las oscilaciones de la precipitación, lo que puede asociarse tanto a la dinámica climática regional (influencia de eventos ENSO; Vuille et al., 2018) como a una mayor presión sobre la cobertura de páramo, lo que reduce la esponjosidad de los suelos orgánicos.

El Qproxy presenta en este caso mayor dispersión respecto al Qsim, lo que pone de relieve las limitaciones de los caudales proxy para reproducir condiciones extremas. A pesar de ello, el NSE = 0.763 confirma que la representación del modelo es confiable para análisis de tendencia y diagnóstico hidrológico.

Figura 44.

Hidrograma 2004–2014.



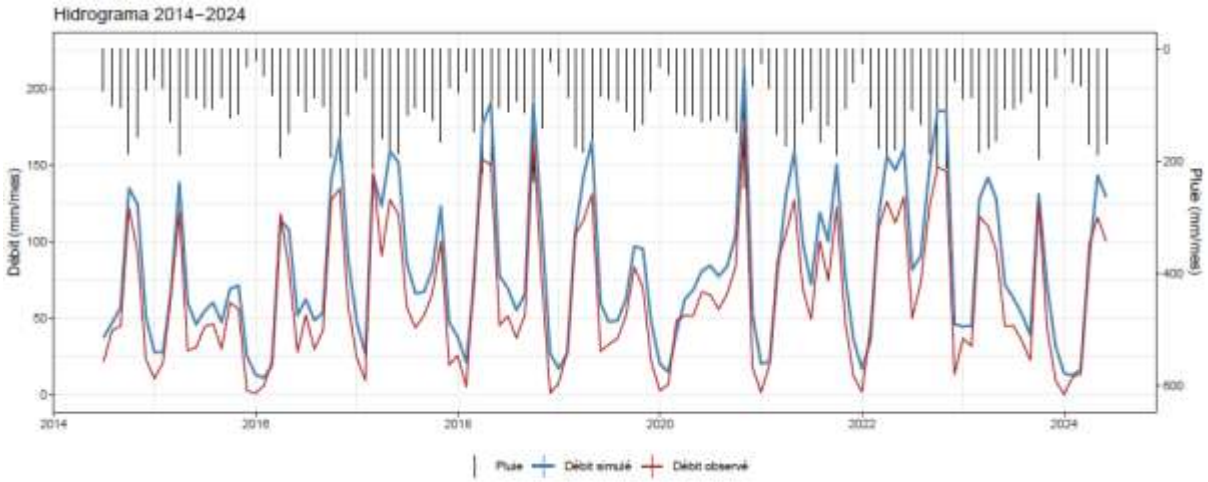
- **Década 2014-2024**

La última década analizada refleja un cambio significativo en la dinámica hidrológica. Aunque persiste la relación entre precipitación y Qsim, se observa una tendencia hacia menores caudales simulados en comparación con la magnitud de las lluvias, lo que sugiere un aumento en las pérdidas por evapotranspiración y posiblemente una menor capacidad de almacenamiento en los suelos de páramo (Ver Figura 41).

Este resultado es consistente con las proyecciones del IPCC AR6 que señalan un incremento en la demanda evaporativa en regiones de alta montaña debido al aumento de la temperatura media global (IPCC, 2023). En consecuencia, la eficiencia en la conversión de precipitación en escorrentía podría disminuir, comprometiendo la regulación hídrica del ecosistema.

Figura 45.

Hidrograma 2014 - 2024



Las Figuras 46 a 48, presentan los hidrogamas, para cada uno de los escenarios analizados (RCP 2.6, RCP 8.5, y Combinado). Los tres hidrogramas muestran una misma estacionalidad básica

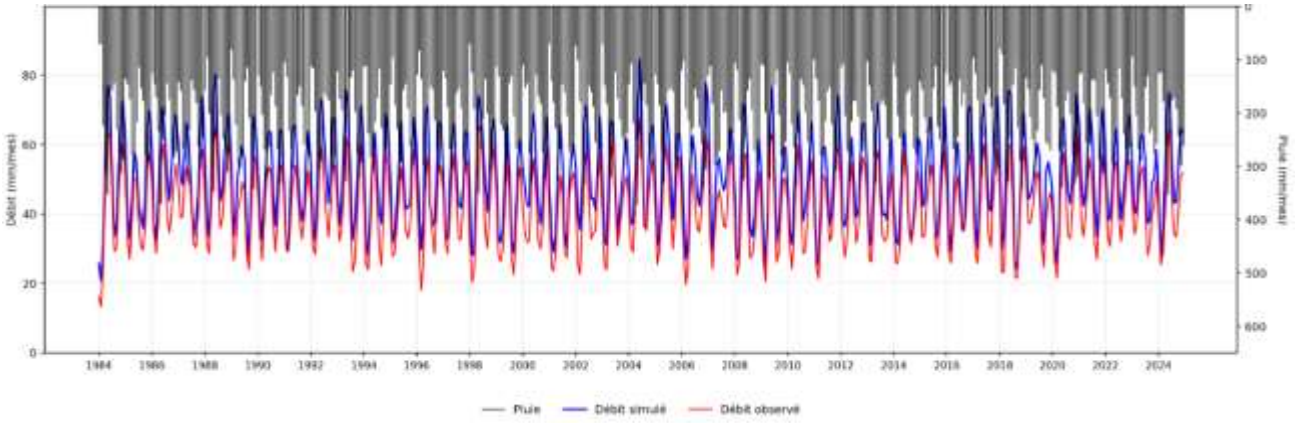
—con respuesta del caudal a los meses lluviosos—, pero no la misma eficiencia de transformación lluvia–escorrentía ni la misma capacidad de amortiguación.

En el escenario RCP 2.6, el caudal simulado se mueve de forma general en un rango aproximado de 5–55 mm/mes, con picos que rara vez sobrepasan los 60 mm/mes y mínimos que suelen mantenerse alrededor de 5–10 mm/mes. Esa señal indica un sistema que todavía conserva una fracción importante de su regulación: los ascensos del hidrograma son visibles, pero las recesiones siguen siendo relativamente suaves y el flujo no cae bruscamente después de cada evento.

Esto es coherente con un escenario de calentamiento moderado, donde el aumento de la demanda evaporativa existe, pero todavía no rompe la estructura reguladora del páramo. En ecosistemas andinos húmedos, la respuesta hidrológica suele mantenerse amortiguada mientras persistan coberturas naturales y suelos con alta capacidad de almacenamiento, especialmente andisoles y turberas, que desacoplan parcialmente la lluvia instantánea del caudal mensual.

Figura 46.

Hidrograma Escenario RCP 2.6



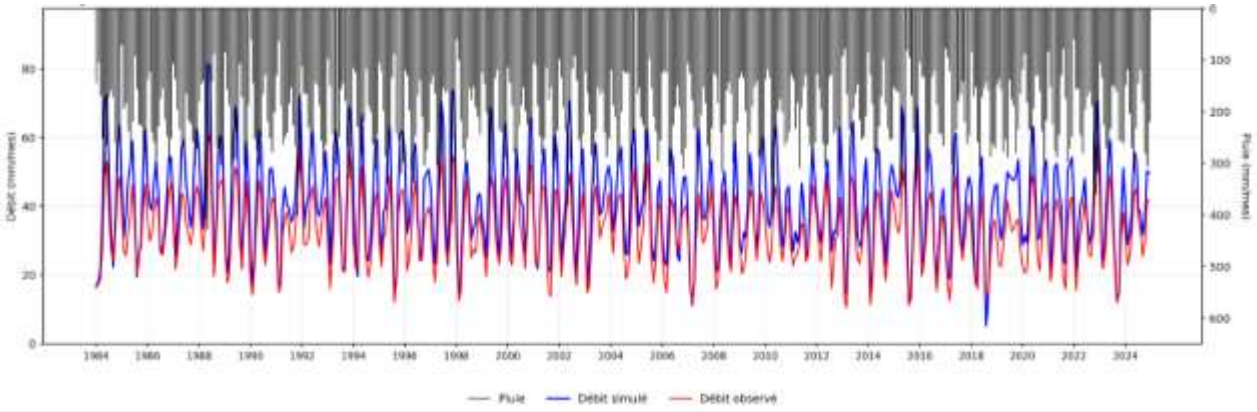
En el escenario RCP 8.5, el hidrograma cambia de manera cualitativa, no solo cuantitativa. Los picos del caudal simulado se desplazan hacia valores cercanos a 70–80 mm/mes, mientras que los mínimos descienden a rangos del orden de 2–8 mm/mes. Eso significa que el sistema pierde estabilidad intermensual: los máximos son más marcados, pero los caudales de sostén entre eventos son menores. Hidrológicamente, esto refleja una mayor variabilidad intraanual y una reducción de la fracción del agua que se conserva como almacenamiento o que alimenta el flujo base.

La lectura más rigurosa aquí es que el calentamiento no solo incrementa la evapotranspiración; también reorganiza la partición del agua dentro de la cuenca. Una mayor fracción de la precipitación disponible retorna a la atmósfera o se transforma en respuesta rápida,

y una menor fracción queda disponible para sostener caudales durante los periodos secos. Ese comportamiento coincide con lo señalado por el IPCC para regiones de montaña: el aumento térmico intensifica la demanda evaporativa, modifica la humedad del suelo y aumenta la irregularidad de los flujos, con impactos sobre la persistencia del caudal.

Figura 47.

Hidrograma Escenario RCP 8.5

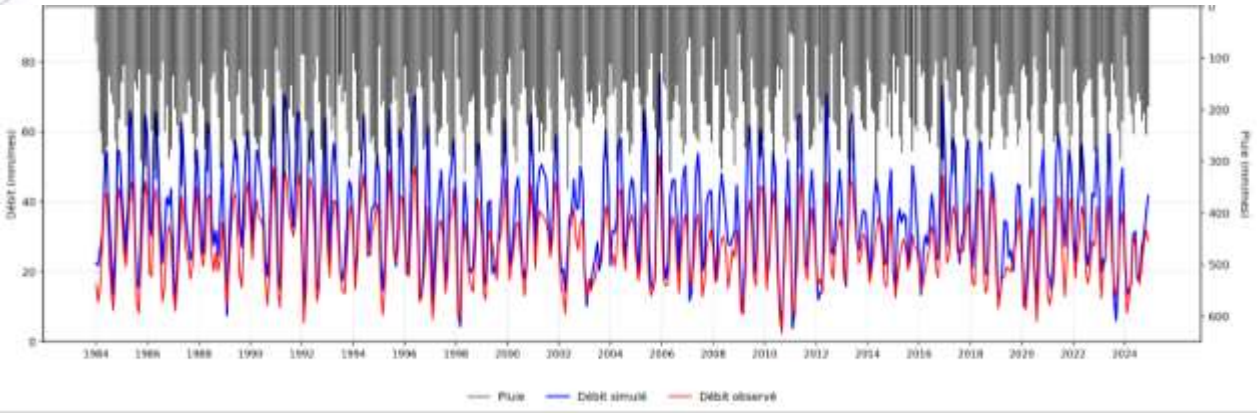


El escenario combinado es el que permite ir más allá en la interpretación, porque ahí el hidrograma deja de parecer solo una versión "más intensa" de RCP 8.5 y empieza a mostrar una pérdida funcional de la regulación ecohidrológica. En este caso, los picos del caudal simulado alcanzan aproximadamente 80–90 mm/mes, mientras que los mínimos se aproximan a 0–5 mm/mes. Esa amplitud no debe leerse solo como mayor variabilidad; debe entenderse como señal de un sistema más "flashy", con una respuesta más directa a la lluvia y una menor capacidad de liberar agua gradualmente. La causa no es únicamente climática.

La combinación de calentamiento fuerte con transformación del uso del suelo reduce intercepción, altera la estructura del suelo, disminuye macroporosidad funcional y limita la capacidad de almacenamiento, por lo que la cuenca transforma más rápidamente la lluvia en escorrentía y conserva menos agua para sostener el caudal base. En otras palabras, el escenario combinado no solo incrementa los extremos, sino que degrada la memoria hidrológica del sistema. Eso es exactamente lo que la literatura sobre páramos viene mostrando: los cambios de uso del suelo y la degradación de coberturas naturales aumentan la escorrentía rápida y reducen la regulación hídrica, especialmente cuando actúan junto con el calentamiento climático.

Figura 48.

Hidrograma Escenario Combinado



La comparación entre escenarios permite entonces una lectura más sólida. RCP 2.6 expresa una alteración moderada del régimen: el sistema sigue siendo regulado, aunque con algo menos de caudal base y un ligero aumento de la sensibilidad al clima. RCP 8.5 muestra ya una transición hacia un régimen más contrastado, donde el flujo mensual depende menos del almacenamiento interno y más de la ocurrencia de eventos lluviosos.

El escenario combinado representa la condición más crítica porque allí se suman dos procesos que se potencian entre sí: el aumento de la demanda evaporativa por temperatura y la pérdida de la capacidad de amortiguación por degradación del territorio. Desde la perspectiva de gestión, ese resultado es muy importante: no solo anticipa menor disponibilidad hídrica en estiaje, sino también mayor vulnerabilidad a picos de escorrentía y a respuestas más bruscas del sistema. En términos de servicios ecosistémicos, significa que el páramo pierde parte de su papel como regulador y se aproxima a un funcionamiento más inestable y menos resiliente frente a la variabilidad climática.

6. Recomendaciones para la Conservación y Restauración del Ecosistema de Páramo

El análisis integral desarrollado para el Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo evidencia una transición climática y antrópica que compromete la estabilidad funcional del ecosistema de páramo, expresada en el ascenso de las temperaturas mínimas, la reducción de coberturas naturales, la alteración de los patrones de escorrentía y la pérdida de capacidad de regulación hídrica. Estas dinámicas confirman la vulnerabilidad del sistema frente a la intensificación del cambio climático, un fenómeno global que, de acuerdo con el IPCC (2023), ya ha generado impactos irreversibles en ecosistemas de alta montaña. En este contexto, las recomendaciones planteadas buscan traducir los hallazgos del diagnóstico en acciones estratégicas

que orienten una restauración funcional del paisaje, bajo principios de sostenibilidad, resiliencia climática y gobernanza territorial.

La restauración del páramo debe trascender la revegetación convencional y orientarse hacia una restauración ecohidrológica integral, donde el agua sea el eje articulador del proceso. Los resultados del modelo GR2M y del análisis de cobertura confirman que la capacidad de regulación hídrica está directamente asociada a la continuidad de las coberturas naturales de bosque y herbazales de páramo. En coherencia con los lineamientos de adaptación basada en ecosistemas del IPCC AR6 (WGII, 2022), se recomienda promover procesos de reconstrucción de la funcionalidad hidrológica, priorizando zonas de recarga, nacimientos y turberas mediante la recuperación de suelos orgánicos, la restauración de microcuencas y la reactivación de flujos subsuperficiales.

La restauración debe incluir la incorporación de especies nativas hidrófilas y dominantes del páramo que aseguren una cobertura densa y persistente, evitando el uso de especies introducidas con baja adaptabilidad hídrica. A su vez, la aplicación de bioingeniería andina mediante barreras vivas, zanjas de infiltración y terrazas vegetadas permite aumentar la retención hídrica y reducir la erosión laminar. Este enfoque coincide con los resultados del PIGCCT-Boyacá (2021–2030), que destaca la restauración ecohidrológica como una medida prioritaria para mantener el equilibrio entre la oferta y la demanda de agua en escenarios de calentamiento sostenido.

El análisis multitemporal de coberturas (1984–2024) reveló un crecimiento sostenido del mosaico agropecuario y una pérdida neta de 2.254 hectáreas de cobertura boscosa, lo que ha incrementado la fragmentación del paisaje y reducido la conectividad ecosistémica. Para revertir estas tendencias, se requiere una transición agroecológica planificada, en la cual las actividades productivas incorporen prácticas regenerativas compatibles con la conservación del páramo. Experiencias recientes en los Andes tropicales (Gutiérrez et al., 2022; Cely et al., 2023) demuestran que los sistemas silvopastoriles, la agroforestería y la diversificación de cultivos de altura reducen las presiones sobre los suelos, aumentan la infiltración y disminuyen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

El fortalecimiento de los instrumentos de ordenamiento territorial debe incluir la integración de criterios climáticos y ecohidrológicos en la zonificación del PNR, con base en los resultados del presente diagnóstico. Esto implica delimitar áreas de amortiguación, zonas de restauración prioritaria y corredores de conectividad hídrica que aseguren la funcionalidad del sistema. Conforme al IPCC (2023), los esquemas de conservación efectivos deben vincular la

adaptación local con la mitigación global, mediante modelos de desarrollo bajo en carbono y el reconocimiento del capital natural como activo estratégico.

La resiliencia del páramo depende no solo de su restauración ecológica, sino de la construcción de una gobernanza climática policéntrica, donde converjan las autoridades ambientales, las comunidades locales, la academia y los actores productivos. Se propone consolidar un Sistema de Monitoreo Climático y Ecohidrológico Local que articule sensores de temperatura, humedad y caudal con bases de datos satelitales y modelos hidrológicos, permitiendo evaluar tendencias y retroalimentar las decisiones de manejo. Este tipo de plataformas se consideran fundamentales para la adaptación temprana según el IPCC AR6 (Sección 4.8.3), que enfatiza la necesidad de tecnologías accesibles y conocimiento local para la gestión de ecosistemas de alta montaña.

La gobernanza adaptativa debe también apoyarse en la educación ambiental, promoviendo la figura de guardapáramos y mecanismos de pago por servicios ecosistémicos (PSE) vinculados a la regulación hídrica y captura de carbono. Estas estrategias deben acompañarse de acuerdos comunitarios de conservación, integrados en los planes de desarrollo municipales y los comités interinstitucionales ambientales municipales (CIDEA), garantizando coherencia entre la acción local y las metas nacionales de adaptación (MinAmbiente, 2023).

El conjunto de resultados y recomendaciones aquí expuestos permiten afirmar que el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo constituye un nodo estratégico para la adaptación territorial frente al cambio climático en la Cordillera Oriental. La conservación y restauración del páramo deben orientarse hacia un modelo de restauración funcional del ciclo hidrológico, sustentado en ciencia, participación y planificación climática de largo plazo. La adopción de estrategias de restauración ecohidrológica, transición productiva sostenible y monitoreo climático adaptativo representa no solo una respuesta ambiental, sino una oportunidad de desarrollo resiliente y equitativo para las comunidades locales.

En coherencia con lo señalado por el IPCC (2023) y el PIGCCT Boyacá (2022), cada décima de grado de calentamiento adicional compromete de forma exponencial la estabilidad hídrica y ecológica del páramo. Por tanto, las acciones que se implementen durante esta década serán determinantes para asegurar la persistencia de los servicios ecosistémicos, la seguridad hídrica regional y la integridad ambiental de la alta montaña boyacense.

7. Síntesis de Resultados

El diagnóstico hidrológico del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo permitió identificar una modificación progresiva de sus patrones hidrológicos, asociada a la interacción entre la variabilidad climática, el aumento de la temperatura, la transformación de las coberturas naturales y la alteración de los procesos de regulación hídrica. En conjunto, los resultados muestran que el ecosistema mantiene aún una funcionalidad hidrológica importante, pero con señales claras de deterioro en su capacidad de almacenamiento, amortiguación y liberación gradual del agua.

En primer lugar, el diagnóstico hidroclimático evidenció que la precipitación media anual del área de estudio es de 1468,47 mm/año, con un comportamiento claramente bimodal, caracterizado por máximos en abril–mayo y octubre–noviembre, y mínimos relativos en enero–febrero y junio–agosto. A escala mensual, la precipitación media varía entre 48,58 mm en enero y 183,94 mm en noviembre, lo que confirma la influencia de la migración semianual de la Zona de Convergencia Intertropical sobre la dinámica hidrológica del área. Este régimen pluviométrico constituye el principal forzante del sistema, al controlar los procesos de recarga, escorrentía y almacenamiento hídrico.

En cuanto a la temperatura, los resultados muestran un comportamiento diferenciado entre máximas y mínimas. Las temperaturas máximas medias anuales oscilaron entre 11,8 y 13,5 °C, manteniéndose relativamente estables en el periodo 1984–2024, mientras que las temperaturas mínimas evidenciaron un incremento sostenido, alcanzando un promedio cercano a 4,8 °C en las décadas recientes, con una tasa de ascenso aproximada de +0,4 °C por década. Este calentamiento nocturno progresivo reduce la amplitud térmica diaria y afecta procesos fundamentales del páramo, como la condensación, la retención de humedad y la recarga hídrica en suelos orgánicos.

A partir de estas variables se estimó la evapotranspiración por el método de Thornthwaite, obteniéndose valores medios mensuales entre 72 y 82 mm/mes, con una ETR anual del orden de 900 mm/año, coherente con condiciones de alta montaña andina donde la demanda evaporativa es moderada por efecto de las bajas temperaturas, la nubosidad y la alta humedad relativa. Esta estimación confirma que, aunque el ecosistema presenta una demanda atmosférica importante, esta se encuentra todavía dentro de rangos compatibles con sistemas húmedos de páramo.

Con base en la precipitación y la evapotranspiración se calculó el primer balance hídrico climatológico, el cual mostró un sistema excedentario y relativamente estable. La

evapotranspiración real anual fue de 909,43 mm, equivalente aproximadamente al 62 % de la precipitación anual, mientras que el exceso hídrico anual acumulado alcanzó 562,88 mm, es decir, cerca del 38 % de la precipitación. El balance mensual evidenció déficit hídrico nulo (0 mm) durante todo el año, un almacenamiento de agua en el suelo que alcanza 100 mm desde marzo y se mantiene cercano a ese valor durante gran parte del ciclo anual, y excesos mensuales entre 14,43 mm en marzo y 109,73 mm en octubre. En conjunto, estos resultados indican que el PNR Pan de Azúcar–El Consuelo ha funcionado históricamente como un sistema con buena disponibilidad hídrica y alta capacidad de amortiguación frente a periodos secos de corta duración.

El análisis multitemporal de coberturas para el periodo 1984–2024 mostró una transformación progresiva del paisaje, con reducción de coberturas naturales y aumento de áreas de uso agropecuario. El bosque denso alto pasó de 4.915 ha (17,0 %) en 1984 a 4.190 ha (14,5 %) en 2024, mientras que el bosque denso bajo se redujo de 7.227 ha (25,0 %) a 5.698 ha (19,7 %). En conjunto, la pérdida de cobertura boscosa fue de aproximadamente 2.254 ha, lo que representa un deterioro significativo de la estructura vegetal del área protegida. A esto se suma la disminución del herbazal denso, que pasó de 14.165 ha (49,0 %) a 13.153 ha (45,5 %), y la reducción de lagunas, lagos y ciénagas de 87 ha a 58 ha.

En contraste, el mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales aumentó de 2.515 ha (8,7 %) en 1984 a 5.810 ha (20,1 %) en 2024, lo que evidencia una expansión sostenida de la frontera agropecuaria dentro y en los bordes del ecosistema. Esta transformación tiene implicaciones directas sobre la dinámica hidrológica, ya que la reducción de coberturas naturales disminuye la infiltración, reduce el almacenamiento de agua en el suelo, incrementa la compactación y favorece una mayor generación de escorrentía superficial. En términos funcionales, el cambio de cobertura confirma que el deterioro ecohidrológico del páramo no responde únicamente al clima, sino también a una presión antrópica progresiva sobre el territorio.

En la modelación hidrológica mediante SWAT, los resultados espaciales evidencian cambios consistentes en la distribución de la evapotranspiración, la escorrentía superficial y el caudal base (Qbase) bajo los diferentes escenarios evaluados.

En el escenario histórico (1984–2024), los mapas muestran una distribución relativamente heterogénea, controlada por factores altitudinales y cobertura vegetal. La evapotranspiración real se sitúa en valores cercanos a 500–520 mm/año, con mayores magnitudes en zonas de menor altitud. La escorrentía superficial presenta rangos aproximados entre 150 y 360 mm/año,

concentrándose en sectores con mayor intervención o menor capacidad de infiltración. Por su parte, el caudal base (Qbase) alcanza valores entre 280 y 320 mm/año en áreas mejor conservadas, evidenciando una adecuada capacidad de almacenamiento subsuperficial y regulación hídrica.

Bajo el escenario RCP 2.6, los mapas reflejan cambios moderados. La evapotranspiración aumenta ligeramente hasta valores cercanos a 540 mm/año, mientras que la escorrentía superficial se incrementa de forma leve, alcanzando valores próximos a 290 mm/año. El caudal base disminuye a rangos de aproximadamente 260–280 mm/año, lo que indica una reducción incipiente de la capacidad de regulación, aunque el sistema mantiene aún su funcionalidad.

En el escenario RCP 8.5, los cambios son más notorios. La evapotranspiración alcanza valores de 550–560 mm/año, con una expansión espacial de las zonas de alta demanda evaporativa. La escorrentía superficial aumenta hasta valores cercanos a 320 mm/año, con una mayor continuidad espacial de áreas de alta escorrentía. En contraste, el caudal base se reduce a rangos de 240–260 mm/año, evidenciando una disminución en la recarga subsuperficial y en la capacidad de regulación del sistema.

Finalmente, el escenario combinado (uso del suelo + RCP 8.5) presenta la mayor alteración hidrológica. La evapotranspiración alcanza valores de 560–570 mm/año, la escorrentía superficial se incrementa hasta aproximadamente 340 mm/año, y el caudal base desciende a rangos de 200–240 mm/año, con pérdida de continuidad espacial en las zonas de mayor recarga. Estos resultados evidencian una transición hacia un sistema dominado por flujos superficiales y con menor capacidad de regulación hídrica.

La modelación hidrológica mediante GR2M permitió analizar la evolución temporal de los caudales a partir de hidrogramas mensuales, evidenciando la respuesta del sistema frente a la variabilidad climática y los escenarios de cambio.

Los hidrogramas históricos (1984–2024) muestran una adecuada correspondencia entre la precipitación y el caudal simulado (Qsim), con picos asociados a los periodos lluviosos y descensos suaves durante las épocas secas, lo que refleja una alta capacidad de regulación hídrica del ecosistema en condiciones relativamente conservadas . Sin embargo, a lo largo de las décadas se observa una tendencia hacia una mayor variabilidad intraanual, con picos más pronunciados y periodos de recesión más rápidos, lo que sugiere una disminución progresiva de la capacidad de almacenamiento del sistema.

En los escenarios adicionales, los hidrogramas evidencian cambios más marcados en la respuesta hidrológica. Bajo condiciones de cambio climático, se observa un aumento en la magnitud de los picos de caudal durante eventos de precipitación, acompañado de descensos más abruptos, lo que indica una respuesta más rápida del sistema. Este comportamiento es consistente con el incremento de la escorrentía superficial y la disminución de la infiltración.

En el escenario combinado (uso del suelo + clima), los hidrogramas muestran la mayor alteración: los picos de caudal son más intensos y concentrados, mientras que los caudales base disminuyen de manera sostenida, evidenciando una menor capacidad del sistema para mantener aportes en periodos secos. Este patrón confirma una transición desde un régimen hidrológico regulado hacia uno más variable, dominado por respuestas rápidas y con menor almacenamiento subsuperficial.

La integración de estos resultados confirma que el PNR Pan de Azúcar – El Consuelo enfrenta una transición ecohidrológica crítica, caracterizada por la reducción de los caudales base, la intensificación de los pulsos de escorrentía y el aumento de la temperatura mínima, lo que compromete la función de "esponja hídrica" del páramo. En conjunto, los valores registrados de precipitación, ETP y rendimiento hídrico decreciente demuestran un balance hidrológico frágil, dependiente del mantenimiento de la cobertura natural. Los hallazgos se alinean con las proyecciones del IPCC (2023) y del PIGCCT Boyacá (2022), que advierten sobre una intensificación del ciclo hidrológico y una pérdida progresiva de la capacidad de regulación de los páramos andinos.

8. Conclusiones

En primera instancia, el análisis climático e hidrológico confirmó que la dinámica del área protegida se encuentra marcada por una creciente variabilidad intra e interanual, con reducción de los aportes de caudal base y aumento de los pulsos de escorrentía superficial. Estos resultados coinciden con las proyecciones del IPCC (2023) y con el PIGCCT Boyacá, que señalan una intensificación del ciclo hidrológico y una pérdida progresiva de la capacidad de regulación de los páramos.

La modelación hidrológica mediante los esquemas GR2M y SWAT, alimentados a partir de un caudal proxy debido a la ausencia de series observadas continuas, permitió suplir vacíos de información y generar aproximaciones técnicas válidas. Los resultados obtenidos demostraron una

disminución del rendimiento hídrico y una mayor susceptibilidad a crecidas súbitas, lo que refleja un deterioro en la función ecosistémica de los páramos como reguladores de flujos de agua.

De manera complementaria, el análisis multitemporal de coberturas evidenció una reducción progresiva de áreas de bosque denso y matorrales, acompañada por un aumento sostenido de las coberturas agropecuarias. Esta transformación genera fragmentación del paisaje, pérdida de conectividad ecológica y reducción de la capacidad de almacenamiento hídrico en los suelos, lo cual intensifica los procesos de erosión y degrada la base natural de la oferta hídrica.

La conservación del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo requiere consolidar un enfoque de gestión ecohidrológica integral, donde la restauración de coberturas naturales, la regulación del ciclo hídrico y la adaptación al cambio climático actúen de manera sinérgica para mantener la funcionalidad del ecosistema. La conservación del área protegida debe superar los enfoques de protección pasiva e integrar procesos de restauración funcional, monitoreo climático continuo y gobernanza adaptativa, con el fin de garantizar la continuidad de los servicios ecosistémicos y consolidar el papel estratégico del páramo como regulador natural del ciclo hídrico, esencial para la resiliencia ambiental y la seguridad hídrica regional.

Los resultados obtenidos demuestran que el Parque Natural Regional se encuentra en un estado de sensibilidad hidrológica que lo hace altamente vulnerable a las presiones climáticas y antrópicas, y confirman la necesidad de continuar generando estudios a mayor detalle que profundicen en los procesos de regulación hídrica y en la relación entre dinámica climática, uso del suelo y seguridad hídrica regional.

Referencias Bibliográficas

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

AGS Ltda, & Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2017). Documento técnico del Plan de Manejo del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo.

Ahady, A., Pekkan , E., & Sorman , A. (2022). Evaluating the hydrological performance of gridded precipitation datasets using GR2M for a mountainous watershed in Turkey. *Arab J Geosci 15, 792*. doi:https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/s12517-022-10031-7

Alemayehu , D., Asfaw, A., & Gebremariam, E. (2022). Integrating SWAT and remote sensing to assess land use impact on water yield in Ethiopian highlands. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. doi:https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100737

Arango, J., Gómez , J., & Duque, A. (2019). Impacto del uso del suelo sobre la oferta hídrica en la cuenca del río Chinchiná. *Revista Gestión y Ambiente, 22(3)*, 55-70. doi:https://doi.org/10.15446/ga.v22n3.77725

Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. (2012). Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2012. *Texas Water Resources Institute*.

Barrera Sarmiento, J. (2021). Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, Boyacá. *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*.

Barrera Sarmiento, J. (2021). Evaluación del efecto del cambio climático en la hidrología superficial de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota, Boyacá. *Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito*.

Bekele, D., Tadesse, S., & Alemayehu, T. (2020). Performance of HEC-HMS and SWAT to simulate streamflow in the Upper Awash River Basin, Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change, 12(7), 3005–3020., 12(7)*, 3005-3020.

Burrough, P., & McDonnell, R. (1998). Principles of geographical information system. *Oxford University Press*.

Buytaert, W., Sevink, J., & Cuesta, F. (2014). Cambio climático: La nueva amenaza para los páramos. *CAMAREN*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/262675438_Cambio_climatico_la_nueva_amenaza_para_los_paramos

Castaño, J., Mejía, D., & Zuluaga, L. (2020). Análisis hidrológico de los impactos del cambio climático en el páramo de Sonsón (Antioquia, Colombia). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 90-102. doi:https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200621

Chowdhury, K., Sahariah, D., & Debnath, J. (2024). Assessment of the land use/land cover and climate change impact on the hydrological regime of the Kulsi River catchment, Northeast India. *Sustainable Water Resour. Managment*. doi:Assessment of the land use/land cover and climate change impact on the hydrological regime of the Kulsi River catchment, Northeast India

Chuvieco, E. (2010). Fundamentos de teledetección. *Ediciones RIALP*.

Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2020). Plan de Manejo del Parque Natural Regional Pan de Azúcar - El Consuelo. *Corpoboyacá*. Retrieved from https://www.corpoboyaca.gov.co/

Corporación Autónoma Regional de Boyacá. (2024, Abril 22). *Corpoboyacá*. Retrieved from https://www.corpoboyaca.gov.co/noticias/perdida-de-espejo-de-agua-en-lagunas-del-parque-natural-pan-de-azucar-y-consuelo-efecto-de-la-crisis-climatica-en-boyaca/

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la, M. d. (2018). Evaluación de los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en la regulación hídrica de la cuenca del río Caracolí. Retrieved from https://caracoli.cdmb.gov.co

Darji, K., Patel, D., & Prakash, I. (2022). Comparison of HEC-HMS and SWAT Hydrological Models in Simulating Runoff at Machhu River Catchment, Gujarat, India. *Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering*. doi:https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/978-981-16-4629-4_11

Daza Torres, M., Hernández Florez, F., & Triana , F. (2014). Efecto de Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo Sumapaz - Colombia. *Facultad Nacional de Agronomía Medellín, Universidad Nacional*, 7189-7200.

Ditthakit, P., Pinthong, S., & Salaeh, N. (2021). Using machine learning methods for supporting GR2M model in runoff estimation in an ungauged basin. *Sci Rep 11, 19955*. doi:https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1038/s41598-021-99164-5

Fanta, S., & Sime , C. (2022). Performance assessment of SWAT and HEC-HMS model for runoff simulation of Toba watershed, Ethiopia. *Sustainable Water Resour. Managment*. doi:https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/s40899-021-00596-8

Global Water Partnership, G. (2000). Integrated Water Resources Management. (S. Stockholm, Ed.) *TAC Background Papers No. 4*.

Gobernación de Boyacá. (2021). Plan Integral de Gestión de Cambio Climático Territorial de Boyacá (PIGCCT).

Gómez, M., & Bosque, J. (2009). Evaluación de cambios en la cobertura del suelo y su impacto en la escorrentía en una cuenca de montaña. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 49*, 87-104.

González, J., Rodríguez, J., & Pérez, M. (2018). imulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca del río Aipe, Huila, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 42(163)*, 123-135.

Gyamfi, C., Kabo-Bah, A., & Obuobie, E. (2023). Modeling the impact of land use and climate change on water availability in a tropical highland catchment in Ghana. *Sustainable Water Resources Management,, 9(2)*, 50. doi: https://doi.org/10.1007/s40899-023-00787-y

Herrera, L., Suárez, D., & Méndez, M. (2022). Evaluación de la dinámica hidrológica del páramo de Santurbán frente al cambio climático. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales,, 19(1)*, 89-105. doi:https://doi.org/10.31243/rcca.v19n1.2022.1234

Hodstede, R., Segarra, P., & Mena , P. (2003). Los páramos del mundo. *Global Peatland Initiative/EcoCiencia*.

IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & Cancillería. (2017). ercera Comunicación Nacional de Colombia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).* Retrieved from https://www.ideam.gov.co/

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios , A. (2024, Noviembre 8). *¿Quiénes Somos?* Retrieved from IDEAM: https://www.google.com/search?q=https://www.ideam.gov.co/web/ideam/quienes-somos

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios , A., Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, & Cancillería de Colombia. (2015). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático.

Kerlinger, F., & Lee, H. (2002). *Investigación del comportamiento: Métodos de investigación en ciencias sociales.* McGraw-Hill.

Khan, M., Ahmad, S., & Ali, N. (2023). Climate Change Investigation of Swat River Using HEC-HMS Hydrological Model. *International Journal of Hydrology, 7(2)*, 89-98.

Kumar, R., Singh, S., & Sharma, P. (2023). Application of hydrological models in climate change framework for water resources management. *Journal of Water and Climate Change, 14(9)*, 3150-3165. doi:https://doi.org/10.2166/wcc.2023.3150

Kundzewicz, Z., & Robson, A. (2004). Change detection in hydrology—a review. *Hydrological Sciences Journal, 49*, 7-19.

López, D., González, C., & Niño , F. (2021). valuación multitemporal del cambio en el uso del suelo en la cuenca del río Chitagá (Norte de Santander). *Ingeniería y Región, 19(1)*, 25-41. doi:https://doi.org/10.25054/01243725.2735

Maidment, D. (1993). *Handbook of hydrology.* McGraw-Hill.

Millennium Ecosystem Assessment, M. (2005). Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis. *Island Press*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo , T. (2010). Guía para la elaboración de POMCA. . *Bogotá, Colombia*.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo, T. (2010). Decreto 2372 de 2010. Por el cual se reglamenta el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP). *Diario Oficial No. 47.768.*

Molina, J., Vargas, P., & León, A. (2019). ambios de cobertura vegetal y pérdida de servicios ecosistémicos en páramos colombianos. *Revista de Geografía y Medio Ambiente, 18 (2)*, 45-64.

Moreno, C., Palma, J., Trilleras, J., & Salamanca, J. (2022). Vulnerabilidad ecológica del complejo de páramos Chilí-Barragán, Colombia, a los incrementos de temperatura en un escenario de cambio climático. *Revista Geográfica, 164*, 21-37. doi:https://doi.org/10.35424/regeo.164.2022.988

Mouelhi, S., Michel, C., Perin , C., & Andréassian, V. (2006). Stepwise development of a two-parameter monthly water balance model. *Journal of Hydrology, 318*, 1-4.

Narváez, M., & Roa, J. (2021). Evaluación de los efectos del cambio climático sobre los caudales en la cuenca del río Tunjuelo (Bogotá, Colombia). *Ingeniería y Universidad, 25(2)*, 204-226.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático, I. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático, I. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático, I. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change.

Panel Intergubernamental de Cambio Climático, I. (2021). Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change 2021 – The Physical Science Basis. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Ramírez, F., Rodríguez , A., & Peña, G. (2020). Modelación hidrológica de la cuenca del río Bogotá utilizando el modelo SWAT. *Revista Colombiana de Ingeniería, 32(2)*, 155-170.

Rincón Achuri, L. (2019). Aplicación de los modelos lluvia-escorrentía GRM2 y GR4J en la cuenca del rio Guali para la gestión de los recursos hídricos. *Facultad de Ingeniería Ambiental - Universidad Santo Tomás*.

Romero, G., Bautista , D., & Cárdenas , L. (2020). Variabilidad climática y cambio climático en ecosistemas altoandinos de Colombia. *Revista Gestión y Ambiente, 23*, 30-47. doi:https://doi.org/10.1234/gyamb.v23n1.2020

Sadio, C., Faye, C., & Pande , C. (2023). Hydrological response of tropical rivers basins to climate change using the GR2M model: the case of the Casamance and Kayanga-Géva rivers basins. *Environ Sci Eur*. doi:https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1186/s12302-023-00822-4

Sahu, M., SHwetha , H., & Dwarakish, G. (2023). State-of-the-art hydrological models and application of the HEC-HMS model: a review. *Earth Syst. Environmental*. doi:https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1007/s40808-023-01704-7

Salmi, T., Määttä, A., Antila , P., Ruoho-Airola, T., & Amnell, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann–Kendall test and Sen's slope estimates. . *Finnish Meteorological Institute.*

Silva, O., & Rojas, L. (2023). Evaluación de impactos ecohidrológicos del cambio climático en una cuenca de la región central de Venezuela. *Revista de Ciencias Ambientales, 57(2)*, 45-60.

Siriwardena, L., Western, A., & Chiew, F. (2010). Rainfall-runoff modelling in dryland catchments, Sauce Grande, Argentina. *Hydrological Sciences Journal, 55(7)*, 1202-1216.

Tadesse, S., & Fenta, A. (2020). Evaluating the performance of HEC-HMS and SWAT hydrological models in the Katar River Basin. *Journal of Water Resource and Protection, 12(6)*, 456-470.

Torres, A., & Rodríguez, C. (2023). Simulación hidrológica en zonas de montaña usando modelos GR2M y SWAT bajo escenarios de cambio climático. *Revista Colombiana de Hidrología Aplicada, 12*, 30-47.

Vuille, M., Bradley, R., Werner, M., & Keimig, F. (2003). 20th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results. *Climate Change*.

World Meteorological Organization, W. (2017). Guide to Climatological Practices (WMO-No. 100). *Geneva: WMO*.

Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Modelación Hidrológica de la Cuenca del Río Llave a partir de Datos de Precipitación Observada y de Satélite, Periodo 2011-2015. *Tecnología y Ciencias del Agua, 9(5)*, 85-105. doi:https://doi.org/10.24850/j-tyca-2018-05-04

Zubieta, R., Laqui, W., & Lavado, W. (2018). Modelación hidrológica de la cuenca del río Llave a partir de fatos de precipitación observada y de satélite, periodo 2011-2015. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 85-105.

Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G., Jones, P., Klein Tank, A., Peterson, T. C., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2*(6), 851–870. https://doi.org/10.1002/wcc.147

Anexos

Anexo A. Geología Estructural y Geomorfología del Área de Estudio

1. Geología Estructural

Como lo indica la Corporación Autónoma regional de Boyacá (2017), el entorno regional del PNR Pan de Azúcar-El Consuelo, se localiza en la Cordillera Oriental en la zona central. Desde el punto de vista estructural, el área de estudio se encuentra afectada en su mayoría por estructuras de plegamiento, como: Anticlinales y Sinclinales, en su mayoría de corta extensión y expresión en el área de estudio.

- **Anticlinal de Arcabuco**

Se prolonga hacia el norte en el flanco oriental, aflorando en el sector noroccidental de la Plancha 172 Paz de Río con exposiciones de las formaciones Montebel y La Rusia. Presenta una orientación aproximada N35°E y un plano de falla inclinado hacia el occidente, con buzamientos entre 25° y 35°. En el área de estudio se identifica la extensión del flanco occidental de esta estructura, donde también afloran las formaciones Montebel y Rusia, acompañadas por pliegues secundarios sinclinales y anticlinales de escasa longitud. En conjunto, la estructura forma parte de un bloque tectónico limitado al oriente por la Falla de Boyacá (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

- **Falla de Boyacá**

Constituye una estructura regional de carácter inverso que separa dos provincias tectónicas contrastantes: al occidente, la provincia de Arcabuco, correspondiente al bloque colgante, caracterizada por pliegues amplios, y al oriente, la provincia de Paipa, definida por un sistema de cabalgamientos con vergencia sureste que conforma el bloque yacente. De acuerdo con Vargas et al. (1981), esta falla pone en contacto la Formación La Rusia con las formaciones Une y Chipaque, extendiéndose hacia el norte hasta la Plancha 152 Soatá, donde relaciona la Formación Montebel y rocas volcánicas triásico–jurásicas con unidades del Cretácico Superior. En la Plancha 171 Duitama (Servicio Geológico Colombiano, 1976), ubicada más al occidente, vincula unidades del Jurásico y Cretácico con depósitos del Paleógeno y Neógeno (Renzoni, 1981).

En el área del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo, esta falla se sitúa en el sector nororiental, donde genera el contacto entre riolitas grisáceas de edad jurásica (JRr) y sedimentitas cretácicas de la Formación Capacho (Ksc), mostrando una orientación N35°E y un plano de falla con inclinación hacia el occidente (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

2. Geomorfología

En el entorno regional del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo predomina un relieve montañoso con laderas de pendientes fuertes a abruptas, modeladas por los procesos tectónicos asociados a la evolución y levantamiento de la Cordillera Oriental. Como resultado, se configuran valles profundos con laderas de perfiles rectos y cóncavo–convexos, los cuales se encuentran continuamente modificados por procesos erosivos y meteóricos. En el PNR objeto de estudio, se presentan geoformas de origen glaciar y estructural representadas por montañas con crestas agudas y pendientes empinadas de moderada a severamente disectadas. La presencia de lagunas formadas por depósitos de morrenas es un rasgo característico (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

- **Ambiente estructural**

Las geoformas predominantes en el área de estudio se encuentran estrechamente vinculadas al levantamiento de la Cordillera Oriental y a la prolongación de estructuras como el flanco oriental del Anticlinal de Arcabuco. Estas condiciones estructurales favorecen el desarrollo de laderas de sierra homoclinal denudada y geoformas asociadas, como contrapendientes y laderas controladas por la competencia de las rocas sedimentarias y el grado de inclinación o buzamiento de sus estratos. En contraste, la disposición masiva de las rocas ígneas y metamórficas propicia la formación de espolones. Este ambiente estructural ocupa aproximadamente el 82 % de la superficie total del área analizada (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

En el área de estudio, las geoformas vinculadas al ambiente fluvial se expresan principalmente como valles en “V”, conocidos localmente como *vallecitos*. Estos depósitos fluviales se distribuyen hacia el sector suroccidental, particularmente en la vereda San José de la Montaña (municipio de Belén) y en la vereda Piedras Blancas (municipio de Santa Rosa de Viterbo). El ambiente fluvial ocupa aproximadamente el 4,9 % de la superficie total del área, y su rasgo morfológico más representativo corresponde a los *vallecitos*. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

El ambiente glacial está representado por geoformas originadas por la acción erosiva del hielo en áreas de alta montaña, cuya dinámica generó laderas glaciales, circos, valles y depósitos asociados. En el área de estudio este ambiente abarca aproximadamente el 10,7 % de la superficie total, siendo sus subunidades más características el valle glacial y el circo glacial (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

- **Ambiente Denudacional**

Se desarrolla a partir de la degradación de geoformas estructurales preexistentes, cuya morfología está controlada por procesos exógenos de meteorización, erosión y transporte de sedimentos. Estos agentes han remodelado las geoformas morfoestructurales originales, dejando remanentes y, en algunos casos, generando nuevas formas por acumulación de materiales. En el área de estudio este ambiente ocupa aproximadamente el 2,3 % de la superficie total, teniendo como expresión característica las lomas denudadas. (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2020).

Anexo B. Unidades Cartográficas de Suelos

Tabla 19.

Unidades Cartográficas de Suelos PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Paisaje	Símbolo	Unidades Cartográficas	Localización	Área* (Ha)
Montañas estructurales	MEEg	Complejo Lithic Dystrocrepts, Humic Dystrocrepts, Typic Haplohemists, Afloramientos Rocosos	Abarca casi la totalidad del área de norte a sur. Municipios de Tutazá, Belén, Cerinza y Santa Rosa de Viterbo	19.114,75
Montañas estructurales	MGEg	Complejo Humic Lithic Dystrocrepts, Afloramientos Rocosos, Typic Hapludands	Se localiza al suroccidente del área al noroeste del municipio de Santa Rosa de Viterbo	841,36
Montañas estructurales	MHEf / MHEg	Complejo Lithic Udorthents, Oxic Dystropepts, Afloramientos Rocosos	Se localizan hacia el noreste del área en los municipios de Cerinza, Belén Vereda El Bosque y Tutazá veredas Páramo y Tobal	6.134,28
Montañas estructurales	MHVd / MHVe / MHVf	Asociación Typic Hapludands, Humic Pachic Dystropepts, Typic Dystropepts	Se localizan hacia el suroeste y en muy pequeña proporción hacia borde noreste del área de estudio. Municipios de Cerinza, Belén Vereda El Bosque y Tutazá veredas Páramo y Tobal, y Santa Rosa de Viterbo	2.625,30
Montañas estructurales	MMCd2	Asociación Typic Haplusteepts, Lithic Haplusteepts, Lithic Dystrostepts	Se localizan en un área muy pequeña hacia el sur del municipio de Santa Rosa de Viterbo en las veredas de Cucubo y Quebrada Grande	139,45
Montañas estructurales	MMHa	Complejo Typic Ustifluvents, Fluventic Haplusteepts, Aquic Haplusteepts	Se localizan en un pequeño sector en las veredas de Cucubo y Quebrada Grande del municipio de Santa Rosa de Viterbo	54,2

** El área sde refiere a la cuantificación de Ha dentro del PNR Pan de Azúcar El Consuelo*
Nota: Adaptado de AGS Ltda & Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2017.

Anexo C. Metodología Procesamiento Datos Hidroclimáticos

El desarrollo metodológico de la investigación se estructuró con el propósito de responder a los objetivos planteados: caracterizar los patrones hidrológicos frente a la variabilidad y el cambio climático, identificar y cuantificar las transformaciones del uso del suelo, y diagnosticar los impactos combinados de estas dinámicas sobre el recurso hídrico en el Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo. Para tal fin se implementó una metodología de trabajo que integró el análisis estadístico de series climáticas, la teledetección y cartografía temática, la modelación hidrológica conceptual y distribuida, y la integración de resultados en un marco de gestión territorial.

1. Fuentes de información

La base de datos climática estuvo conformada por series históricas de precipitación diaria para el periodo comprendido entre 1984 y 2024, correspondientes a setenta y seis (76) estaciones meteorológicas disponibles en el área de influencia. De manera complementaria, se utilizaron registros de temperatura máxima y mínima de estaciones representativas, así como información de reanálisis climático y proyecciones regionales generadas por el IDEAM (2015) y los reportes del IPCC en su Sexto Informe de Evaluación (IPCC, 2023). Para garantizar la pertinencia instrumental, se priorizaron las tipologías que registran directamente estas variables: climatológica principal (CP), climatológica ordinaria (CO), agrometeorológica (AGM) y pluviométrica/pluviográfica (PM/PG) para el caso de precipitación.

La información hidrometeorológica se obtuvo de la plataforma oficial del Sistema de Información Hidrológica y Meteorológica – DHIME del IDEAM (Datos Hidrológicos y Meteorológicos), que constituye la base institucional para la consulta, descarga y gestión de registros históricos en Colombia. Esta plataforma permite acceder a series de precipitación, temperatura, evaporación y caudal, con validaciones básicas de calidad y metadatos asociados (estado de la estación, ubicación, fecha de instalación o retiro, entre otros).

La información espacial sobre el uso y la cobertura del suelo se obtuvo a partir de imágenes satelitales de las misiones Landsat, seleccionadas para los años 1984, 1994, 2004, 2014 y 2024. Estas imágenes fueron procesadas y clasificadas en ArcMap con el objetivo de generar una secuencia multitemporal que permitiera identificar y cuantificar las transformaciones del territorio.

En cuanto al marco normativo y de planificación, se consultaron documentos técnicos tales como el Plan de Manejo del área protegida (Corpoboyacá, 2021), el Plan Integral de Gestión del

Cambio Climático Territorial de Boyacá (Gobernación de Boyacá & Corpoboyacá, 2022), los POMCA vigentes en la región, y literatura científica reciente sobre modelación hidrológica en ecosistemas de montaña.

2. Control de calidad y procesamiento de datos climáticos

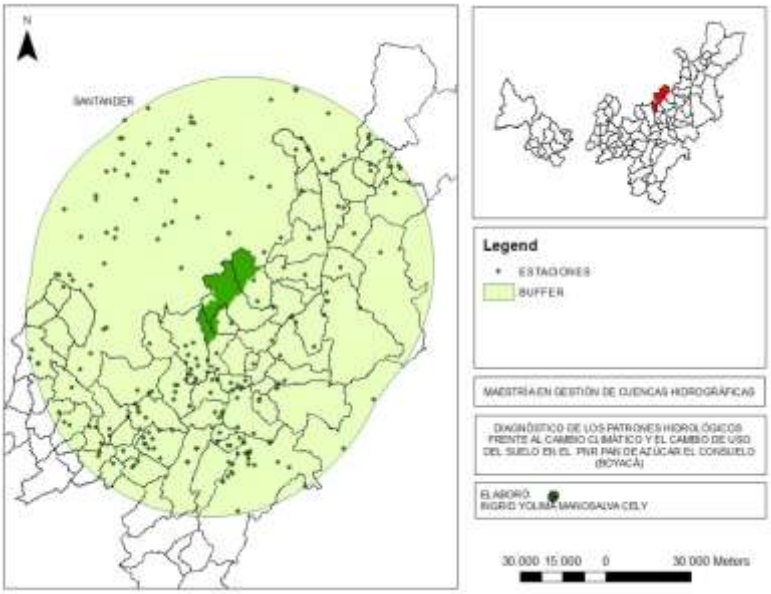
El primer paso metodológico consistió en el procesamiento geoespacial en ArcGIS Pro, cargando tanto el shapefile del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo como el inventario de estaciones hidrometeorológicas del IDEAM (representadas como puntos). Ambos insumos fueron reproyectados al sistema de coordenadas oficial de Colombia MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá, con el fin de garantizar la precisión métrica y evitar distorsiones en el cálculo de distancias. A continuación, mediante la herramienta Buffer (Analysis) se generó un buffer geodésico de 60 km alrededor del perímetro del área protegida, definiéndose así la zona de influencia para la selección de estaciones de referencia. Dentro de este buffer se identificaron 237 estaciones en total. Finalmente, el inventario de estaciones fue recortado a dicho polígono empleando las herramientas Clip y Select by Location, filtrando aquellas clasificadas con estado "activa" (Ver Figura 49).

Si bien la delimitación de áreas de influencia mediante polígonos de Thiessen constituye una herramienta ampliamente utilizada para estimar la representatividad espacial de estaciones meteorológicas en análisis hidrológicos, su aplicación como criterio exclusivo para la selección o descarte de estaciones presenta limitaciones en contextos de alta complejidad fisiográfica, como los sistemas de alta montaña andina. En el presente estudio, el análisis de los patrones hidrológicos frente al cambio climático y al cambio de uso del suelo requiere considerar la dinámica hidroclimática regional que incide sobre el Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo.

En este sentido, la inclusión de estaciones ubicadas en áreas circundantes al PNR permite capturar de manera más adecuada la variabilidad espacial y temporal de las variables hidroclimáticas, particularmente en regiones donde los gradientes altitudinales, la orientación de las laderas y las condiciones orográficas generan una marcada heterogeneidad climática. Por lo anterior, la selección de estaciones no se basó exclusivamente en criterios de proximidad espacial al área de estudio, sino en la representatividad hidrometeorológica de las series, la disponibilidad, continuidad temporal y calidad de los datos, garantizando así la coherencia regional del análisis climático e hidrológico desarrollado

Figura 49.

Área de Influencia Análisis Hidroclimático PNR Pan de Azúcar – El Consuelo



Posteriormente se procedió a realizar el descarte de varias estaciones por diferentes motivos, tales como falta de series completas de información, suspensión temporal o definitiva de su operación según los registros del IDEAM, ausencia de la estación en el inventario actualizado, y tipologías instrumentales no pertinentes para el presente análisis, como las estaciones limnimétricas (LM) y limnigráficas (LG), que se limitan a registrar niveles de agua y no incluyen variables meteorológicas.

La fase siguiente consistió en la depuración y control de calidad de las series climáticas. El primer criterio de verificación fue la disponibilidad de información para el rango de tiempo definido en el estudio, comprendido entre el 1 de junio de 1984 y el 1 de junio de 2024, correspondiente a un periodo de 40 años. Este horizonte se seleccionó para garantizar un diagnóstico robusto de tendencias climáticas a escala multidecadal, en concordancia con los lineamientos de la Organización Meteorológica Mundial para el análisis de normales climatológicas (WMO, 2018). Como resultado de esta etapa, se descartaron aquellas estaciones que no presentaban registros suficientes en dicho periodo.

El paso a seguir consistió en la sistematización y verificación de los registros descargados. En este paso se organizaron las bases de datos en formato estandarizado y se revisó la coherencia de las series con apoyo del software estadístico RStudio, que facilita la gestión de grandes volúmenes de datos y la aplicación de rutinas de control de calidad (RStudio Team, 2023).

La primera verificación correspondió al análisis de completitud de datos, mediante el cual se evaluó la proporción de registros ausentes en cada serie temporal. Para ello, se calculó el porcentaje de días con información disponible por mes y por año, clasificando como incompletas aquellas estaciones cuya cobertura de datos fue inferior al 80 %. Las series con altos porcentajes de vacíos fueron excluidas del análisis, en concordancia con los criterios de control y calidad de datos establecidos por el IDEAM y la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2023).

A continuación, se presentan los gráficos de completitud de datos (Ver Figuras 50 y 51), construidos con una escala colorimétrica entre 0 y 100 %. En esta representación, el color rojo indica periodos en los que no existe información disponible, mientras que el verde corresponde a rangos temporales con registros completos. Los tonos intermedios (amarillo y anaranjado) reflejan valores de completitud parciales (50%-25%), permitiendo identificar de manera visual aquellas estaciones o periodos con vacíos significativos de datos. Esta representación facilita la depuración del inventario de estaciones, ya que permite discriminar rápidamente los registros que no cumplen con el umbral mínimo establecido de calidad y continuidad de la información para su inclusión en el análisis hidroclimático.

Figura 50.

Completitud Datos de Temperatura

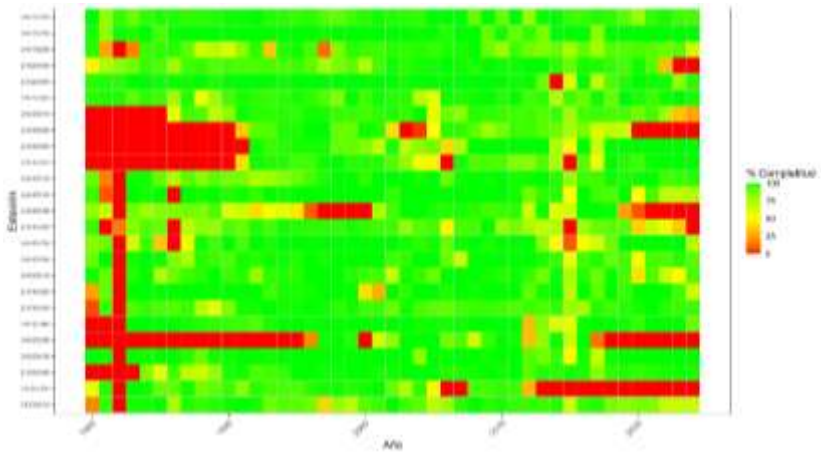
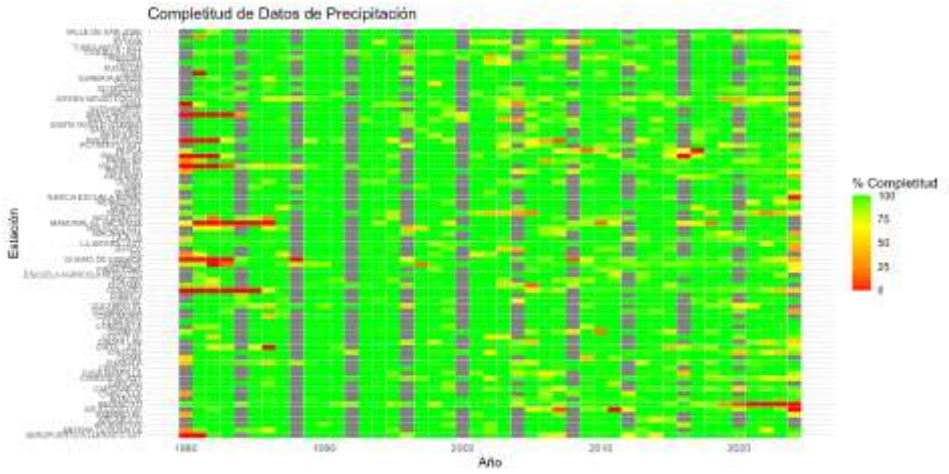


Figura 51.

Completitud Datos Precipitación



En el caso de las estaciones con registros de temperatura, y de acuerdo con el criterio previamente establecido, fueron descartadas aquellas que presentaron porcentajes de completitud por debajo del umbral definido. En consecuencia, se excluyeron las siguientes estaciones: Andalucía [24035350], 35 %; Betéitiva [24035020], 45 %; Boavita [24035330], 57 %; Cusagüí [24035010], 63,72 %; El Túnel [35095030], 52,46 %; Gámbita [24015280], 61 %; Guicán [24037040], 53,96 %; Nobsa [24030790], 42,67 %; y Toca [24030130], 58,21 %.

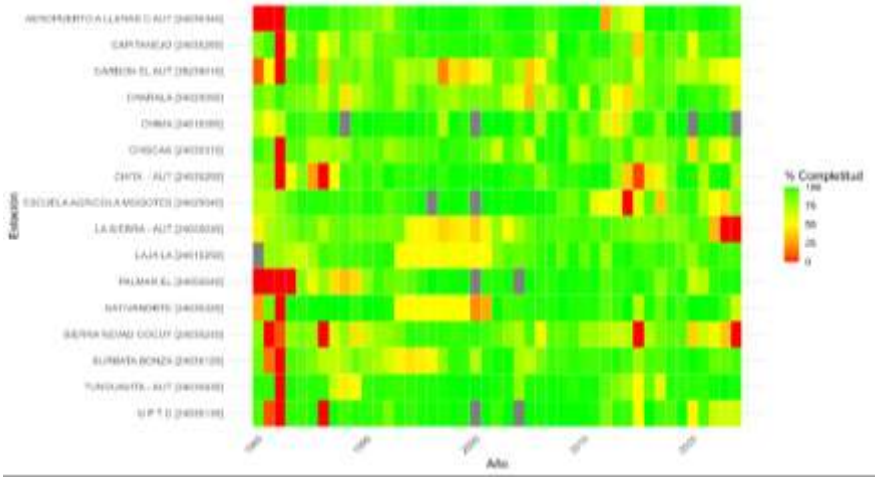
No obstante, aunque los porcentajes de completitud de las series de temperatura resultaron aceptables en términos generales, algunas estaciones fueron excluidas debido a que su disponibilidad de información no cubría de manera íntegra el horizonte temporal definido para el análisis (1984–2024). Este aspecto pone en evidencia que la completitud no solo debe evaluarse como la proporción de datos existentes frente al total de registros posibles, sino también en relación con la representatividad temporal del periodo de estudio. En este sentido, las estaciones Azulejos Los [24030820], Belencito [24035150], Cusagüí [24035010] y Santuario El [24011070] fueron descartadas, ya que, a pesar de superar el umbral del 70 % de completitud, sus registros no abarcan de manera continua las cuatro décadas de referencia, lo cual afectaría la comparabilidad y robustez del análisis climático.

Una vez descartadas las estaciones que no alcanzaron el nivel mínimo de completitud, se recalcularon los porcentajes correspondientes a las estaciones restantes, conformando así un conjunto depurado que cumplió con el umbral establecido. Este nuevo consolidado fue

representado gráficamente con el fin de evidenciar la solidez y consistencia de las series seleccionadas para el análisis hidroclimático (Ver Figura 52).

Figura 52.

Completitud Datos Temperatura Depurada



Este proceso permitió consolidar un total de 75 estaciones con registros de precipitación diaria y 15 estaciones con registros de temperatura máxima y mínima diaria, conformando así la base de información hidroclimática para el diagnóstico climático del Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo. La integración de estas series depuradas constituye el primer paso del análisis, ya que posteriormente se procedió a la identificación y evaluación de *outliers* en las series temporales, con el fin de asegurar la calidad y confiabilidad de los datos utilizados en la caracterización climática del área de estudio.

Como etapa adicional de control de calidad, se realizó un análisis de valores atípicos (*outliers*) en las series depuradas de precipitación y temperatura. Este procedimiento estadístico permite identificar observaciones que se apartan significativamente de la distribución general de los datos y que pueden estar asociadas a errores de medición, fallas instrumentales o, en algunos casos, a fenómenos climáticos extremos reales (Barnett & Lewis, 1994; Wilks, 2011). El análisis de *outliers* se aplicó de manera progresiva durante la depuración de las bases de datos, con el fin de garantizar que únicamente se conservaran registros consistentes y representativos.

En el caso de la temperatura mínima, el valor más alto de proporción de *outliers* fue de 0,31 %, mientras que para la temperatura máxima correspondió a 0,08 %. Ambos porcentajes son considerados aceptables, ya que la literatura climatológica indica que proporciones inferiores al 1 % no afectan de manera significativa la representatividad estadística de la serie ni sesgan la

estimación de tendencias climáticas (Aguilar et al., 2003; WMO, 2017). En consecuencia, todos los registros de temperatura fueron admitidos en el análisis final.

En contraste, para las series de precipitación se identificaron porcentajes de *outliers* de hasta **7 %** en algunas estaciones. Aunque este valor puede considerarse relativamente elevado en el marco de análisis estadísticos clásicos (Wilks, 2011), en climatología aplicada se reconoce como metodológicamente válido debido a la alta variabilidad intrínseca de la precipitación diaria, particularmente en ecosistemas de alta montaña. En estas regiones, la interacción entre procesos convectivos locales, forzamiento orográfico y fenómenos de gran escala, como el ENSO, genera eventos de lluvia de magnitud atípica que se reflejan en una mayor dispersión de los datos (Poveda et al., 2020; Buytaert et al., 2006; Allan et al., 2020).

La Organización Meteorológica Mundial ha señalado que los valores extremos de precipitación deben analizarse como parte de la señal climática y no eliminarse de manera automática, ya que constituyen manifestaciones válidas de la variabilidad hidrometeorológica (WMO, 2017; WMO, 2018). Asimismo, excluir sistemáticamente dichos valores podría conducir a una subestimación de la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, lo cual afectaría de manera crítica la caracterización de riesgos hidrológicos, como avenidas torrenciales, deslizamientos e inundaciones, así como la estimación de la capacidad de regulación hídrica en ecosistemas de páramo (IPCC, 2021; Peterson et al., 1998).

Por estas razones, se decidió mantener en las series climáticas los registros clasificados como *outliers* de precipitación, hasta un máximo del 7 %, siempre que fueran consistentes desde el punto de vista instrumental y no correspondieran a errores evidentes de medición. Esta decisión metodológica reconoce la dualidad de los *outliers*: descartables cuando representan inconsistencias técnicas, pero indispensables cuando constituyen expresiones reales de la dinámica climática en ambientes de montaña.

Las siguientes tablas presentan el consolidado de los resultados del análisis de outliers para las variables de temperatura mínima, temperatura máxima y precipitación media. En ellas se muestra el número total de valores atípicos identificados, así como el porcentaje que representan respecto al total de registros analizados, lo que permite dimensionar la magnitud de las anomalías dentro de cada variable climática.

Tabla 20.

Análisis Outliers Estaciones Temperatura Mínima

Estación	Total Registros	Outliers Detectados	Porcentaje Outliers
La Sierra - Aut [24025030]	14158	44	0,31
Chima [24015260]	15012	30	0,2
Sierra Nevad Cocuy [24035240]	12150	17	0,14
Sativanorte [24035320]	14876	15	0,1
Laja La [24015250]	15637	0	0
Charalá [24025050]	13291	0	0
Surbata Bonza [24035120]	14640	6	0,04
Capitanejo [24035260]	14684	1	0,01
U P T C [24035130]	14348	7	0,05
Chita - Aut [24035250]	13764	3	0,02
Tunguavita - Aut [24035430]	15353	5	0,03
Aeropuerto A Lleras C Aut [24035340]	14404	1	0,01
Escuela Agrícola Mogotes [24025040]	12637	1	0,01
Cardón El Aut [35235010]	6972	0	0
Palmar El [24055040]	14106	2	0,01
Chiscas [24035310]	14019	0	0

Tabla 21.

Análisis Outliers Estaciones Temperatura Máxima

Estación	Total Registros	Outliers Detectados	Porcentaje Outliers
Laja La [24015250]	11947	10	0,08
Charalá [24025050]	13389	8	0,06
Chima [24015260]	15366	8	0,05
Capitanejo [24035260]	14035	5	0,04
Sativanorte [24035320]	12174	3	0,02
Surbata Bonza [24035120]	12442	2	0,02
Aeropuerto A Lleras C Aut [24035340]	14135	1	0,01
Cardón El Aut [35235010]	11422	1	0,01
Chita - Aut [24035250]	13134	1	0,01
Escuela Agrícola Mogotes [24025040]	15510	2	0,01
Chiscas [24035310]	13672	0	0
La Sierra - Aut [24025030]	10286	0	0
Palmar El [24055040]	12751	0	0
Sierra Nevad Cocuy [24035240]	11496	0	0
Tunguavita - Aut [24035430]	14361	0	0
U P T C [24035130]	14339	0	0

Tabla 22.

Análisis Outliers Estaciones Precipitación

Estación	Total Registros	Outliers Detectados	Porcentaje Outliers
Remolino	16307	1074	6,59
Capitanejo	15909	880	5,53
Firavitoba	16201	841	5,19
UPTC	15708	787	5,01
Iza	15674	784	5
Nobsa	16310	800	4,9
Cucharo	15583	693	4,45
Susacon	16347	722	4,42
Sena	15136	666	4,4
Jerico	15643	687	4,39
Azulejos	14807	646	4,36
Tasco	15939	686	4,3
Aeropuerto	15094	640	4,24
Belencito	13827	562	4,06
Palmar	14346	544	3,79
Cusagui	13268	491	3,7
Santa Rosa	16342	601	3,68
Pesca	14959	541	3,62
Aposentos	16283	586	3,6
Carcasi	16309	578	3,54
Mongui	16132	568	3,52
Casa Amarilla	15736	542	3,44
Mamonal	12792	434	3,39
Tibasosa	15323	516	3,37
Surbata	16222	537	3,31
Potrerito	15501	499	3,22
San Antonio	16112	519	3,22
Tutaza	15280	491	3,21
El Cerezo	16386	522	3,19
Combita	15758	491	3,12
Curital	16145	487	3,02
Panelas	15445	459	2,97
Santarosita	15380	454	2,95
Covarachia	16034	456	2,84
Duitama	15572	439	2,82
Sativanorte	16203	455	2,81
Confines	16429	445	2,71
Tunguavita	16294	442	2,71
Malaga	15522	382	2,46
Boavita	16275	375	2,3
Mongua	14302	318	2,22

Chita	15236	337	2,21
Curiti	16393	347	2,12
Pueblo Viejo	13973	272	1,95
Macaravita	15835	292	1,84
Cocuy	15894	290	1,82
Sotaquira	16152	293	1,81
Chiscas	15632	259	1,66
Cintas	15609	253	1,62
Simacota	16178	261	1,61
Guamo	13447	212	1,58
La Capilla	15980	243	1,52
Moniquira	16069	235	1,46
Toquilla	15810	230	1,45
Antena La Rusia	15752	223	1,42
Coromoro	16207	221	1,36
Valle de San José	16376	221	1,35
La Comoda	16211	218	1,34
Molagavita	15533	208	1,34
Suse1	15859	212	1,34
Sierra Nevada	14535	192	1,32
Arcabuco	16186	197	1,22
Oiba	16297	189	1,16
Nimicia	16003	183	1,14
Laja	15960	181	1,13
Chima	16002	179	1,12
Charala	15589	173	1,11
El Encino	15994	178	1,11
La Sierra	15937	172	1,08
Palermo	15997	173	1,08
Gambita	14656	152	1,04
Aserrio	15988	165	1,03
Mogotes	16210	164	1,01
Olival	16131	144	0,89
Cardon	15765	131	0,83
Palma	15683	123	0,78
Suaita	16242	119	0,73
El Santuario	14454	103	0,71
Las Pavas	14438	64	0,44

Posteriormente, y con el apoyo de software RStudio, se procedió al llenado de datos faltantes en las series climáticas. La metodología empleada fue el Normal Ratio Method (NRM), una de las técnicas más utilizadas en climatología para la imputación de datos ausentes, especialmente en registros de precipitación y temperatura. El método se basa en la comparación de

los valores observados en estaciones auxiliares con registros completos, ajustando los datos según la relación entre sus medias históricas (Paulhus & Kohler, 1952; WMO, 2008). La expresión matemática empleada es la siguiente:

$$T_x = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{T_x}{T_i}.T_i\right) \quad (2)$$

Donde, Tx corresponde al valor a estimar en la estación con dato faltante, Ti: valor observado en la estación auxiliar, Tx,Ti: son medias históricas de la estación en análisis y de la estación auxiliar, respectivamente, y N: número de estaciones auxiliares utilizadas.

El principio del método radica en ponderar el valor observado en las estaciones auxiliares por la razón de promedios históricos, lo que permite corregir posibles sesgos asociados a diferencias de altitud, localización geográfica o características microclimáticas (Vicente-Serrano et al., 2010; Tabios & Salas, 1985). De esta manera, los valores estimados no corresponden a una simple interpolación, sino a un ajuste estadístico que mantiene la coherencia interna de la serie.

La Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2017) recomienda el uso de este tipo de metodologías en estudios de variabilidad climática cuando las series presentan brechas cortas de datos (menores al 10 % del total), asegurando así la continuidad temporal sin comprometer la representatividad de los registros.

Posteriormente, se elaboraron productos estadísticos que incluyeron medias y medianas mensuales por estación, medias multianuales mensuales y anuales, diagramas de caja y mapas de calor, todos exportados en hojas de cálculo por estación. Se calculó además la curva de doble masa para evaluar la homogeneidad temporal de los registros, identificando posibles rupturas asociadas a cambios en la instrumentación o en las condiciones locales de medición. Este conjunto de análisis permitió establecer la base confiable de datos climáticos para la caracterización de patrones hidrológicos.

3. Análisis de variabilidad climática

El análisis de la variabilidad climática se realizó a partir de las series históricas de precipitación y temperatura disponibles para el periodo 1980–2024. Previamente, las series fueron sometidas a un control de calidad en el que se verificó la completitud de los registros, la presencia de vacíos y la detección de valores atípicos, tal como se mencionó anteriormente. Estos últimos fueron analizados con especial precaución, pues en el caso de la precipitación, hasta un siete por ciento de los registros extremos resultaron ser físicamente plausibles y se conservaron como manifestaciones de la dinámica climática de alta montaña (IDEAM, 2015).

Análisis de Consistencia – Curva de Doble Masa

El análisis de consistencia de datos hidrometeorológicos se llevó a cabo mediante la curva de doble masa, una técnica ampliamente utilizada para verificar la homogeneidad de registros de precipitación en relación con una estación de referencia o con el promedio regional (Searcy & Hardison, 1960; WMO, 2017). El método consiste en graficar la precipitación acumulada de la estación en evaluación contra la precipitación acumulada de una estación de referencia (o del conjunto de estaciones circundantes), verificando la linealidad de la relación. Si los datos son consistentes, la curva debe aproximarse a una línea recta; desviaciones sistemáticas indican posibles problemas de homogeneidad debidos a cambios de emplazamiento, instrumentación o condiciones locales (Chow et al., 1988; Wilks, 2011).

Matemáticamente, el procedimiento se sustenta en la relación:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{x,i} = \mathrm{f}\left(\sum_{i=1}^{n} P_{r,i}\right) \quad (3)$$

donde Px,i es la precipitación de la estación evaluada en el período i, Pr, la precipitación correspondiente en la estación de referencia, y f una función lineal cuya pendiente refleja la proporcionalidad entre ambas series. En condiciones homogéneas, se espera que:

$$\sum_{i=1}^{n} P_{x,i} \approx \alpha \cdot \sum_{i=1}^{n} P_{r,i}, \quad \alpha \in \mathbb{R}^{+} \quad (4)$$

con un coeficiente de determinación (R^2) cercano a 1.

En este estudio, la estación Confines fue seleccionada como referencia debido a que presentó el menor porcentaje de valores atípicos y una de las desviaciones estándar más bajas entre las estaciones analizadas, lo cual la convierte en un punto de control adecuado para verificar la coherencia de las series climáticas. La elección de una estación de referencia estable es un criterio ampliamente utilizado en estudios hidrológicos, dado que permite comparar la evolución de los registros acumulados y detectar posibles inconsistencias en los datos (WMO, 2011; Helsel & Hirsch, 2002).

Análisis de Anomalías de Precipitación

El análisis de la precipitación histórica en Boyacá se desarrolló a partir de registros anuales comprendidos entre 1984 y 2024, con el objetivo de calcular las anomalías interanuales en relación con la precipitación media del periodo, que fue de **1468,47 mm/año**. Para cada año se sumaron las precipitaciones mensuales, obteniendo un valor anual (P_año), el cual se comparó con la media

histórica (P_media). Posteriormente, la anomalía se expresó en porcentaje mediante la siguiente fórmula:

$$Anomalía(\%) = \frac{P_{año}}{P_{media}} x100 \quad (5)$$

De esta manera, cada año se clasificó según los criterios establecidos por el IDEAM (2014): Valores inferiores al 80 % de la media se consideran condiciones secas. Valores entre 80 % y 120 % corresponden a condiciones normales. Valores superiores al 120 % representan condiciones húmedas.

Este procedimiento permitió construir una serie homogénea de anomalías, con representación gráfica en un diagrama de barras, complementado por líneas de referencia en los umbrales del 80 % y 120 %, lo cual facilita la identificación visual de periodos anómalos. Asimismo, se elaboró una tabla de síntesis en Excel donde los años fueron resaltados cromáticamente según su categoría (seco, normal, húmedo), constituyendo una herramienta de apoyo para la interpretación de la variabilidad interanual.

La utilización de anomalías climáticas constituye un enfoque metodológico reconocido por la literatura científica, dado que permite resaltar desviaciones significativas respecto a la normalidad climática y facilita la vinculación con forzantes de gran escala, como la Oscilación del Sur (ENSO). En este sentido, Pabón (2014) resalta que la variabilidad de la precipitación en Colombia está fuertemente modulada por los fenómenos El Niño y La Niña, los cuales generan déficits o excesos pluviométricos en distintas regiones del país. De igual forma, el IDEAM (2014) ha señalado que el análisis de anomalías constituye un insumo esencial para la gestión del riesgo climático, pues permite anticipar impactos directos sobre sectores sensibles como la agricultura, la seguridad alimentaria, la infraestructura hídrica y la conservación de ecosistemas estratégicos de alta montaña.

En conclusión, el cálculo de anomalías de precipitación no solo aporta una visión cuantitativa de la variabilidad climática regional, sino que además se convierte en una herramienta clave para la planificación territorial y la adaptación al cambio climático, especialmente en territorios como el páramo Pan de Azúcar–El Consuelo, cuya oferta hídrica depende directamente del régimen de lluvias.

Análisis Variable Precipitación

La estimación de la precipitación media areal en el PNR Pan de Azúcar–El Consuelo se realizó mediante el método de promedio aritmético simple, a partir de series pluviométricas

previamente sometidas a procesos de depuración, completación y validación de consistencia. El procesamiento se llevó a cabo en el entorno de programación R, utilizando registros diarios de estaciones seleccionadas dentro de un radio de influencia de 60 km, criterio que garantizó una cobertura espacial adecuada del área de estudio. Para cada unidad temporal (diaria, mensual y anual), la precipitación media se calculó como la media de los valores disponibles, excluyendo datos faltantes, lo cual permitió preservar la representatividad estadística de las series.

La precipitación media (Pm) se calculó como:

$$Pm = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} P_i \quad (6)$$

Donde: Pm, corresponde a precipitación media del área de estudio (mm), Pi es la precipitación registrada en la estación iii (mm), y n se refiere al número de estaciones con datos disponibles en el periodo considerado.

La elección de este método se fundamenta en el enfoque del estudio, orientado al análisis de la variabilidad temporal de la precipitación y su incidencia en la respuesta hidrológica del sistema, más que en la caracterización detallada de su distribución espacial. En este contexto, el uso de métodos ponderados como los polígonos de Thiessen, aunque ampliamente empleados para la espacialización de la precipitación, no resulta estrictamente necesario, dado que la densidad y distribución relativamente homogénea de las estaciones reducen los sesgos asociados a la representación areal.

Asimismo, la implementación de un promedio simple permite mantener coherencia metodológica con modelos hidrológicos de tipo agregado y evita la introducción de complejidades adicionales que no aportarían mejoras sustanciales a la interpretación de los resultados. Este enfoque ha sido ampliamente validado en estudios climatológicos regionales donde la prioridad es la consistencia temporal de las series sobre la precisión espacial (Wilks, 2011; Buytaert et al., 2006).

Análisis Variable Temperatura

Con las estaciones seleccionadas para el análisis de la variable temperatura (máxima y mínima), el primer paso consistió en la estimación y completitud de datos faltantes. Este procedimiento resulta indispensable, dado que la homogeneidad y continuidad de las series climáticas son requisitos fundamentales para garantizar la validez de los análisis de tendencias y variabilidad (WMO, 2017; Vicente-Serrano et al., 2010).

Como etapa de preprocesamiento, los vacíos en las series de temperatura máxima y mínima diaria fueron completados mediante el método de interpolación lineal. Esta técnica consiste en estimar el valor faltante como un punto intermedio calculado a partir de los registros inmediatamente anterior y posterior en la serie temporal, bajo el supuesto de que entre dos observaciones cercanas en el tiempo la variable climática sigue una evolución aproximadamente lineal (Wilks, 2011).

La formulación matemática de la interpolación lineal se expresa de la siguiente manera:

$$x(t) = x_0 + \frac{(x_1 - x_0)}{(t_1 - t_0)} . (t - t_0) \quad (7)$$

Donde: x(t): valor interpolado de la variable climática (en este caso, la temperatura) en el instante t. x0: valor observado de la variable en el tiempo inicial t0. x1: valor observado de la variable en el tiempo final t1. t0: instante temporal previo al dato faltante. t1: instante temporal posterior al dato faltante. t: instante en el cual se encuentra el dato faltante a estimar. En otras palabras, el método calcula el valor faltante como la proporción lineal del cambio entre x0 y x1, ponderada por la posición temporal de t respecto al intervalo [t0,t1].

En climatología aplicada, la interpolación lineal es un método ampliamente utilizado para completar brechas cortas en los registros diarios, ya que preserva la continuidad de la serie sin introducir sesgos significativos en las estadísticas de tendencia o variabilidad (Aguilar et al., 2003; WMO, 2017). La Organización Meteorológica Mundial recomienda su uso en los procesos de control y homogeneización de datos climáticos cuando la longitud de las lagunas es reducida y los registros adyacentes son consistentes (World Meteorological Organization, 2018).

La decisión de aplicar interpolación lineal se fundamentó en que las variables de temperatura, a diferencia de la precipitación, muestran una variación más suave y continua en el tiempo, lo que hace que el método sea estadísticamente robusto y confiable para mantener la coherencia de las series (Vicente-Serrano et al., 2010). De esta manera, las bases de datos depuradas y completadas constituyeron un insumo sólido para los análisis de medias multianuales, anomalías y tendencias en el área de estudio del PNR Pan de Azúcar–El Consuelo.

Análisis de Coherencia Variable Temperatura

Para generar el análisis de las medias anuales de temperaturas máximas y mínimas por estación y representar su variabilidad interanual, se aplicó un enfoque estadístico basado en la organización y visualización de datos hidrometeorológicos en el lenguaje R, utilizando herramientas de manipulación y gráficos de los paquetes *tidyverse* y *ggplot2*. Este procedimiento

tuvo como objetivo identificar tendencias y anomalías térmicas en el contexto del cambio climático, considerando la desviación respecto a la media regional y estableciendo umbrales de control mediante la desviación estándar.

En primer lugar, se consolidaron los valores de temperaturas máximas y mínimas medias anuales para cada estación en una hoja de cálculo de Excel, la cual se importó mediante la librería *openxlsx*. Posteriormente, los datos fueron transformados a formato largo (*long format*), lo que facilitó su manejo y análisis en R (Wickham et al., 2019). Este paso permitió reorganizar la estructura de los datos para generar series temporales por estación, asegurando la correcta lectura de los años como variables numéricas y las medias como variables continuas.

Para la caracterización de la variabilidad térmica, se calculó la media global regional y la desviación estándar a partir de la serie completa de medias anuales. Estas métricas son fundamentales en climatología, dado que la media proporciona un valor representativo del comportamiento térmico promedio, mientras que la desviación estándar mide la dispersión de los valores respecto a la media, permitiendo evaluar la magnitud de las anomalías (Wilks, 2019). Se establecieron umbrales de $\pm 2\sigma$ en torno a la media, criterio estadístico ampliamente utilizado para la identificación de valores extremos en climatología (Zhang et al., 2011).

A continuación, se presentan las tablas que consolidan los valores promedio anuales de cada una de la estaciones presentes dentro del área de influencia del área protegida, organizadas de la siguiente manera, las filas corresponden a las estaciones y las columnas a los años desde 1984 a 2024.

Tabla 23.

Temperaturas Máximas Medias Anuales

	Año													
Estación	**84**	**85**	**86**	**87**	**88**	**89**	**90**	**91**	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**	**97**
Aeropuerto [24035340]	20,73	20,92	20,52	21,39	21,11	20,76	20,77	21,04	21,38	21,09	20,70	21,32	20,83	21,73
Capitanejo. [24035260]	32,14	32,41	32,27	33,73	33,17	32,40	33,12	34,04	33,99	33,38	32,86	33,18	32,46	33,54
Cardon.El.Aut. [35235010]	8,85	9,15	9,39	9,85	9,81	9,37	9,47	9,07	9,27	9,30	8,98	9,60	9,32	9,91
Charala. [24025050]	27,63	28,12	27,85	28,86	28,37	27,66	28,19	28,43	28,59	28,27	27,80	28,22	27,94	29,11
Chima. [24015260]	29,07	29,50	29,72	29,67	29,93	29,33	29,76	29,91	30,26	29,93	29,95	30,30	29,92	30,70
Chiscas. [24035310]	21,15	21,13	21,55	22,32	21,36	21,33	21,91	22,33	22,83	22,04	21,66	22,18	21,44	22,31
Chita.-.Aut. [24035250]	16,85	16,74	16,89	17,44	16,88	16,49	16,41	16,54	16,80	16,67	16,53	18,24	17,80	18,07
Esc.Agrmog. [24025040]	24,89	24,79	25,03	25,92	25,13	24,93	25,33	25,61	26,01	25,33	25,03	25,37	24,95	26,08
La.Sierra.-.Aut. [24025030]	16,97	17,29	16,70	17,25	16,17	16,08	16,77	16,82	16,93	16,47	16,24	16,88	16,53	17,14
Laja.La. [24015250]	25,22	25,58	25,87	26,37	26,15	25,93	26,35	25,99	26,73	25,67	25,30	26,11	25,58	26,75
Palmar.El. [24055040]	30,66	30,44	30,50	31,93	31,44	30,92	30,90	30,66	31,40	31,97	31,09	31,42	30,83	32,03
Sativanorte. [24035320]	20,02	19,56	19,72	20,59	20,20	20,45	20,60	20,48	21,05	20,24	19,91	20,55	20,13	20,88
Sierra.Nev.Cocuy. [24035240]	10,42	10,72	11,77	12,15	12,44	11,82	11,53	11,08	10,89	10,82	10,73	11,04	11,16	11,39
Surbata.Bonza. [24035120]	20,83	20,88	20,66	22,24	21,54	21,31	21,25	21,33	21,74	21,17	20,84	21,51	21,07	21,53
Tunguavita.-.Aut [24035430]	20,69	20,62	20,66	21,90	21,56	21,25	21,33	21,44	22,19	21,82	21,40	21,96	21,15	22,44
U.P.T.C.[24035130]	17,20	17,62	17,81	18,07	18,04	17,95	17,97	18,22	18,71	18,17	17,95	18,66	18,14	18,58
Promedio	21,46	21,59	21,68	22,48	22,08	21,75	21,98	22,06	22,42	22,02	21,69	22,28	21,83	22,64

	Año													
Estación	**98**	**99**	**00**	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**	**06**	**07**	**08**	**09**	**10**	**11**
Aeropuerto [24035340]	21,89	20,86	21,16	21,59	21,86	21,55	21,81	21,88	21,40	21,71	21,52	21,78	21,85	21,28
Capitanejo. [24035260]	33,73	32,76	32,99	33,73	33,86	33,28	33,47	33,70	33,31	33,19	32,84	33,94	32,75	32,11
Cardon.El.Aut. [35235010]	9,90	9,46	9,61	9,95	9,41	9,59	9,87	9,76	9,30	10,08	10,74	10,43	11,61	10,16
Charala. [24025050]	28,92	27,65	27,88	28,56	28,92	28,66	28,94	29,18	28,94	28,88	28,58	29,43	29,32	28,57
Chima. [24015260]	30,91	29,75	30,01	30,59	31,00	30,92	30,79	30,72	30,18	30,48	30,35	30,68	30,09	29,48
Chiscas. [24035310]	22,31	21,19	21,78	22,55	22,22	21,89	22,02	22,26	21,83	21,62	21,20	21,75	21,60	21,09
Chita.-.Aut. [24035250]	17,78	16,71	16,99	17,38	17,28	17,40	17,45	17,56	17,16	17,58	17,49	17,63	17,72	16,94
Escuela.Agr. Mog.[24025040]	26,07	24,80	25,16	26,03	26,18	26,02	25,70	25,59	25,37	25,28	25,12	25,88	25,81	25,24
La.Sierra.-.Aut. [24025030]	17,21	16,36	16,61	17,41	18,49	17,05	17,34	17,37	17,17	17,44	16,68	17,18	16,92	16,32
Laja.La. [24015250]	26,44	25,31	25,70	26,43	27,16	26,58	26,69	26,65	26,67	26,54	26,34	26,55	26,26	25,63
Palmar.El. [24055040]	32,21	31,01	31,30	32,33	32,34	31,90	31,96	31,93	31,89	31,86	31,59	32,36	31,77	31,06
Sativanorte. [24035320]	20,96	19,92	20,23	20,81	20,20	19,79	19,83	20,39	20,77	20,69	20,65	20,82	21,63	21,41
Sierra.Nev.Cocuy. [24035240]	11,75	10,86	11,20	11,55	12,15	13,29	12,74	13,73	12,72	12,74	12,26	13,11	12,55	11,26
Surbata.Bonza. [24035120]	21,75	20,31	20,97	21,35	21,45	21,08	21,54	21,93	22,36	22,06	22,02	22,33	22,87	21,54
Tunguavita.-.Aut [24035430]	22,58	21,11	21,24	22,07	21,90	21,71	21,96	21,94	21,59	21,80	21,67	22,12	22,32	21,50
U.P.T.C.[24035130]	18,92	18,07	18,23	18,48	18,27	18,52	18,55	19,10	18,44	18,41	18,41	18,44	18,92	17,87
Promedio	22,71	21,63	21,94	22,55	22,67	22,45	22,54	22,73	22,44	22,52	22,34	22,78	22,75	21,97

	Año												
Estación	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Aeropuerto [24035340]	21,65	22,01	22,03	21,78	22,29	21,53	21,65	22,77	22,38	22,03	21,88	22,39	21,54
Capitanejo. [24035260]	33,39	33,76	34,54	34,51	34,95	34,09	34,01	34,28	34,62	33,90	33,49	34,93	35,13
Cardon.El.Aut. [35235010]	10,28	10,70	10,61	10,16	10,56	10,40	9,83	10,05	10,23	10,32	10,58	10,45	10,27
Charala. [24025050]	29,16	29,59	29,74	30,10	29,95	28,91	29,01	29,56	29,65	29,05	28,76	29,71	30,26
Chima. [24015260]	30,26	30,52	30,44	31,14	31,39	30,62	30,64	31,16	31,37	30,59	29,78	30,74	31,31
Chiscas. [24035310]	21,71	22,37	22,24	22,54	23,76	22,23	21,85	22,05	22,46	21,90	21,76	22,42	22,18
Chita.-.Aut. [24035250]	17,46	18,13	18,06	17,75	18,31	18,44	18,59	18,71	19,50	18,55	17,88	18,23	18,84
Escuela.Agr. Mog.[24025040]	26,15	26,59	26,51	26,87	27,07	26,44	26,54	26,62	27,20	26,53	25,70	26,61	26,66
La.Sierra.-.Aut. [24025030]	16,89	17,20	17,43	17,41	17,36	17,20	17,35	17,68	17,71	17,39	17,19	17,79	17,84
Laja.La. [24015250]	26,31	26,35	26,46	26,91	26,96	26,25	26,24	26,77	27,02	26,35	25,96	26,89	27,33
Palmar.El. [24055040]	32,03	32,86	33,46	33,41	33,39	32,71	32,69	33,46	33,39	33,23	32,18	33,15	34,18
Sativanorte. [24035320]	21,69	21,51	21,54	21,38	21,71	21,28	21,03	21,18	21,28	21,16	20,94	21,19	21,53
Sierra.Nev.Cocuy. [24035240]	12,68	12,49	13,19	12,53	13,18	11,74	11,42	14,69	13,86	15,08	14,18	14,00	12,77
Surbata.Bonza. [24035120]	21,74	22,13	22,26	22,01	22,42	21,75	21,72	22,01	22,69	22,20	21,99	22,39	22,98
Tunguavita.-.Aut [24035430]	21,56	22,64	22,75	22,44	23,08	22,35	22,50	22,83	22,89	22,22	22,01	22,88	24,01
U.P.T.C.[24035130]	17,98	18,21	18,28	18,65	18,92	19,14	19,36	19,48	19,68	19,43	19,36	19,61	19,39
Promedio	22,56	22,94	23,10	23,10	23,46	22,82	22,78	23,33	23,50	23,12	22,73	23,34	23,51

Tabla 24.

Temperaturas Mínimas Medias Anuales

	Año													
Estación	**84**	**85**	**86**	**87**	**88**	**89**	**90**	**91**	**92**	**93**	**94**	**95**	**96**	**97**
Aeropuerto 24035340.	5,69	4,92	5,21	4,93	6,08	5,52	5,92	5,71	4,59	5,77	6,78	5,85	6,38	5,62
Capitanejo 24035260.	18,69	18,83	18,36	18,53	18,62	18,11	18,43	18,71	18,81	17,64	17,00	17,18	17,04	17,06
Cardon.El.Aut 35235010.	4,67	4,67	4,90	5,06	4,89	4,49	4,93	4,89	4,99	4,94	4,98	5,18	5,00	4,63
Charala 24025050.	15,27	14,59	14,48	16,51	15,88	16,60	16,29	16,27	16,00	14,55	14,94	16,23	15,28	15,86
Chima 24015260.	16,80	16,70	16,55	17,96	17,37	16,71	16,36	16,54	18,04	18,16	18,13	18,05	17,94	18,09
Chiscas 24035310.	10,73	9,57	8,60	10,60	11,17	10,88	10,39	10,12	10,09	11,34	11,52	11,33	11,44	11,54
Chita 24035250.	5,85	5,41	6,81	7,74	7,12	6,71	7,11	6,90	6,95	6,84	7,05	6,53	6,69	6,80
La.Sierra 24025030.	7,10	6,79	8,02	8,87	8,32	7,89	8,19	8,17	8,62	8,49	8,29	8,31	8,12	8,45
Laja 24015250.	15,58	14,71	14,52	14,52	14,48	14,54	13,91	14,14	16,08	15,87	16,35	16,44	16,37	15,29
Esc.Agr.Mog. 24025040.	13,14	13,03	12,95	13,59	13,42	12,76	12,94	13,43	13,12	13,75	13,38	12,62	12,53	12,50
Palmar 24055040.	19,73	18,85	19,36	19,90	20,17	19,86	20,03	20,13	20,28	19,75	19,69	19,87	19,59	19,85
Sativanorte. 24035320.	9,78	9,16	9,80	10,47	10,06	9,86	10,23	10,33	10,36	10,18	10,30	10,09	10,05	10,37
Sierra.Nev.Cocuy. 24035240.	0,65	1,67	2,18	1,47	0,87	1,56	1,22	0,77	0,12	1,15	1,29	1,13	1,35	1,26
Surbata.Bonza.. 24035120.	6,10	4,99	5,56	5,28	5,67	5,36	6,25	6,26	5,64	5,86	6,16	6,52	6,86	6,00
Tunguavita 24035430.	7,58	6,71	7,45	7,43	8,00	7,14	7,21	7,32	6,96	7,32	7,52	7,40	8,00	6,99
U.P.T.C. 24035130.	8,66	8,04	5,20	8,97	8,88	8,20	8,73	8,34	7,92	8,66	9,02	8,49	8,72	8,84
Promedio	10,38	9,91	10,00	10,74	10,69	10,39	10,51	10,50	10,54	10,64	10,78	10,70	10,71	10,57

	Año													
Estación	**98**	**99**	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
Aeropuerto 24035340.	6,54	6,65	5,99	5,78	4,87	5,86	6,37	7,08	6,90	6,01	6,87	5,76	7,38	7,56
Capitanejo 24035260.	17,07	17,31	17,68	17,70	17,53	17,82	17,84	18,63	18,17	18,05	18,37	18,40	19,03	18,04
Cardon.El.Aut 35235010.	5,84	4,98	4,84	3,24	3,08	2,90	2,39	2,54	3,19	3,44	2,57	3,51	4,02	3,92
Charala 24025050.	16,48	16,33	16,12	16,33	16,42	15,97	15,59	16,67	16,56	16,64	16,62	16,84	17,08	16,76
Chima 24015260.	18,72	18,01	17,95	17,90	17,73	18,06	17,91	18,09	18,08	17,84	17,59	18,14	18,75	18,34
Chiscas 24035310.	12,22	10,93	10,61	10,99	11,03	11,69	11,32	10,11	9,42	9,07	8,20	11,59	12,21	10,83
Chita 24035250.	7,49	6,34	6,45	6,47	6,60	6,85	6,58	6,67	6,81	6,56	6,61	6,63	7,03	6,53
La.Sierra 24025030.	9,10	7,96	7,73	6,71	8,45	8,72	8,43	8,47	8,27	7,57	7,45	7,34	8,14	8,63
Laja 24015250.	15,68	15,76	15,47	15,52	15,90	16,24	15,69	15,99	15,83	15,71	15,36	15,95	15,91	15,23
Esc.Agr.Mog. 24025040.	13,94	12,51	12,90	12,89	12,53	13,20	13,06	13,61	13,26	13,73	12,91	14,01	14,14	11,70
Palmar 24055040.	20,38	19,76	19,56	19,87	20,07	20,30	19,97	20,28	20,05	20,00	19,79	20,21	20,47	19,97
Sativanorte. 24035320.	10,68	9,85	10,51	10,88	10,30	10,14	9,88	10,27	10,12	9,86	9,68	9,48	9,63	9,48
Sierra.Nev.Cocuy. 24035240.	1,09	1,18	0,45	0,78	1,04	0,40	0,70	0,78	1,03	0,73	0,93	0,95	1,15	0,85
Surbata.Bonza.. 24035120.	7,86	7,86	6,65	5,92	6,59	7,18	7,04	7,57	7,75	7,46	7,35	6,06	8,18	7,01
Tunguavita 24035430.	8,38	7,89	7,01	6,67	6,58	7,37	6,51	6,49	6,75	7,09	7,32	7,12	8,10	8,02
U.P.T.C. 24035130.	9,65	8,77	8,54	8,66	8,83	8,90	8,78	9,06	9,21	8,50	8,28	8,71	8,92	8,55
Promedio	11,32	10,76	10,53	10,39	10,47	10,73	10,50	10,77	10,71	10,52	10,37	10,67	11,26	10,71

	Año												
Estación	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Aeropuerto 24035340.	4,61	6,48	5,21	5,02	7,16	6,87	7,26	7,19	6,92	6,09	6,16	6,26	5,89
Capitanejo 24035260.	17,92	18,94	19,55	19,75	20,07	19,16	18,90	19,15	18,85	18,14	18,00	18,72	19,23
Cardon.El.Aut 35235010.	3,58	3,74	3,64	3,72	4,32	3,93	3,77	3,98	3,89	3,75	3,56	3,78	4,21
Charala 24025050.	16,18	17,23	17,03	17,08	17,07	16,72	16,65	17,04	16,90	16,85	16,64	17,09	15,62
Chima 24015260.	17,97	17,67	18,62	18,81	19,08	19,05	18,73	19,09	18,95	18,65	18,61	18,99	19,34
Chiscas 24035310.	10,65	10,87	10,18	10,10	10,33	9,59	9,03	9,05	10,51	9,55	9,74	9,63	9,89
Chita 24035250.	6,22	6,21	7,29	5,10	5,86	5,54	6,46	6,88	5,78	5,33	4,96	6,10	5,74
La.Sierra 24025030.	8,87	9,17	8,88	8,78	8,85	8,93	8,74	8,83	8,86	8,69	8,47	8,30	8,30
Laja 24015250.	15,51	16,02	15,97	15,98	16,30	15,92	15,91	16,10	15,95	16,10	15,94	16,44	16,64
Esc.Agr.Mog. 24025040.	11,46	12,40	15,20	14,45	14,33	15,44	13,74	14,21	14,06	13,97	14,37	14,72	15,23
Palmar 24055040.	19,89	20,12	20,13	20,28	20,67	20,34	20,10	20,49	20,39	20,49	20,32	20,77	21,08
Sativanorte. 24035320.	9,47	9,71	9,43	9,23	9,30	8,83	8,72	8,91	8,72	8,73	8,74	8,92	9,40
Sierra.Nev.Cocuy. 24035240.	0,77	0,99	1,05	-1,04	0,19	1,39	0,39	0,58	3,15	0,98	1,77	1,57	1,01
Surbata.Bonza.. 24035120.	6,79	7,05	7,28	6,58	7,82	7,83	7,60	7,55	7,19	7,74	8,30	7,99	8,21
Tunguavita 24035430.	7,20	7,01	7,24	5,73	7,51	6,75	7,54	7,82	7,79	7,79	7,73	7,36	7,32
U.P.T.C. 24035130.	8,11	8,60	8,64	8,40	9,76	8,91	8,84	9,00	7,80	8,44	8,08	8,14	8,48
Promedio	10,33	10,76	10,96	10,50	11,16	10,95	10,77	10,99	10,98	10,71	10,71	10,92	10,97

.

Análisis Variable Evapotranspiración

La evapotranspiración potencial (ETP) representa la demanda atmosférica máxima de agua bajo condiciones de disponibilidad hídrica no limitante y constituye un insumo fundamental para la formulación del balance hídrico. En este estudio, la ETP se estimó mediante el método empírico de Thornthwaite, ampliamente utilizado en análisis hidroclimáticos de escala mensual cuando la información climática disponible se restringe principalmente a la temperatura del aire (Thornthwaite, 1948).

El método se basa en la temperatura media mensual (Tmed) y en la duración media del día, incorporada a través de un ajuste por fotoperiodo en función de la latitud del área de estudio. La expresión general del método de Thornthwaite se define como:

$$ETP = 16\ x\ \left(\frac{L}{12}\right)\ x\ \left(\frac{10\ x\ T}{I}\right)^{a} \quad (8)$$

Donde L corresponde a la duración media del día (h), T es la temperatura media mensual (°C), I es el índice térmico anual, calculado como la suma de los índices térmicos mensuales, y a es un coeficiente empírico dependiente de I. El índice térmico se obtiene a partir de las temperaturas medias mensuales positivas y representa la energía térmica disponible para el proceso de evapotranspiración (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998).

Para la estimación de la ETP, se emplearon registros diarios de temperatura máxima y mínima, a partir de los cuales se calculó la temperatura media diaria y, posteriormente, valores mensuales de temperatura media por estación y año. Con base en estos valores se determinó el índice térmico anual y se aplicó la ecuación de Thornthwaite para obtener la ETP mensual. Finalmente, se calcularon promedios multianuales mensuales, con el fin de caracterizar el comportamiento climatológico de la evapotranspiración potencial en el área de estudio.

La ETP obtenida no representa una pérdida real de agua, sino una demanda potencial, por lo que en este estudio se utiliza como insumo para el cálculo de la evapotranspiración real, el almacenamiento de agua en el suelo y los componentes de déficit y exceso hídrico mediante la aplicación del balance hídrico tipo Thornthwaite–Mather.

El presente anexo contiene la tabla con los valores mensuales y anuales de evapotranspiración potencial (ETP) estimados para el Parque Natural Regional Pan de Azúcar–El Consuelo, calculados mediante el método de Thornthwaite a partir de las series históricas de temperatura. La información aquí presentada complementa el análisis desarrollado en el capítulo

de resultados y constituye un insumo técnico para la interpretación de la dinámica hidrológica del área de estudio.

Tabla 25.

Evapotranspiración PNR Pan de Azúcar El Consuelo

Año	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1984	71,14	69,25	80,90	79,50	78,06	70,56	69,15	70,99	65,15	70,61	66,98	70,68
1985	73,71	65,95	78,03	74,43	75,63	71,68	70,65	69,10	69,39	68,60	66,65	68,82
1986	74,63	63,46	76,87	74,17	75,62	69,26	68,40	71,88	69,12	70,19	67,34	70,07
1987	70,80	70,97	82,72	78,96	78,90	74,12	77,05	75,69	73,63	73,64	73,07	73,58
1988	80,53	75,95	84,45	81,17	80,31	72,11	71,26	70,48	67,85	71,28	69,29	68,20
1989	71,01	67,10	71,99	78,05	74,82	70,92	70,48	73,35	69,82	72,89	74,51	70,71
1990	72,29	67,92	78,43	75,37	74,93	74,64	73,42	75,09	70,90	72,58	70,77	70,98
1991	73,88	72,20	78,78	74,60	80,35	77,52	75,52	72,75	71,46	68,28	69,42	73,04
1992	73,14	72,52	87,30	85,82	82,61	74,85	72,15	73,85	70,36	72,59	71,46	74,97
1993	73,52	70,95	80,62	77,49	78,10	75,01	73,72	74,46	69,71	72,07	70,10	71,57
1994	73,83	67,46	77,50	73,11	75,52	71,73	73,40	71,90	72,02	72,01	69,67	74,38
1995	74,12	70,66	78,90	79,81	79,76	73,30	73,51	72,44	72,17	70,65	71,31	72,42
1996	72,92	71,17	76,11	75,36	77,11	72,32	71,17	70,51	71,30	71,63	68,43	72,72
1997	72,83	67,60	79,62	77,43	77,70	73,32	77,05	77,84	73,57	74,39	71,43	76,60
1998	84,90	77,04	86,75	86,68	81,51	74,68	72,75	71,83	70,95	74,80	69,88	70,01
1999	74,82	67,31	77,61	73,37	77,92	72,53	73,60	73,85	67,62	70,98	69,76	72,64
2000	70,22	69,20	75,91	77,45	76,39	74,55	74,74	76,36	69,42	72,38	71,90	72,93
2001	71,30	69,54	78,94	77,84	79,78	73,37	74,87	78,50	71,93	75,96	72,80	79,17
2002	75,56	73,04	81,00	74,57	80,36	73,04	76,84	78,26	73,83	73,92	71,05	77,28
2003	79,97	75,62	79,95	75,75	82,49	73,91	74,36	73,32	70,72	73,74	72,00	74,52
2004	72,93	73,94	84,26	77,66	80,50	73,90	75,22	79,37	70,48	73,30	69,80	73,44
2005	74,76	71,76	86,36	83,26	82,13	76,17	78,84	77,35	75,17	73,29	69,64	72,61
2006	74,02	73,47	79,68	76,58	78,39	74,31	74,24	76,96	73,39	75,97	72,25	75,99
2007	79,41	68,67	81,43	80,01	80,47	74,13	77,14	73,73	70,51	73,00	71,91	70,99
2008	73,51	70,16	77,41	76,01	79,06	74,23	75,41	74,09	71,67	73,64	71,92	74,99
2009	75,79	70,81	77,02	79,18	78,30	76,12	78,63	80,69	76,42	76,80	75,44	78,09
2010	78,42	80,18	90,90	84,26	86,32	76,73	74,92	74,64	70,19	72,61	67,91	69,76
2011	72,85	67,57	73,37	75,00	78,17	75,75	75,96	75,75	71,11	69,83	69,91	74,54
2012	76,03	70,65	77,19	72,30	76,85	74,37	76,49	74,87	74,21	74,93	75,36	75,80
2013	80,95	72,86	84,24	81,66	78,12	75,57	76,04	78,14	75,94	76,09	74,01	75,05
2014	81,31	75,85	84,68	83,25	83,35	80,52	84,32	78,12	77,07	75,05	74,93	75,28
2015	76,26	71,89	84,42	79,45	87,82	80,39	82,93	82,14	80,10	80,89	73,33	80,22
2016	84,88	89,05	99,89	88,31	85,60	76,03	77,26	81,04	78,54	78,75	73,26	75,11
2017	75,52	73,69	79,84	79,72	82,22	78,01	78,12	82,48	77,18	78,05	77,37	78,29
2018	76,31	74,72	83,06	75,03	78,12	75,79	77,21	76,97	75,86	78,26	78,91	78,11
2019	78,78	78,43	84,25	81,38	82,58	80,35	80,16	80,10	76,64	75,67	76,84	82,36

2020	79,58	81,33	88,55	86,15	88,63	77,68	77,96	79,76	75,24	77,14	73,70	78,12
2021	78,47	74,95	79,06	79,64	80,39	75,81	77,73	77,90	74,10	77,90	75,05	82,50
2022	76,69	71,74	80,77	75,97	80,01	73,07	79,24	76,42	73,89	75,96	72,86	74,82
2023	71,06	69,73	79,19	78,31	85,17	80,47	83,83	84,25	83,60	82,16	78,38	84,89
2024	87,42	80,96	97,57	85,97	88,36	79,92	79,64	79,51	77,11	80,05	72,13	79,65
Prom.	75,86	72,37	81,60	78,78	80,21	74,94	75,74	76,02	72,91	74,21	72,02	74,78

Anexo D. Metodología Análisis multitemporal de uso y cobertura del suelo

El análisis de transformaciones en el uso del suelo se realizó a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat, mediante el algoritmo de Máxima Verosimilitud (*Maximum Likelihood Classification*). Para ello, se construyeron firmas espectrales con base en un muestreo de puntos distribuidos en cada clase de cobertura. La validación temática se efectuó mediante la comparación con cartografía oficial del IDEAM y con el Plan de Manejo del área protegida.

Una vez generados los mapas de cobertura para los años seleccionados, se calcularon las áreas por clase y se elaboraron matrices de transición que permitieron identificar las coberturas que más superficie ganaron o perdieron en cada período decenal. Los resultados se consolidaron en tablas comparativas que sirvieron de insumo para vincular las dinámicas de cambio de uso del suelo con la respuesta hidrológica del sistema. A continuación se describe con mayor detalle el procedimiento empleado.

Para la detección de cambios en el uso del suelo se emplearon imágenes satelitales Landsat descargadas del portal *Earth Explorer* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se seleccionaron cinco cortes temporales representativos: 1984, 1994, 2004, 2014 y 2024, con el fin de realizar un análisis multitemporal de cuarenta años. Las imágenes Landsat fueron escogidas por su amplia resolución espacial y temporal, además de su disponibilidad gratuita y estandarizada para estudios ambientales (Wulder et al., 2019).

El procesamiento inicial de las imágenes se realizó en ArcMap, aplicando correcciones geométricas y radiométricas básicas. Posteriormente, se efectuó la combinación de bandas espectrales, lo cual permitió generar composiciones en falso color y realce de coberturas vegetales, cuerpos de agua y áreas intervenidas. Estas combinaciones de bandas son esenciales en la discriminación de coberturas, dado que cada clase de uso del suelo refleja y absorbe la radiación electromagnética en longitudes de onda específicas (Chuvieco, 2010).

La clasificación supervisada se desarrolló empleando las herramientas del módulo *Spatial Analyst* y *Multivariate* de ArcToolbox. Inicialmente se aplicó la función Create Signatures, que

genera un archivo de entrenamiento con la información estadística de cada clase de cobertura previamente identificada. Posteriormente, mediante el algoritmo Maximum Likelihood Classification (MLC), se construyeron mapas temáticos de cobertura para cada año analizado. El método MLC se basa en la probabilidad estadística de que cada píxel pertenezca a una clase, considerando la media y varianza de las firmas espectrales (Richards & Jia, 2006).

El proceso de clasificación se realizó a partir de un entrenamiento supervisado, consistente en la delimitación manual de polígonos de referencia mediante *shapefiles* de puntos, asignados a las coberturas previamente definidas. Se establecieron cinco clases principales: bosque denso alto de tierra firme, bosque denso bajo de tierra firme, herbazal denso de tierra firme arbolado, lagunas, lagos y ciénagas naturales, y mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales (IDEAM, 2010). La identificación de las firmas espectrales se efectuó mediante la generación de múltiples puntos de entrenamiento en cada clase, garantizando su representatividad en todo el territorio del PNR Pan de Azúcar – El Consuelo.

Finalmente, se calcularon las superficies absolutas y relativas de cada clase de cobertura en los cinco cortes temporales definidos. Para cada año, se obtuvieron cuadros de área en hectáreas y porcentajes, lo que permitió cuantificar las transformaciones de uso del suelo en el periodo de estudio y establecer tendencias de cambio. Estos resultados constituyen la base para la posterior discusión de la relación entre las transformaciones territoriales y las dinámicas hidrológicas del ecosistema.

El análisis multitemporal de coberturas para el área protegida, se estructuró bajo un área de referencia constante de 28.909 ha, correspondiente a la extensión oficial reportada en su Plan de Manejo (Corpoboyacá, 2020). Este criterio metodológico garantiza la comparabilidad espacial y temporal de los resultados, evitando distorsiones derivadas de la presencia de nubosidad o sombra en las imágenes satelitales. A partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat (1984–2024) y de la información de base del plan de manejo (2018), se generaron tablas de distribución absoluta y relativa de las principales coberturas (bosque denso alto, bosque denso bajo, herbazal denso, mosaico agropecuario y cuerpos de agua).

Anexo E. Metodología Modelación Hidrológica

1. Información Climática

En el caso del modelo SWAT, se emplearon series históricas de precipitación y temperatura correspondientes al periodo 1984–2024, compiladas en la propuesta de investigación. La

precipitación promedio anual multianual fue de 1.468,47 mm. La temperatura media anual empleada osciló entre 9 y 15 °C. Estos registros fueron complementados con datos de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento provenientes del IDEAM y de reanálisis globales, con el fin de alimentar el modelo en sus componentes energéticos.

El insumo fundamental para la implementación de GR2M corresponde a las series temporales de precipitación mensual (P) y evapotranspiración potencial (ETP), procesadas para el periodo 1984–2024 en el área del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo.

Las series de precipitación fueron obtenidas a partir de los registros climáticos disponibles para la región, consolidados y sometidos a procesos de control de calidad, completitud y homogeneidad. La ETP se estimó mediante el método de Thornthwaite, el cual, pese a su simplicidad, ha mostrado un desempeño adecuado en ecosistemas de alta montaña con limitación de datos (Allen et al., 1998).

2. Descripción del Modelo GR2M

El GR2M (Modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) es un modelo conceptual de simulación hidrológica desarrollado por el Institut National de la Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture de Francia (Mouelhi et al., 2006). Su diseño sencillo y eficiente lo convierte en una herramienta ampliamente utilizada para la evaluación de balances hídricos a escala mensual, especialmente en cuencas donde la información hidrométrica es limitada o inexistente.

El modelo se fundamenta en la relación entre las entradas de precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP), y los procesos de almacenamiento y escorrentía que determinan la generación de caudales en una cuenca. Opera mediante dos parámetros principales:

- **X1** (capacidad de almacenamiento del suelo, en mm): controla el volumen máximo de agua que puede retenerse en el reservorio de suelo antes de producirse escorrentía.
- **X2** (coeficiente de intercambio): representa los intercambios de agua entre el reservorio subterráneo y los flujos de salida (caudal base).

La estructura del modelo incluye dos reservorios: un reservorio de suelo que regula la infiltración y la evapotranspiración, y un reservorio subterráneo que controla el flujo de base y la escorrentía retardada. De esta forma, GR2M simplifica los procesos hidrológicos sin perder capacidad para reproducir patrones de variabilidad mensual en el caudal.

Ecuaciones de gobierno del modelo GR2M

Teniendo en cuenta que el modelo **GR2M** es un modelo hidrológico conceptual de simulación mensual, estructurado a partir de dos reservorios principales: un reservorio de producción (almacenamiento de humedad del suelo) y un reservorio de enrutamiento (almacenamiento asociado a la escorrentía). Su formulación se basa en el balance hídrico mensual y en funciones no lineales que controlan los flujos de entrada y salida del sistema (Mouelhi et al., 2006).

a) Balance de agua en el reservorio de producción

El balance hídrico mensual se expresa como:

$$S_t = S_{t-1} + P_t - E_t - Q_{p,t} \quad (9)$$

Donde: St es el almacenamiento del suelo al final del mes ttt, Pt es la precipitación mensual, Et es la evapotranspiración potencial mensual, Qp,t es el flujo de percolación hacia el reservorio de enrutamiento.

El almacenamiento máximo del reservorio de producción está controlado por el parámetro $\mathbf{X_1}$ antes mencionado.

b) Función de producción

La fracción efectiva de la precipitación que contribuye al sistema se calcula mediante una función no lineal que depende del nivel de saturación del suelo, expresada como:

$$P_t^{'} = P_t \cdot \left(1 - \left(\frac{S_t - 1}{X_1}\right)^2\right) \quad (10)$$

donde Pt′ corresponde a la precipitación efectiva mensual.

c) Balance del reservorio de enrutamiento

El reservorio de enrutamiento controla la generación de escorrentía mensual, y su balance se expresa como:

$$R_t = R_{t-1} + Q_{p,t} - Q_t \quad (11)$$

Donde: Rt es el almacenamiento del reservorio de enrutamiento, Qt es el caudal mensual simulado.

El parámetro $\mathbf{X_2}$ controla el tiempo de residencia del agua en el reservorio de enrutamiento y, por tanto, la respuesta hidrológica de la cuenca.

d) Función de descarga

La descarga mensual se calcula mediante una función no lineal del almacenamiento:

$$Q_t = \frac{R_t}{X_2} \quad (12)$$

3. Configuración del Modelo GR2M

La modelación conceptual se realizó mediante el modelo GR2M, que simula balances mensuales a partir de precipitación y evapotranspiración. La calibración se efectuó frente al caudal proxy, priorizando la coherencia temporal y estacional más que el ajuste numérico estricto. Se evaluó el desempeño a través de indicadores estadísticos como el Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), el Root Mean Square Error (RMSE) y el Percent Bias (PBIAS), interpretando sus resultados en el marco de la naturaleza proxy de los datos (Moriasi et al., 2007; Mouelhi et al., 2006).@

La modelación hidrológica constituye una herramienta esencial para comprender y predecir el comportamiento del ciclo del agua en ecosistemas estratégicos de alta montaña, donde los datos observacionales de caudales son escasos o inexistentes. En este contexto, el modelo GR2M (Modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) ha demostrado ser particularmente útil para cuencas con información limitada, al operar de forma conceptual y mensual, simulando la relación entre la precipitación, la evapotranspiración y la generación de escorrentía (Mouelhi et al., 2006).

Para el caso del Parque Natural Regional Pan de Azúcar – El Consuelo, la ausencia de registros hidrométricos continuos constituye una limitación significativa para la evaluación del régimen hídrico. Con el fin de suplir este vacío, se construyó un caudal proxy (Qproxy), derivado de balances hídricos y estimaciones indirectas, que sirvió como referencia para la calibración y validación del modelo. De esta manera, GR2M se aplicó utilizando como insumos series de precipitación y evapotranspiración potencial (ETP), obtenidas y procesadas para el periodo 1984–2024, permitiendo la simulación de caudales mensuales en el área de estudio.

Estos Qproxy no constituyen mediciones observadas, pero representan aproximaciones razonables de la dinámica de caudales en el páramo, permitiendo la calibración y validación relativa del modelo GR2M.

- **Q_proxy_PmenosETP:** estimación directa a partir del balance entre la precipitación y la ETP mensual.
- **Q_proxy_RR:** derivado de un coeficiente de rendimiento de escorrentía aplicado al excedente hídrico.
- **Q_proxy_Budyko:** calculado mediante la relación de Budyko, que integra la interacción entre la energía disponible (ETP) y la precipitación efectiva.

4. Ajuste y evaluación del modelo GR2M mediante Qproxy

La ausencia de registros observados de caudal en el área de estudio impidió la aplicación de un proceso de calibración convencional basado en la comparación entre caudales observados y simulados. En este contexto, se adoptó un enfoque alternativo basado en el uso de un caudal aproximado (Qproxy), estimado mediante la relación de Budyko, la cual integra la interacción entre la precipitación y la evapotranspiración potencial.

En lugar de una calibración temporal tradicional, el modelo GR2M fue ajustado mediante la definición de parámetros hidrológicamente coherentes (X1 y X2), con el objetivo de reproducir de manera consistente la dinámica mensual del sistema hidrológico. Este ajuste se realizó considerando la respuesta esperada de cuencas de alta montaña, donde predominan procesos de regulación hídrica asociados a suelos con alta capacidad de almacenamiento.

El parámetro X1 representa la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, mientras que X2 corresponde al coeficiente de intercambio subterráneo, el cual regula la contribución del flujo base. La selección de estos parámetros se fundamentó en rangos reportados en la literatura para cuencas con características fisiográficas similares.

La evaluación del desempeño del modelo se realizó mediante la comparación entre el caudal simulado y el Qproxy, utilizando indicadores estadísticos como el coeficiente de eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), el cual permite evaluar la capacidad del modelo para reproducir la variabilidad temporal del sistema. Este enfoque ha sido ampliamente utilizado en estudios hidrológicos en regiones con limitada disponibilidad de datos, donde se prioriza la coherencia física del modelo sobre el ajuste empírico directo.

La validación del modelo se realizó mediante indicadores estadísticos ampliamente utilizados en hidrología, entre los cuales destacan:

- **Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE):** mide la precisión de la simulación en relación con los valores de referencia, con valores cercanos a 1 indicando alto desempeño.
- **Root Mean Square Error (RMSE):** cuantifica el error medio entre valores simulados y proxy, expresado en mm/mes.
- **Runoff Ratio (RR):** indicador del balance entre precipitación y escorrentía simulada.
- **Coeficiente de correlación (r):** mide la correspondencia lineal entre las series.

Tabla 26.

Indicadores de validación del modelo GR2M frente al Qproxy.

Indicador	Valor	Interpretación
Runoff Ratio (RR)	0.698	Relación entre precipitación y escorrentía consistente con sistemas altoandinos.
NSE	0.763	Desempeño satisfactorio, indicando buena representatividad de la serie.
RMSE (mm/mes)	22.37	Error medio bajo en relación con la magnitud de los caudales simulados.
Correlación (r)	0.976	Alta correspondencia entre Q_sim y Qproxy.

Estos resultados muestran que el modelo reproduce de manera adecuada las tendencias hidrológicas a escala mensual, aun considerando la limitación de utilizar un caudal proxy y no mediciones observadas. El valor de NSE (0.763) refleja un nivel de ajuste aceptable para estudios de diagnóstico, mientras que la correlación (r = 0.976) confirma que la dinámica general de los caudales simulados sigue fielmente la señal climática impuesta por la precipitación y la evapotranspiración.

5. Descripción Modelo SWAT

El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) constituye una de las metodologías más robustas y ampliamente utilizadas a nivel mundial para simular procesos hidrológicos y analizar los efectos del cambio climático y del cambio de uso y cobertura de la tierra (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011).

SWAT es un modelo semi-distribuido y continuo en el tiempo, capaz de desagregar el territorio en subcuencas y, posteriormente, en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) que representan combinaciones únicas de suelo, cobertura y pendiente. Esta estructura permite estimar de manera diferenciada componentes del balance hídrico como la escorrentía superficial, la infiltración, el flujo base, la evapotranspiración real y la recarga subterránea. Al trabajar con series climáticas largas y datos espaciales detallados, el modelo se convierte en una herramienta idónea para analizar escenarios de gestión y proyectar la respuesta hidrológica de un ecosistema ante cambios ambientales (Neitsch et al., 2011).

La literatura evidencia la utilidad del SWAT en ecosistemas de montaña y páramos andinos; por ejemplo, Urrutia (2016) aplicó el modelo en la cuenca alta del río San Juan (Chocó) para analizar los efectos de la deforestación por minería, encontrando incrementos en la escorrentía superficial y disminución en la infiltración, lo cual compromete la estabilidad hidrológica del sistema. De manera similar, Buytaert et al. (2006, 2014) documentaron en páramos ecuatorianos y

peruanos que pequeñas alteraciones en la cobertura vegetal generan respuestas hidrológicas abruptas, lo que demuestra la alta sensibilidad de estos ecosistemas a perturbaciones climáticas y antrópicas. Estos hallazgos resaltaron la pertinencia de implementar SWAT en el Parque Natural Regional (PNR) Pan de Azúcar – El Consuelo, donde la transformación de coberturas y el aumento de presiones agrícolas ya han sido señalados en el plan de manejo (Corpoboyacá, 2018).

Adicionalmente, la simulación hidrológica bajo escenarios de cambio climático constituyó un insumo estratégico para anticipar impactos futuros. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) utiliza las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) como insumo para modelar la evolución climática global en función de los gases de efecto invernadero acumulados en la atmósfera y sus forzamientos radiativos al año 2100. En este estudio se consideraron dos escenarios contrastantes: RCP 2.6, que representa un escenario de mitigación fuerte con un forzamiento radiativo de 2.6 W/m² y un aumento de temperatura global inferior a 2 °C; y RCP 8.5, que corresponde a un escenario de altas emisiones con un forzamiento de 8.5 W/m² y un aumento de temperatura superior a 4 °C (IPCC, 2023). La aplicación de estos escenarios permitió explorar la vulnerabilidad hidrológica del páramo bajo futuros contrastantes de mitigación y de inacción climática.

a) Balance hídrico general

El núcleo conceptual del modelo SWAT se expresa mediante la ecuación de balance hídrico del suelo, la cual permite estimar la evolución temporal del contenido de agua en el perfil edáfico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^{t}\left(P_i - Q_{sur\ f,i} - ET_i - W_{seep,i} - Q_{gw,i}\right) \quad (13)$$

Donde: SWt es el contenido de agua en el suelo al tiempo t (mm), SW0 es el contenido inicial de agua en el suelo (mm), Pi corresponde a la precipitación en el día i (mm), Qsurf,i es la escorrentía superficial generada (mm), ETi: evapotranspiración real (mm), Wseep,i: percolación profunda fuera del perfil del suelo (mm), Qgw,i: flujo de retorno o descarga subterránea al cauce (mm).

b) Estimación Escorrentía Superficial

La escorrentía superficial en SWAT puede calcularse mediante diferentes métodos; en aplicaciones a escala de cuenca y con información edáfica detallada, se emplea comúnmente el método del Número de Curva (Curve Number, CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS):

$$Q_{sur\ f}\begin{cases}\frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)}, & P>0.2S\\ 0, & P<0.2S\end{cases} \quad (14)$$

Donde: Qsur f es la escorrentía superficial (mm), P es la precipitación diaria (mm) y S corresponde a retención potencial máxima del suelo (mm), calculada como:

$$S=\frac{25400}{CN}-254$$

El valor del CN depende del tipo de suelo, cobertura de la tierra, condiciones de humedad antecedente y prácticas de manejo.

c) Fvapotranspiración

En el modelo SWAT, la evapotranspiración constituye un componente fundamental del balance hídrico y se calcula a partir de la estimación de la evapotranspiración potencial (ETP), la cual puede ser determinada mediante diferentes métodos empíricos o físicamente basados. En el presente estudio, la ETP fue estimada mediante el método de Thornthwaite, el cual se fundamenta en la temperatura media mensual y la latitud, siendo ampliamente utilizado en estudios hidrológicos en regiones con disponibilidad limitada de variables climáticas (Thornthwaite, 1948).

A partir de la ETP, el modelo calcula la evapotranspiración real (ETR) considerando la disponibilidad de agua en el suelo, las características de la cobertura vegetal y la profundidad radicular. Este proceso se basa en una aproximación secuencial en la cual la evapotranspiración es limitada por la humedad del suelo, de tal forma que la ETR es menor o igual a la ETP, dependiendo de las condiciones hídricas del sistema (Neitsch et al., 2011; Arnold et al., 2012).

d) Flujo Subterráneo y Caudal Base

El flujo subterráneo o caudal base se simula mediante un enfoque de almacenamiento lineal, donde la descarga desde el acuífero somero hacia el cauce se expresa como:

$$Q_{gw}=\alpha_{gw}.GW \quad (15)$$

Donde: Qgw es la descarga subterránea al cauce (mm), αgw es el coeficiente de recesión del acuífero (día^{-1}), GW = volumen de agua almacenado en el acuífero somero (mm). Este esquema permite representar la contribución retardada del agua subterránea al caudal del río, elemento clave en la regulación hídrica de cuencas de montaña y ecosistemas de páramo.

***6.* Delimitación de la Cuenca**

La cuenca de influencia del PNR objeto de estudio fue delimitada en el modelo SWAT empleando un Modelo Digital de Elevación (DEM) con resolución de 12,5 m (ALOS PALSAR).

A partir de este insumo se definieron divisorias hidrográficas, red de drenaje y puntos de salida, permitiendo establecer la estructura de subcuencas que componen el área de estudio. La topografía del páramo, caracterizada por pendientes pronunciadas y relieves abruptos, condiciona la generación de escorrentía superficial y la conectividad hidrológica interna (Neitsch et al., 2011).

7. Configuración del Modelo SWAT

El modelo se configuró en ArcSWAT, con un periodo de simulación de 1984–2024, empleando dos años iniciales como periodo de calentamiento (warm-up). La generación de HRU se realizó combinando clases de suelo, cobertura y pendiente con un umbral del 5 %, lo que permitió una representación adecuada de la heterogeneidad espacial. La evapotranspiración potencial se estimó mediante el método de Penman–Monteith, recomendado para ecosistemas de alta montaña (Neitsch et al., 2011).