EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL RECURSO HIDRICO DE LA CUENCA RIO TAME, COSTADO ORIENTAL PNN EL COCUY: VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y PRESIONES ANTROPOGÉNICAS

ANGELICA CECILIA MEDINA QUIÑONEZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2024

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD DEL RECURSO HIDRICO DE LA CUENCA RIO TAME, COSTADO ORIENTAL PNN EL COCUY: VARIABILIDAD CLIMÁTICA Y PRESIONES ANTROPOGÉNICAS

ANGELICA CECILIA MEDINA QUIÑONEZ
1006409726

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

DIRECTOR
MARÍA ESTHER RIVERA
PhD. Hidrología & Lic. Matemáticas y Física
CODIRECTOR
JESÚS RAMÓN DELGADO RODRÍGUEZ
Geólogo MSc. Geotecnia.

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2024

DEDICATORIA

A Dios

Con profunda gratitud, dedico este trabajo académico a Ti, que ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de este viaje.

A mis queridos padres,

Cada madrugada, cada jornada laboral, cada sacrificio ha sido un paso hacia mi futuro. Han construido el camino para que yo pueda aprender, crecer y alcanzar mis sueños. No hay palabras suficientes para expresar cuánto valoro sus esfuerzos y cómo ha impactado mi vida. Este logro también es de ustedes, con todo mi amor y gratitud.

"Como una semilla cada vez que llueve, estoy a punto de crecer
A veces tropiezo por el oscuro y ventoso camino
Buscando al nuevo alguien que solía conocer
Mirando profundamente en mi interior
Intentando encontrar mi alma interior
... Todavía estoy aprendiendo"

I'm Still Learning – LAY

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a Dios por su fortaleza espiritual, la cual me ha guiado y sostenido a lo largo de este proceso.

A mis padres, su labor diaria, su arduo trabajo y sacrificio han sido la base que me ha permitido estudiar una carrera universitaria. Su inquebrantable apoyo, ha sido fundamental en mi camino hacia la obtención de este logro.

Agradezco enormemente a mis amigas de la universidad, Darly Carvajal, Daniela Arango y Zara Torres, por su constante apoyo y aliento durante este desafiante trayecto.

Asimismo, extiendo mi gratitud a mis directores de trabajo de grado, María Esther Rivera y Jesús Ramon Delgado Rodríguez, cuya orientación experta ha sido invaluable para el desarrollo de esta investigación al igual que su constante apoyo moral.

Agradezco igualmente a la profesional de investigación y monitoreo Paola Hernández, y al Jefe de Área Protegida, por la oportunidad y apoyo en la realización de este proyecto. Así mismo, al personal de parques, Juan Calderón y Fernando Medina, por su apoyo y orientación durante las salidas al campo.

No puedo dejar de reconocer el apoyo incondicional de mis hermanos y familiares, quienes han sido un pilar fundamental en este proceso.

Tabla de Contenido

RESUMEN 12
CAPÍTULO I 14
Introducción 14
Planteamiento del Problema 16
Justificación 17
Objetivos 18
Objetivo General 18
Objetivos Específicos 18
CAPITULO II 19
Alcances y Limitaciones 19
Marco Referencial 20
Marco Contextual 20
Antecedentes 21
Marco teórico 28
Marco legal 34
CAPITULO IV 38
Metodología 38
Etapa 1. Caracterización de las variables físicas de la cuenca del rio Tame (morfometría, litología, geología, cobertura vegetal y uso del suelo) 39
Etapa 2. Analizar las variables climáticas de precipitación y temperatura en relación con eventos de variabilidad climática (El niño oscilación del sur – (ENOS)) en la cuenca 41
Etapa 3. Evaluación del estado ambiental parcial de la cuenca del río Tame, en relación con las presiones antropogénicas 47
Etapa 4. Identificación del grado de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico 48
Etapa 5. Formulación de recomendaciones y opciones de manejo ambiental 49
CAPÍTULO V 50
Resultados y discusión 50
Caracterización física de la cuenca de estudio 50
Morfometría 50

Información Geológica 55
Información de suelos y litología 57
Cobertura y uso del suelo 61
Análisis de variables meteorológicas de precipitación y temperatura en relación al ENOS ... 63
Evaluación del estado ambiental de la cuenca respecto a las presiones antropogénicas 81
Indicadores hídricos 91
Índice de Regulación Hídrica - IRH 93
Índice de uso del agua – IUA 95
Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico – IVH 98
Formulación de opciones y recomendaciones de manejo 99
CONCLUSIONES 103
RECOMENDACIONES 105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 106
ANEXOS 113

Lista de Tablas

Tabla 1 Rangos Índice de Uso del Agua 30
Tabla 2 Clasificación del índice de regulación hídrica 32
Tabla 3 Categorías índices de vulnerabilidad al desabastecimiento 32
Tabla 4 Matriz de marco legal 34
Tabla 5 Información de los puntos de muestreo de suelos 41
Tabla 6 Estaciones climatológicas en la zona de estudio 42
Tabla 7 Datos faltantes estimados 44
Tabla 8 Parámetros físico – morfométricos de la zona de estudio 51
Tabla 9 Litología de la cuenca en base al tipo de suelo 58
Tabla 10 Intensidad y duración de los eventos de fenómeno de La niña y El niño de acuerdo al ONI. 66
Tabla 11 Pruebas matemáticas de estacionariedad 76
Tabla 12 Valores de la correlación cruzada entre variables explicativas y de respuesta 77
Tabla 13 Valores de IRH para la zona de estudio 94
Tabla 14 Valores de IUA para la zona de estudio 96
Tabla 15 Clasificación del IVH para la zona de estudio 98

Lista de Figuras

Figura 1 Ubicación de la zona de estudio 21
Figura 2 Método de Curva de duración de caudales 31
Figura 3 Etapas de la metodología 38
Figura 4 Polígonos de Thiessen 43
Figura 5 Datos estimados de la serie de temperatura media y precipitación total de la estación TAME 45
Figura 6 Homogeneidad de la variable temperatura media de la estación TAME 46
Figura 7 Delimitación y ordenes de la red de drenaje 50
Figura 8 Pendientes de la zona de estudio 53
Figura 9 Curva Hipsométrica de la cuenca de estudio 54
Figura 10 Perfil longitudinal del cauce principal de la zona de estudio 55
Figura 11 Mapa geológico de la zona de estudio 56
Figura 12 Suelos de la zona de estudio en el límite del PNN El Cocuy 58
Figura 13 Curva granulométrica 60
Figura 14 Cobertura vegetal del PNN El Cocuy 62
Figura 15 Climograma de la estación TAME 63
Figura 16 Datos de precipitación y vientos del periodo 1981 – 2019 de CHIRPS y ERA5 64
Figura 17 Intensidad de los eventos El Niño y La Niña 65
Figura 18 Precipitación total anual vs ONI para la zona de estudio 67
Figura 19 Precipitación total mensual vs ONI para la zona de estudio 69
Figura 20 Temperatura media anual vs ONI para la zona de estudio 70
Figura 21 Temperatura media, máxima media y mínima media mensual vs ONI para la zona de estudio 71
Figura 22 Histograma y diagrama de cajas y bigotes de la precipitación y temperatura media 73
Figura 23 Q - Q plot de datos mensuales de precipitación la estación TAME 74
Figura 24 Correlogramas de la estación TAME y SANTA INES 75
Figura 25 Correlogramas de la estación TAME y SANTA INES 75
Figura 26 Correlogramas de correlación cruzada 77
Figura 27 Nivel instantáneo del Rio Tame y PP TAME 78

Figura 28 Caudales calculados vs Precipitación 79
Figura 29 Probabilidad de afectación de El Niño y La Niña sobre la precipitación de la estación TAME 80
Figura 30 Porcentaje de habitantes por vivienda en la zona de estudio 82
Figura 31 Distribución porcentual del área de los predios en la zona de estudio 82
Figura 32 Porcentaje de usos del recurso hídrico en las viviendas en la zona de estudio 83
Figura 33 Tipo y cantidad de animales en las viviendas en la zona de estudio 84
Figura 34 Cantidad de animales por predio en la zona de estudio 84
Figura 35 Cobertura de pastos limpios relacionada a la ganadería en el PNN El Cocuy 85
Figura 36 Suelo erosionado sobre la cuenca del Rio Tame 87
Figura 37 Tala de árboles para madera 88
Figura 38 Zona quemadas dentro del PNN 89
Figura 39 Factores que inciden en la sequía y crecientes 90
Figura 40 Principal fuente de residuos de la vivienda y manejo de los residuos 91
Figura 41 Modelo de cuenca del Rio Tame en HEC - HMS 92
Figura 42 Serie de tiempo de los caudales diarios del Rio Tame 92
Figura 43 Curva de duración de caudales medios diarios - rio Tame (2007 - 2024) 93
Figura 44 Indice de retención y regulación hídrica para la zona de estudio 94
Figura 45 Caudal del rio Tame en temporada seca 95
Figura 46 Demanda hídrica sectorial de la zona de estudio 96
Figura 47 Indice de uso de agua superficial para la zona de estudio 97
Figura 48 Variación mensual del IUA 98
Figura 49 IVH para la zona de estudio 99

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1 Índice de uso de agua superficial 30
Ecuación 2 Índice de retención y regulación hídrica 31

Lista de Anexos

Anexo A: Formato de encuesta 113
Anexo B: Curva de duración de caudales para las fuentes tributarias 116

RESUMEN

El recurso hídrico es vulnerable a los cambios en la precipitación y temperatura, tanto naturales como antrópicos. A esto se suma la perdida de cobertura vegetal y del suelo, así como la contaminación del agua disminuyen disponibilidad hídrica. Este estudio, evaluó la vulnerabilidad al desabastecimiento del recurso hídrico en la cuenca del rio Tame, y como la variabilidad climática y las presiones antrópicas pueden influir en el comportamiento de la cuenca, para lo cual, se caracterizó las variables físico - morfométricas de la cuenca. Se analizaron las variables meteorológicas de precipitación y temperatura respecto al índice del niño oceánico (ONI por sus siglas en inglés) mediante correlación cruzada con el coeficiente de correlación de Pearson con un nivel de significancia del 5%, y se determinaron las probabilidades de afectación. Se evaluó el estado ambiental de la cuenca respecto a las presiones antrópicas considerando las actividades humanas presentes y como estas podrían afectar a la cuenca. También se estimaron los índices hídricos (IRH, IUA y IVH), para estos, fue necesario calcular los caudales para un periodo de tiempo de 2007 – 2024 con la metodología de lluvia – escorrentía en HEC – HMS debido a la falta de un registro histórico de caudales, además se estimó la oferta y demanda hídrica. Finalmente se propusieron opciones de manejo. De lo anterior, se pudo obtener que el ONI si influye en las variables con r = 0.47 con lag de 3 para temperatura, y r = 0.2 con lag de -1 para precipitación, y un r = 0.88 entre la precipitación y caudales calculados, y r = - 0.35 con relación a la temperatura, además, el análisis de las probabilidades de afectación, se evidencio que este fenómeno puede llegar a intensificar los eventos de sequía durante la fase de El Niño y aumentar levemente las precipitaciones en La Niña. Por otro lado, sobre el área protegida se encontraron actividades pecuarias y agrícolas que están afectando las coberturas boscosas, propiciando la pérdida del suelo y por tanto aumentando la escorrentía superficial ante los eventos de lluvia, lo que aumenta la ocurrencia de crecidas sobre las fuentes hídricas, y por otro lado se reduce la infiltración dificultando el sostenimiento de los caudales en época seca. En general se obtuvo un índice de vulnerabilidad medio, el cual tiene mayor implicación el índice de regulación hídrica, estos caudales están influenciados por las características físicas de la cuenca y como se planteaba en la correlación por las variables de precipitación y temperatura, influenciada a su vez por el ONI, con lo cual se puede decir que la influencia de la variabilidad climática y las presiones antrópicas sobre la vulnerabilidad, se da principalmente en la regulación y retención hídrica en las diferentes

temporadas de lluvias y sequias. Así mismo, considerado la afectación durante la época seca y el aumento del índice de uso del agua en esta temporada, es importante considerar el impacto en esta época y plantear medidas de mitigación para estos cambios que permitan el uso sostenible de la cuenca.

Palabras clave: Variabilidad climática, Temperatura, precipitación, ONI, correlación, caudales, presiones antropogénicas, vulnerabilidad.

CAPÍTULO I

Introducción

La vulnerabilidad de los recursos hídricos frente a la variabilidad climática y las presiones antropogénicas representan un gran desafío para la sostenibilidad ambiental. La cuenca del rio Tame se encuentra dentro del área protegida del Parque Nacional Natural El Cocuy, la cual cuenta con una gran diversidad de ecosistemas, lo cual la hace especialmente sensible a los efectos de la variabilidad climática. Estas fluctuaciones espacio temporal de las precipitaciones es un factor de suma importancia en la toma de decisiones en las cuencas hidrográficas, pues estas influyen de manera significativa en el régimen natural de caudales como en las actividades de las personas que habitan sobre la misma.

La fisiografía de la cuenca, sobre el flanco oriental de la cordillera oriental y el gradiente altitudinal, determinan la distribución de las precipitaciones y la temperatura sobre el área de la cuenca, con mayores precipitaciones hacia la zona media de la cuenca, disminuyendo al acercarse al nevado. Por otro lado, las temperaturas van descendiendo conforme aumenta la altitud. Así mismo, por su ubicación geográfica recibe las masas de aire húmedo formadas en las llanuras que por acción de los vientos de desplazan hacia la cordillera oriental generando precipitaciones en la alta montaña que se concentran sobre los cauces hídricos.

Analizar la influencia de los fenómenos de variabilidad climática como El Niño y La Niña es esencial para comprender como estos puede afectar los caudales o la regulación hídrica de la región, ya que estos afectan significativamente los patrones de lluvia, con disminución de precipitaciones durante el niño y aumentos durante la niña. Así mismo, considerar las presiones antropogénicas permite conocer como estas podrían impactar sobre la disponibilidad y calidad de agua , lo que permite comprender y gestionar de manera efectiva el recuerdo hídrico, así como mitigar aquellos impactos que se derivan de estos factores.

La vulnerabilidad de la cuenca se mide como la capacidad de la cuenca para adaptarse a los cambios en el clima y alteraciones antrópicas sin comprometer su funcionamiento. La regulación hídrica de la cuenca, la capacidad de la cuenca para ofertar el agua necesaria para suplir

las necesidades humanas durante épocas de sequía son factores importantes a tener en cuenta para determinar qué tan vulnerable puede llegar a ser la cuenca ante estos cambios.

La influencia de la variabilidad climática y las presiones antropogénicas sobre una cuenca es un tema complejo que requiere un enfoque multidisciplinario y la consideración de factores ambientales, sociales y económicos. El estudio detallado de estas interacciones es fundamental para promover la sostenibilidad de las cuencas hidrográficas y garantizar la disponibilidad de agua para las generaciones futuras, por lo que, este estudio representa un paso inicial para comprender la influencia de estos factores en la hidrología de la región.

Planteamiento del Problema

El la disponibilidad y calidad del recurso hídrico de la cuenca del Rio Tame se encuentra en riesgo según el Plan de Manejo del Parque Nacional Natural El Cocuy (2021), el cual ha identificado que este recurso está siendo afectado por actividades antropogénicas como la ganadería, la tala selectiva, deforestación y las quemas, las cuales degradan el bosque andino y su cobertura natural. A esto se suma el impacto del cambio climático y la variabilidad climática (estacional e interanual principalmente), que según proyecciones de Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA, 2022), traerán consigo una disminución en las precipitaciones y un incremento en las temperaturas para el departamento de Arauca, alterando significativamente la oferta hídrica en una zona esencial para la protección y conservación.

Durante la temporada seca, se ha observado una reducción de los caudales, limitando el suministro de agua a los ecosistemas y comunidades. En contraste, las temporadas lluviosas de mayo a julio traen consigo crecientes y erosión hídrica, exacerbadas por la deforestación debida a la expansión ganadera.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) ha reportado la presencia del fenómeno del niño en Colombia, lo que se manifiesta en altas temperaturas e incendios forestales, afectando la precipitación y con ello, la disponibilidad hídrica. La falta de información sobre el impacto regional de la variabilidad climática en el recurso hídrico es un vacío que esta investigación busca abordar.

En este contexto, surgen las siguientes preguntas de investigación: ¿Cuál es la vulnerabilidad al desabastecimiento del recurso hídrico en la cuenca del río Tame, costado oriental del PNN El Cocuy ante eventos de variabilidad climática y presiones antropogénicas? y ¿Qué medidas se podrían proponer en el área protegida para preservar este servicio ecosistémico?

Justificación

El Parque Nacional Natural El Cocuy (PNN El Cocuy) es importante como fuente hídrica. La preservación del recurso hídrico, identificado como uno de los valores objeto de conservación (VOC), es esencial, y el río Tame ha sido priorizado dentro de este marco, por lo que se realizan monitoreos bimensuales.

Esta investigación responde a la necesidad de generar información que contribuya a la toma de decisiones de manejo como se plasma en la tercera situación de manejo en el Plan de Manejo. Al comprender la vulnerabilidad del río Tame al desabastecimiento hídrico en el contexto de la variabilidad climática y las presiones antropogénicas, se facilitará la mejora en la toma de decisiones basada en una caracterización precisa de las presiones, la variabilidad climática y las áreas más vulnerables. Además, permitirá identificar opciones de manejo ambiental aplicables que contribuirán significativamente a la planificación y gestión sostenible del recurso hídrico.

La relevancia de esta investigación se extiende a fomentar la participación activa de los diferentes actores involucrados, avanzando así en la planeación e implementación de medidas que aseguren tanto la disponibilidad como la calidad del agua. Esto es fundamental para mantener el servicio ecosistémico que provee el parque, en consonancia con el segundo objetivo de conservación establecido para el PNN El Cocuy. Por lo tanto, este estudio no solo aborda una necesidad ambiental, sino que también proporciona una base sólida para acciones futuras orientadas a la conservación y gestión efectiva del recurso hídrico.

.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico en la cuenca del Río Tame, costado oriental del Parque Nacional Natural El Cocuy ante la variabilidad climática y las presiones antropogénicas.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar variables físicas de la cuenca del rio Tame (morfometría, litología, geología, cobertura vegetal y uso del suelo)
2. Analizar las variables climáticas de precipitación y temperatura en relación con eventos de variabilidad climática (El niño oscilación del sur – (ENOS)) en la cuenca
3. Evaluar el estado ambiental de la cuenca del río Tame, en relación con las presiones antropogénicas.
4. Identificar el grado de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico
5. Formular recomendaciones y opciones de manejo ambiental

CAPITULO II

Alcances y Limitaciones

Este proyecto tiene como alcance el análisis de las variables meteorológicas que influyen en el territorio en relación a eventos de variabilidad climática (El Niño y La Niña), así como la identificación de las actividades humanas que perturban la cuenca y cómo estos factores pueden afectar la disponibilidad hídrica mediante el IVH. Todo esto con el fin de generar información que sea útil en la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico dentro del Parque Nacional Natural el Cocuy

A pesar de la información obtenida, el proyecto se vio limitado por la escasez de estaciones hidrometereológicas con información histórica sobre caudales que permitieran construir un modelo calibrado, al igual que datos de precipitación y temperatura que abarcaran el gradiente altitudinal de la cuenca, por lo que el análisis climático se limita a la parte baja y media de la cuenca. Además, las dificultades de acceso a la zona de estudio debido a la presencia de comunidades indígenas y a la cancelación de salidas por razones de orden público, generaron obstáculos en la recopilación de información de campo. Estas limitaciones, aunque significativas, destacan la necesidad de abordar no solo los aspectos técnicos, sino también los desafíos sociales y logísticos en proyectos de esta naturaleza.

Marco Referencial

Marco Contextual

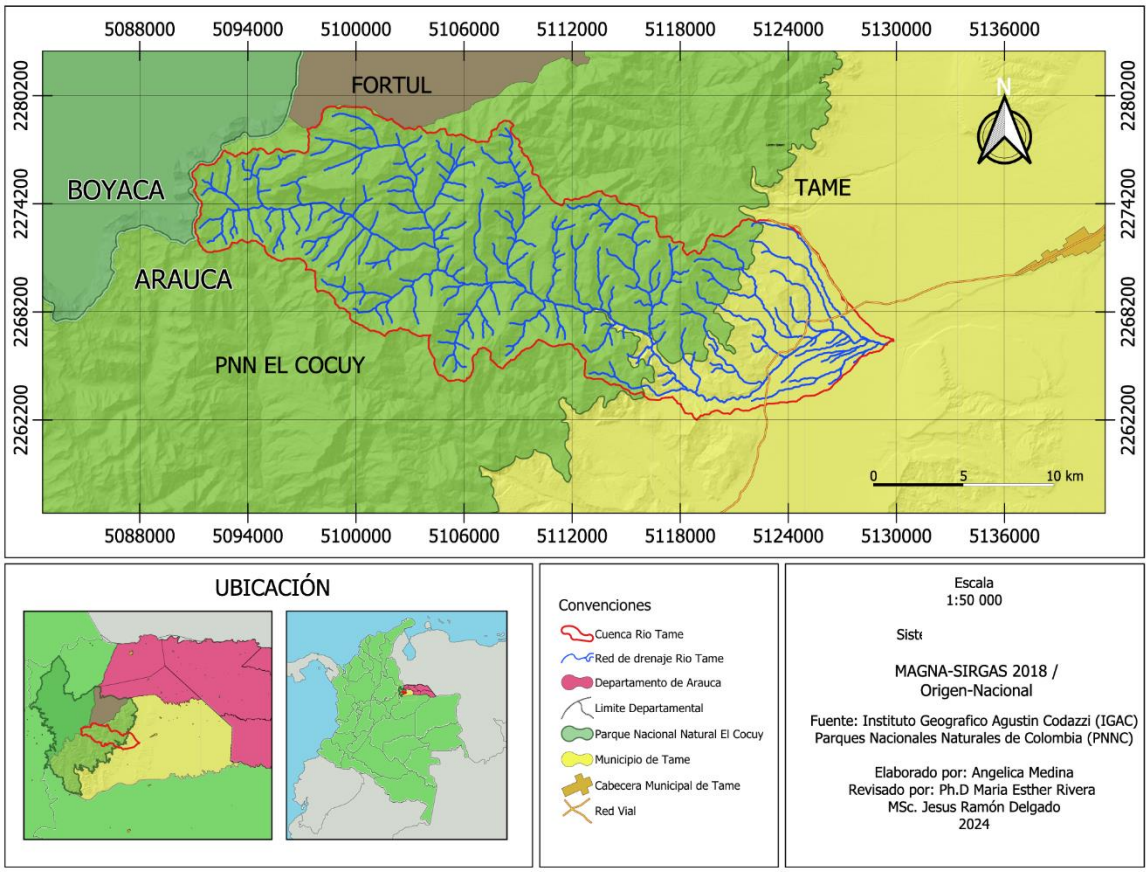
El Parque Nacional Natural El Cocuy (PNN El Cocuy) se encuentra en la región nororiental de la Cordillera Oriental de los Andes, abarcando los departamentos de Arauca, Boyacá y Casanare, con una extensión de 305,879 hectáreas. En el lado occidental, el área protegida comienza a 4000 metros sobre el nivel del mar y alcanza su punto más alto en la cresta de la cordillera a 5330 metros sobre el nivel del mar; en el lado oriental, desciende hasta los 600 metros sobre el nivel del mar en el piedemonte llanero de los departamentos de Arauca y Casanare. Este parque es el hogar de más de 20 picos nevados que superan los 5,000 metros de altura, con el Ritacuba Blanco como el más alto, alcanzando los 5,410 metros. Además, alberga una biodiversidad impresionante, con más de 200 especies de aves, 30 especies de mamíferos y una gran variedad de flora endémica y adaptada a las condiciones extremas de los páramos. El parque también es conocido por ser el lugar de nacimiento de varios arroyos que alimentan los ríos Arauca, Casanare, Chicamocha, Magdalena y Orinoco (Parques Nacionales Naturales de Colombia – PNNC, 2024).

El Área de Reserva Forestal Protectora del Río Tame comprende alrededor de 1,647.52 hectáreas de territorio (Registro Único Nacional de Áreas Protegidas – RUNAP. (2024). Su propósito es dedicarse al establecimiento o cuidado y uso sostenible de los bosques y otras formas naturales de vegetación, así como a su conservación, utilización sostenible, restauración, estudio y disfrute (Corporación Autónoma Regional del Tolima – CORTOLIMA, 2024).

La cuenca del rio Tame se encuentra en la vertiente oriental del PNN El Cocuy y en el área de reserva forestal protectora, en el municipio de Tame – Arauca como se observa en el mapa 1. Se encuentra entre los 4612 y 436 m de altura, en los sectores de manejo de Rio Tame – Lopeño y Rio Cravo Norte, en las zonas de recuperación natural e intangibles del parque. Se puede acceder por la vía principal Tame – La Cabuya a aproximadamente 20 km del casco urbano de Tame.

Figura 1

Ubicación de la zona de estudio



Fuente: Medina (2024), Modificado en QGIS

Antecedentes

Alrededor del mundo y en Colombia se han realizado diversos estudios muestran que los efectos que tiene la variabilidad y el cambio climático sobre el recurso hídrico están afectando la disponibilidad hídrica, a continuación, se presentan algunos estudios realizados en un periodo de 2019 – 2024.

Existe cierta incertidumbre sobre el grado de vulnerabilidad de un sistema hidrológico ante los efectos de la variabilidad y cambio climático. Martínez & Orozco, (2022) realizaron una investigación titulada “Metodología para evaluar la vulnerabilidad de sistemas hidrológicos ante

los potenciales efectos del cambio climático" donde determinaron la vulnerabilidad actual y futura de los sistemas hidrológicos de la cuenca del rio Turbio en México, usando el modelo hidrológico (TETIS) el cual permite cuantificar las vulnerabilidades del sistema, un modelo de circulación general, entre otras herramientas de análisis. Con esta metodología proyectaron la vulnerabilidad a futuro en diferentes escenarios, los resultados de este estudio mostraron que el sistema hidrológico del área de estudio ya es vulnerable a los efectos del cambio climático.

Por otro lado, Vázquez, y otros, (2021) también emplearon modelo TETIS debido a los buenos resultados obtenidos en estudios anteriores, en una investigación titulada "Evaluación del efecto del cambio climático y variabilidad climática sobre las fuentes de abastecimiento superficial: caso de estudio presa La Purísima" donde tuvieron en cuenta los efectos del cambio climático y variabilidad climática, incorporando el uso de modelos matemáticos, información geográfica, datos hidrometereológicos y escenarios futuros. Se determinaron tres parámetros principales del modelo a partir de información geográfica de geología, edafología y usos del suelo. Posteriormente se evaluó el efecto de la variabilidad y cambio climático en tres escenarios futuros de condiciones críticas de sequía. Los resultados arrojaron una alta vulnerabilidad de la fuente a estos fenómenos, sin embargo, el modelo debe mejorarse para mejorar la precisión.

Otro estudio elaborado por Santos, (2019) con el título de "Modelo desarrollado en Python, para determinar la disponibilidad del recurso hídrico superficial y efectos de la variabilidad climática en la cuenca del río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala" determino el balance hídrico por medio de un modelo que simulaba la distribución espacial de la precipitación, evapotranspiración potencial y real, contenido de humedad en el suelo, almacenamiento y escorrentía superficial. El modelo permitió evaluar la variabilidad climática y simular diferentes escenarios modificando las variables de entrada como precipitación, evapotranspiración (temperatura y uso del suelo) y retención de humedad en base al método de thornthwaite para determinar el balance hídrico del suelo y su dinámica aplicado en un sistema de información geográfica. En cuanto a la variabilidad climática el modelo creado permitió analizar el fenómeno ENSO observando diferentes comportamientos en los parámetros de evapotranspiración real, retención de humedad, y déficit y excesos de humedad.

El estudio titulado “Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del rio Chancay – Lambayeque utilizando SWAT” elaborado por Ccama & Turpo, (2020) evaluó la vulnerabilidad del recurso hídrico en la cuenca del río Chancay utilizando el modelo SWAT. Los resultados indicaron un aumento en la temperatura y precipitación en la cuenca proyectado hasta 2100. Se destaca la importancia de evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico ante el cambio climático, especialmente en regiones donde eventos extremos como sequías e inundaciones pueden afectar la disponibilidad hídrica, la agricultura y la biodiversidad. Se menciona la necesidad de realizar más investigaciones con diferentes escenarios climáticos y considerar el cambio de cobertura en futuros estudios para mejorar la precisión de las predicciones

Otra investigación que destaca la importancia de evaluar la variabilidad climática en la gestión del recurso hídrico es el realizado por Tahiri et al. (2022) titulado “ Influence of climate variability on water resource availability in the upper basin of Oum-Er-Rabiaa, Morocco” el cual se centra en analizar la variabilidad climática y su impacto en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca superior de Oum-Er-Rabiaa, Marruecos. Se utilizan métodos estadísticos como las pruebas de Pettitt y Buishand para identificar cambios significativos en las series temporales de precipitación y caudales de manantiales. Se observa una clara relación entre la variabilidad de la lluvia y la disponibilidad de agua en la región, con fluctuaciones marcadas en diferentes subperíodos. Además, se destaca la influencia de la Oscilación del Atlántico Norte en las condiciones climáticas locales, lo que sugiere la importancia de considerar la variabilidad climática en la gestión sostenible de los recursos hídricos.

De acuerdo con los estudios presentados que analizan los efectos de la variabilidad climática en las cuencas de estudio, junto al uso del suelo y los cambios de cobertura en la disponibilidad del recurso, siendo generalmente negativo pues en la mayoría la oferta hídrica va disminuyendo en escenarios futuros.

A nivel nacional también se han realizado estudios empleando la herramienta SWAT como el caso de la investigación denominada “Evaluación de la vulnerabilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Aipe mediante la estimación de indicadores hídricos y modelación de la respuesta hidrológica” realizada por Ovalle, (2019). El modelo genero una serie de caudales

medios diarios para el rio Aipe que sirven de insumo para determinar la oferta hídrica disponible por medio de la metodología propuesta por el IDEAM en el estudio nacional del agua. Luego determinaron la demanda hídrica teniendo en cuenta los caudales concesionados. Para el análisis de vulnerabilidad emplearon 3 índices, el índice de uso del agua – IUA, índice de retención y regulación hídrica – IRH, y el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico – IVH. Por último, propusieron medidas de adaptación y mitigación. Según los resultados, la cuenca en condiciones hidrológicas normales no presenta vulnerabilidad al desabastecimiento, sin embargo, recomienda revisar las concesiones y el uso que le dan los usuarios al agua para controlar el desperdicio del recurso que pueda provocar desabastecimiento.

Hernández-Gamboa and Otálora-Herrán (2018) en su estudio llamado "Estimación de los índices hídricos (IUA, IRH, IVH) y formulación de medidas para la mitigación del desabastecimiento en la subcuenca Arroyo Grande Corozal (2502-01-07) de la cuenca río Bajo San Jorge" determinaron estos índices a partir de datos obtenidos de un modelo hidrológico aplicando la metodología del número de curva en HEC-HMS, debido a los pocos registros históricos de caudales encontrados en la zona de estudio. Este modelo les permito determinar lo índices y a partir de esto formularon algunas medidas de adaptación y mitigación para hacer frente a las problemáticas que encontraron.

A diferencia del estudio anterior Güiza, (2019) en su estudio titulado "Estimación de los cambios en los índices asociados a la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Coello bajo escenarios de cambio climático" tuvieron en cuenta los efectos del cambio climático sobre los índices hídricos de IUA, IRH, IVH, agregando el índice de aridez – IA, e igualmente utilizaron SWAT para la modelación hidrológica donde se tiene en cuenta la cobertura y tipo de suelo. Para la evaluación del cambio climático se tuvo en cuenta los modelos de circulación general. Con la metodología seleccionada se analizaron las variables de precipitación y temperatura obteniendo reducciones en la precipitación diaria, pero aumentos en la precipitación anual, lo que indica lluvias extremas en periodos cortos de tiempo, la temperatura presento un aumento notorio, para el 2050 observaron aumentos de 2.5°C para el peor escenario.

Osorio, (2019) en su estudio "Vulnerabilidad de la disponibilidad actual y futura del recurso hídrico en el valle de Aburrá y sus cuencas abastecedoras" tiene en cuenta de la

importancia hídrica para sostener las diferentes actividades que se realizan en el valle de aburra por lo que evalúa los factores que pueden afectar la disponibilidad del recurso en el futuro. Estimo la oferta y demanda mediante el software WEAP, con el cual se pueden analizar distintos escenarios a la vez, basados en cambios demográficos, del uso del suelo y climáticos, también se estimaron los índices IUA y IVH. Encontrando que la cuenca del rio Aburra tiene baja vulnerabilidad, sin embargo, las cuencas abastecedoras presentan riesgo por altas presiones en el recurso.

Un estudio realizado por Flórez y Torres, (2022) en la región andina titulado "Análisis de correlación de índices macro climáticos del fenómeno del niño y la niña con respecto a la precipitación en la Región Andina colombiana" investigo la relación entre los índices macro climáticos del fenómeno del Niño y la Niña y las precipitaciones en la región Andina colombiana. Busco identificar patrones de correlación que permitan prever las afectaciones causadas por estos fenómenos climáticos y desarrollar estrategias de mitigación de impactos. La metodología empleada en este estudio se basa en un enfoque investigativo que incluye la recolección y análisis de datos históricos de precipitación, así como la evaluación de los índices macro climáticos del ENSO. Realizaron una revisión bibliográfica exhaustiva para comprender mejor la relación entre estos fenómenos climáticos y el comportamiento de las precipitaciones en la región Andina. También aplicaron técnicas estadísticas para generar correlaciones significativas para estrategias de mitigación de impactos basadas en los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos revelaron una correlación significativa entre los índices macro climáticos y las precipitaciones en la región andina, permitiendo prever posibles afectaciones climáticas y mitigar riesgos.

En base a estos estudios afirma la importancia de estimar los índices hidrológicos propuestos por el IDEAM en el presente estudio, además de tener en cuenta el estudio nacional del agua. Al igual que lo realizado en estudios internacionales, la aplicación de software de modelado hidrológico permite conocer el comportamiento del sistema hídrico. Por otro lado, como expresan los autores, es importante conocer la vulnerabilidad del recurso hídrico ante eventos climáticos debido a la importancia del mismo para el sustento de las actividades económicas y la preservación de los ecosistemas existentes.

A nivel regional se encentran pocos estudios relacionados a los temas de investigación sobre la vulnerabilidad del recurso hídrico ante la variabilidad climática. Sin embargo, Gallo, (2022) realizo un estudio titulado “Estimación de la oferta hídrica para la planificación de cultivos en una cuenca hidrográfica de la Orinoquía colombiana” donde estudia cómo afecta las variaciones climáticas en la oferta hídrica para cultivos debido a los eventos extremos de precipitación que se presentan en la Orinoquia, la cuenca de estudio fue el caño Quenane, ubicada en la zona de piedemonte de la cordillera oriental. Usaron el modelo hidrológico HBV el cual no proporciono estimaciones de caudal satisfactorias pues subestimaba los datos en época lluviosa y sobreestimaba en época seca. Los resultados indican un cambio en la distribución, frecuencia e intensidad en las precipitaciones, lo que podría afectar la oferta hídrica, pues en épocas secas el caudal de la cuenca llega al caudal ambiental imposibilitando su uso en la agricultura, además destacan la falta de estudio frente al comportamiento climático del piedemonte llanero.

El estudio realizado en la cuenca del río Pamplonita por Castañeda y Ordoñez, (2019) titulado “Estudio de la vulnerabilidad climática del recurso hídrico de la cuenca del río Pamplonita” se enfocó en analizar la vulnerabilidad climática del recurso hídrico en la región. Se evaluaron diferentes variables climáticas como precipitación y temperatura, utilizando el modelo CCSM4 para simular el clima presente y futuro. Se identificó un aumento en los caudales para el periodo de 2015 a 2100, lo que podría resultar en posibles inundaciones debido a la cercanía de centros poblados al cauce principal de la cuenca. Recomendaron realizar alianzas con entidades venezolanas para futuros estudios, dada la naturaleza binacional de la cuenca. Además, se destaca la importancia de la herramienta Hydro-BID en el desarrollo de estudios hidrológicos y la planificación del territorio para mitigar los impactos de fenómenos hidro climatológicos.

Por otro lado, el ANLA, (2022) realizo un estudio definido como “Reporte de Alertas de Análisis Regional de Arauca” donde evaluaron diversos parámetros entre ellos la sensibilidad del recurso hídrico del departamento de Arauca teniendo en cuenta la oferta y demanda. Determinaron los índices hídricos (IUA, IHR, IVH, IACAL) para cada cuenca. En el análisis hidrológico emplearon un modelo semi distribuido llamado Mike She, empleado datos del IDEAM de precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, y teniendo en cuenta el tipo de suelo de la zona geológica y la cobertura, a partir de esta información se estimó la oferta hídrica y el caudal

ambiental, con lo cual se determinaron los índices obteniendo un IVH alto en la cuenca del rio Caranal lo que refiere altas presiones sobre la oferta hídrica del rio.

Un estudio realizado por Cepeda, Espinosa, Gutiérrez, Lagos, & Neira, (2020), titulado "Estimación de la oferta hídrica y diagnóstico general de saneamiento básico existente entre las microcuencas de los Ríos Cardenillo, Cóncavo, San Pablín, Corralitos y Lagunillas pertenecientes a la cuenca Alta del Río Nevado" en la zona occidental del PNN El Cocuy, donde utilizaron diferentes fuentes de información, para recopilar datos sobre las características fisiográficas, geológicas, de suelo, uso de suelo, cobertura vegetal, usos de agua y saneamiento básico. Se generó información sobre la oferta hídrica total, la oferta hídrica neta y la demanda hídrica en diferentes microcuencas y zonas de inter cuenca. Los resultados indicaran una mayor demanda hídrica para uso agrícola y pecuario en la parte baja de la zona de estudio y según el índice de escasez las microcuencas no presentan presiones importantes sobre el recurso hídrico en términos de cantidad.

En el departamento del Casanare, Ruiz-Ochoa et al. (2023), llevaron a cabo un análisis espacio-temporal de la variabilidad climática con el objetivo de mejorar la gestión hídrica denominado "Variabilidad climática (precipitación, temperatura y humedad relativa) para la gestión hídrica del departamento del Casanare, Colombia". Se evaluaron las siguientes variables: precipitación (mm), temperatura (°C) y humedad relativa (%), mediante estadística descriptiva y usando el coeficiente de correlación de Pearson con las variables del ENOS. En los resultados no encontraron diferencias significativas en las variables a nivel decadal, sin embargo, durante los eventos de El Niño y La Niña, la precipitación disminuyo y aumento respectivamente y a nivel estacional sigue un ciclo monomodal. En contraste, la temperatura aumento durante El Niño y disminuyo en La Niña, y sigue un ciclo bimodal. Al final, recomiendan incluir este tipo de análisis de variabilidad climática natural regional en los instrumentos de planificación y ordenamiento de cuencas.

De acuerdo con los antecedentes presentados, se resalta la falta de información en la región sobre la vulnerabilidad del recurso hídrico frente a la variabilidad climática y presiones antrópicas. Además, se pueden extraer algunos factores relevantes a tener en cuenta al momento de caracterizar la fuente hídrica, los cuales son los datos de precipitación, temperatura, evapotranspiración, caudales, tipo de suelo, cobertura del suelo, demanda o usos del agua, los

cuales la mayoría se repiten en las investigaciones consultadas. Por otro lado, la metodología lluvia – escorrentía es viable de usar en cuencas no instrumentadas como la cuenca de estudio, debido a que metodologías más complejas requieren de mayor información y variables.

Marco teórico

El agua es uno de los recursos naturales de mayor valor para los seres vivos, por lo que el deterioro y escasez está generando preocupación entre la población mundial. Se considera que la disponibilidad del agua condiciona la calidad de vida de las comunidades por lo que es importante conocer la oferta hídrica de las cuencas con fin de poder establecer una política de manejo para la conservación. La precipitación y la temperatura se convierten en variables meteorológicas principales en la determinación de la situación hídrica del suelo (Castro, 2022).

Colombia es uno de los países con mayor oferta hídrica natural del mundo. La oferta hídrica superficial en es el volumen de agua continental que se almacena en los cuerpos de agua superficiales en un periodo determinado de tiempo, la cual puede cuantificarse por medio de la escorrentía superficial, representado por el caudal especifico o isolíneas de rendimientos hídricos y escorrentía. Esta variable se analiza anual y mensualmente en condiciones hidrológicas medias, húmedas y secas (IDEAM, 2014). La oferta hídrica natural disponible es el resultado de sustraer a la oferta hídrica superficial el caudal ecológico y ambiental (IDEAM, 2010).

El recurso hídrico se ve afectado por el fenómeno de El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) debido a su capacidad para alterar los patrones de lluvia, lo que puede provocar escasez o exceso de agua en diferentes regiones. Además, las actividades humanas como la ganadería y la agricultura contribuyen a la contaminación del agua con pesticidas, fertilizantes y desechos animales, lo que afecta la calidad del recurso hídrico. La deforestación también tiene un impacto significativo, ya que reduce la capacidad de retención de agua del suelo y aumenta la erosión, lo que a su vez afecta la disponibilidad y calidad del agua.

Para Ruiz-Ochoa, Vargas-Corredor, Orduz-Amaya, & Torres-Corredor (2022), la variabilidad climática corresponde a periodos de tiempo cortos, donde se analizan las anomalías presentes en los datos meteorológicos al compararlos con un valor medio en un periodo de tiempo. En función de la ocurrencia de estos eventos climáticos en el tiempo, pueden influir y condicionar

la disponibilidad hídrica de la zona. Cuando los valores extreman se alejan más de lo esperado del valor promedio puede hablarse de variabilidad climática interanual como El Niño Oscilación del Sur (ENSO por su sigla en inglés) una de las causas de la variabilidad climática en las regiones tropicales (Ruiz-Ochoa, Vargas-Corredor, Orduz-Amaya, & Torres-Corredor, 2022).

El fenómeno del niño y la niña están relacionados a la variabilidad climática que afecta a diferentes partes del mundo, entre esas América latina, están asociados a cambios en las temperaturas del océano y en la atmosfera.

De acuerdo con Borunda (2023), el fenómeno del niño es la fase cálida del ENSO, donde las temperaturas del océano aumentan afectando los patrones climáticos a nivel global, sus efectos se dan en la distribución de las lluvias, sequias, alteraciones de los patrones de viento y en la temperatura del aire. Por otro lado, la niña es la fase fría, donde se observan patrones contrarios al niño, incluyendo aumento de lluvias en algunas regiones y sequias en otras, además de cambios en el viento y la temperatura. Ambos tienen efectos sobre la disponibilidad hídrica y otros sectores económicos.

El ONI (Oceanic Niño Index). Es un índice oficial de la NOAA que se basa en las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en el océano Pacífico tropical este-central. Se considera que estamos en un evento de El Niño cuando el ONI supera un cierto umbral durante un período sostenido (NOAA, 2024).

Las anomalías son aquellos datos que no parecen ajustarse al patrón, pueden deberse a errores de entrada de datos u otras veces pueden deberse a factores ambientales (Barrios, 2021). La determinación de anomalías es fundamental en el análisis de la variabilidad climática pues permite identificar valores que se encuentran fuera de lo normal los cuales pueden indicar variaciones en los datos por diversos factores como el ENSO, entre otros.

Según Rosero (2018) la vulnerabilidad se entiende como la susceptibilidad a afectaciones en actividades productivas, en viviendas e infraestructura, en la sostenibilidad ambiental y en los recursos naturales. El grado de vulnerabilidad define si un sistema es susceptible o no puede soportar los impactos negativos del cambio climático, la variabilidad climática y los fenómenos extremos. Se tienen en cuenta aspectos como la sensibilidad y capacidad de adaptación.

Para evaluar la vulnerabilidad del recurso hídrico el IDEAM ha propuesto un sistema de indicadores hídricos que sirven para explicar el estado del agua en cuanto a cantidad, estos responden a la incertidumbre sobre la disponibilidad del recurso. Estos índices se asocian al régimen natural (índice de regulación hídrica – IRH) y a la intervención humana (índice de uso del agua – IUA, índice de vulnerabilidad al desabastecimiento – IVH) (IDEAM, 2024).

Índice de uso de agua superficial (IUA). Establece la cantidad de agua que requieren lo diferentes sectores en cierto periodo de tiempo (anual, mensual) es decir la demanda, en relación con la oferta hídrica disponible en las mismas unidades de tiempo. Se debe considerar la oferta hídrica superficial y subterránea de forma separada (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MINAMBIENTE], 2014). Según el estudio nacional del agua (IDEAM, 2010), se calcula con la ecuación 1 y se clasifica de acuerdo a la tabla 2.

$$IUA = (Dh/Oh)* 100 \quad (1)$$

Donde, Dh: Demanda hídrica sectorial; Oh: Oferta hídrica superficial disponible

Tabla 1

Rangos Índice de Uso del Agua

Rango IUA	Categoría
IUA < 1	Muy bajo
1 < IUA < 10	Bajo
10 < IUA < 20	Moderado
20 < IUA < 50	Alto
50 < IUA < 100	Muy alto
IUA >100	Critico

Fuente: IDEAM (2023)

Índice de retención y regulación hídrica (IRH). Evalúa la capacidad de la cuenca para mantener y regular el régimen de caudales, teniendo en cuenta la interacción del suelo y la

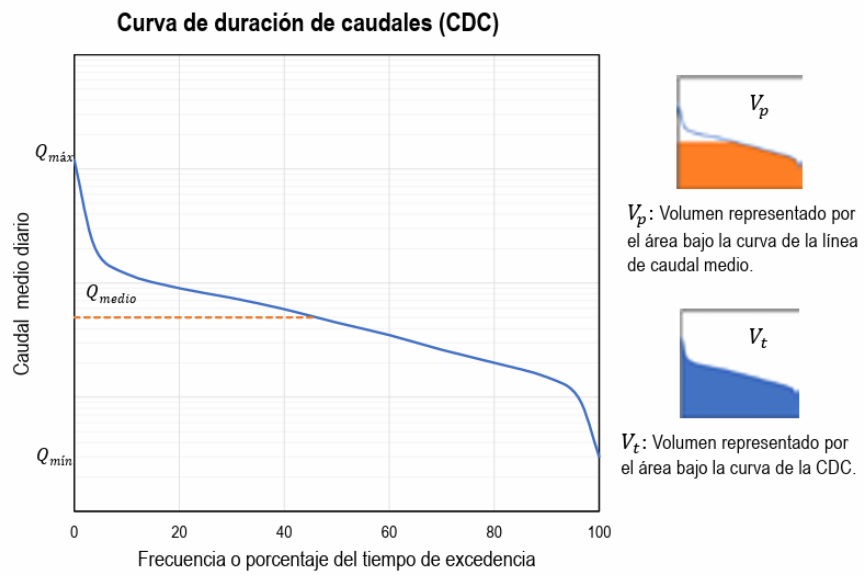
vegetación. Se define mediante la curva de duración de caudales medios diarios (CDC), la forma y pendiente de la curva indica los tiempos de duración del caudal en el cauce, y la relación de áreas bajo la curva define su regulación (IDEAM, 2023). Se encuentra en un rango de 0 a 1, donde los valores más bajos indican menor regulación (MINAMBIENTE, 2014). Según el IDEAM (2010), se calcula con la ecuación 3, basándose en la figura 1.

$$IRH = VP / Vt \quad (2)$$

Donde, VP: Volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio; Vt: Volumen total representado por el área bajo la curva de duración de caudales diarios

Figura 2

Método de Curva de duración de caudales



Fuente: IDEAM (2023)

De acuerdo con la tabla 2 se realiza la clasificación del índice de regulación hídrica.

Tabla 2

Clasificación del índice de regulación hídrica

Categoría	Rango
Muy alta	> 0.85
Alta	0.75 - 0.85
Moderada	0.65 - 0.75
Baja	0.50 - 0.65
Muy Baja	≤ 0.50

Fuente: IDEAM (2023)

Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento hídrico IVH. Es el índice más importante, pues determina el grado de fragilidad del sistema hídrico para mantener la oferta hídrica en épocas de fenómenos extremos de estiaje o el fenómeno cálido del pacifico o el niño los cuales pueden generar riesgos de desabastecimiento. Se obtiene a partir de una matriz que relaciona el IRH y el IUA de manera cualitativa como se muestra en la tabla 3 (MINAMBIENTE, 2014).

Tabla 3

Categorías índices de vulnerabilidad al desabastecimiento

IUA	IRH	Categoría IVH
Muy bajo	Alto	Muy bajo
Muy bajo	Moderado	Bajo
Muy bajo	Bajo	Medio
Muy bajo	Muy Bajo	Medio
Bajo	Alto	Bajo
Bajo	Moderado	Bajo
Bajo	Bajo	Medio
Bajo	Muy Bajo	Medio

IUA	IRH	Categoría IVH
Medio	Alto	Medio
Medio	Moderado	Medio
Medio	Bajo	Alto
Medio	Muy Bajo	Alto
Alto	Alto	Medio
Alto	Moderado	Alto
Alto	Bajo	Alto
Alto	Muy Bajo	Muy alto
Muy alto	Alto	Medio
Muy alto	Moderado	Alto
Muy alto	Bajo	Alto
Muy alto	Muy Bajo	Muy alto

Fuente: IDEAM (2023)

Se utilizan varias herramientas y software especializados para recopilar, analizar y modelar datos hidrológicos y climáticos. En esta investigación, se emplearan HEC HMS, XLSTAT y QGIS. A continuación, se describirá brevemente cada uno y su aplicación en estos campos.

HEC HMS es un software de modelado hidrológico desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. Se utiliza para simular eventos hidrológicos, como lluvias intensas, y para predecir caudales y comportamientos de flujo en cuencas hidrográficas. (Hydrologic Engineering Center, 2024). En la simulación de caudales, el software considera varios parámetros, incluido el Número de Curva (CN), que representa la capacidad de infiltración del suelo y su susceptibilidad a generar escorrentía en respuesta a la lluvia. La variación del CN tiene un gran efecto sobre el valor del caudal simulado, principalmente en el volumen del hidrograma y el caudal máximo o punta (López et al., 2012).

XLSTAT es un software estadístico para Microsoft Excel que ofrece una amplia gama de funciones para el análisis de datos, estadísticas y minería de datos. Proporciona herramientas para la preparación y visualización de datos, pruebas paramétricas y no paramétricas, y métodos de

modelado, como ANOVA, regresión, modelos lineales generalizados o modelos no lineales (Lumivero, 2024).

QGIS es un sistema de información geográfica (SIG) de código abierto que permite visualizar, analizar y representar datos espaciales. Ofrece soporte para la visualización, edición, impresión y análisis de datos geoespaciales en una variedad de formatos. QGIS funciona como el software SIG, lo que permite a los usuarios analizar y editar información espacial, así como componer y exportar mapas gráficos (QGIS project, 2024).

Marco legal

En la tabla 4 se incluyen las normas más relevantes que deben ser consideradas en esta investigación.

Tabla 4

Matriz de marco legal

Norma	Descripción	Responsable
Resolución Ejecutiva número 156 del 6 de junio de 1977	Aprueba el Acuerdo 0017 del 2 de mayo de 1977, originario de la Junta Directiva del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente –INDERENA "Por el cual se reserva, alinda y declara Parque Nacional Natural un área ubicada en el departamento de Boyacá y en la Intendencia de Arauca"	Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente INDERENA
Acuerdo INDERENA No. 0063 de 1985	"Por el cual se declara Área de Reserva Forestal Protectora la cuenca del Río Tame, en el Municipio de Tame, Intendencia de Arauca"	INDERENA e Instituto Colombiano de Energía Eléctrica ICEL (Actual IPSE)

Norma	Descripción	Responsable
Decreto 2811 de 1974	"Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente."	Gobierno Nacional
Decreto 2372 de 2010	Por el cual se reglamenta el Decreto-ley 2811 de 1974, la Ley 99 de 1993, la Ley 165 de 1994 y el Decreto-ley 216 de 2003, en relación con el Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y se dictan otras disposiciones.	Gobierno Nacional
Ley 373 de 1997	Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua.	El congreso de Colombia
Decreto 3930 de 2010	Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el Ordenamiento del Recurso Hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados.	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia
Decreto 1640 de 2012	Por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones	Gobierno Nacional
Decreto 1090 de 2018	Por el cual se adiciona el Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y se dictan otras disposiciones	Gobierno Nacional
Decreto 1076 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Gobierno Nacional

Norma	Descripción	Responsable
Ley 1523 de 2012	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones	El congreso de Colombia
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.	Gobierno de Colombia
Decreto 622 de 1977	Por el cual se reglamentan parcialmente el capítulo V, título II, parte Xlll, libro II del Decreto- Ley número 2811 de 1974 sobre «sistema de parques nacionales»; la Ley 23 de 1973 y la Ley 2 de 1959.	Instituto de Desarrollo Rural y de la Economía Nacional (INDERENA)
Resolución 839 de 2003	Establece los términos de referencia para la elaboración del Estudio sobre el estado actual de páramos y del Plan de Manejo Ambiental de los mismos	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en Colombia
Resolución 1433 de 2004	Por la cual se reglamenta el artículo 12 del Decreto 3100 de 2003, sobre Planes de Saneamientos y Manejo de Vertimientos, PSMV, y se adoptan otras determinaciones	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Decreto 1323 de 2007	Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico -SIRH	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

Norma	Descripción	Responsable
Decreto 1324 de 2007	Por el cual se crea el Registro de Usuarios del Recurso Hídrico y se dictan otras disposiciones	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Decreto 1729 de 2002	Por el cual se reglamenta la Parte XIII, Título 2, Capítulo III del Decreto-ley 2811 de 1974 sobre cuencas hidrográficas, parcialmente el numeral 12 del Artículo 5° de la Ley 99 de 1993 y se dictan otras disposiciones	Gobierno Nacional
Decreto 1449 de 1977	Mediante el cual se establecen obligaciones a los propietarios de predios sobre conservación, protección y aprovechamiento del agua	Gobierno Nacional
Resolución 865 de 2004	Por la cual se adopta la metodología para el cálculo del índice de escasez para aguas superficiales a que se refiere el Decreto 155 de 2004 y se adoptan otras disposiciones.	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Decreto 1575 de 2007	Por el cual se establece el Sistema para la Protección y Control de la Calidad del Agua para Consumo Humano	Gobierno Nacional

Fuente: Medina (2024)

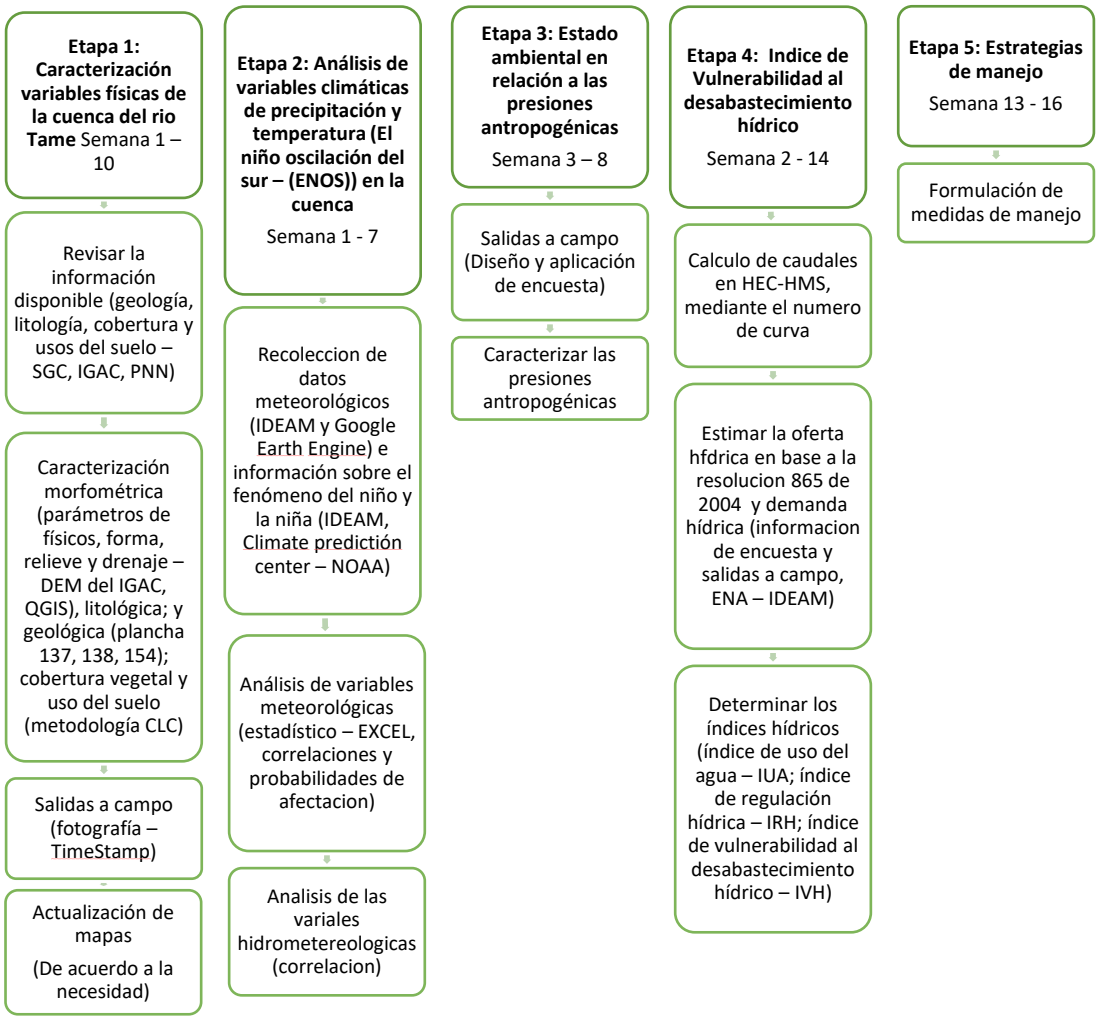
CAPITULO IV

Metodología

La metodología empleada en esta investigación se dividió en 5 etapas, cada una alineada con un objetivo específico. Esta estructura se detalla en la figura 3, la cual presenta los métodos usados para alcanzar los objetivos establecidos.

Figura 3

Etapas de la metodología



Fuente: Medina (2024)

A continuación, se proporcionará una explicación detallada de cada etapa.

Etapa 1. Caracterización de las variables físicas de la cuenca del rio Tame (morfometría, litología, geología, cobertura vegetal y uso del suelo)

Para la caracterización de los parámetros físicos, de forma, drenaje, relieve y tiempo de concentración de la zona de estudio, se descargó el modelo digital de terreno del municipio de Tame (Arauca) con resolución de 6x6 m, del Instituto geográfico Agustín Codazzi – IGAC a través de la plataforma de Colombia en mapas.

A partir del DEM descargado y utilizando las herramientas de geo proceso de GRASS (r.fill.dir, r.watershed, r.water.outlet, r.to.vect y r.stream.extact) en el sistema de información geográfica de código libre QGIS, se obtuvo la delimitación de la cuenca y los parámetros anteriormente mencionados complementando el cálculo en hojas de Excel.

Se revisó el estado de la cartográfica geológica desde el geo portal del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y se descargaron las planchas geológicas que abarcan la zona de estudio (137, 138 y 154) para la determinación de la geología y litología de esta, y se revisó la cartografía existente en cuanto a suelos y cobertura vegetal en el parque y en el IGAC. Además, se revisó información disponible de suelos y cobertura en otras entidades territoriales como la Gobernación de Arauca encontrando el mapa de suelos del departamento de Arauca realizado por la Universidad de los Llanos y la Gobernación de Arauca. Esta información se ubicó en la zona de estudio mediante el software QGIS.

En cuanto al mapa de cobertura se vio la necesidad de realizar una actualización en ciertas áreas, la cual se hizo tomando como base los mapas de coberturas existentes y como insumo principal se utilizó una imagen Sentinel 2 con resolución de 10 m para enero de 2024, además, se apoyó con el mapa de Google Satélite y Bing los cuales se conectaron a QGIS. La identificación de nuevas áreas se realizó mediante trazado manual y modificación de las áreas existente o las leyendas.

En las salidas de campo, se realizaron reuniones previas con el personal de parques para organizar la logística, definir las rutas y establecer las tareas. Durante estas reuniones, se hicieron

ajustes y se establecieron pautas claras para garantizar el éxito de las actividades. Estas salidas se realizaron con el fin de observar la geomorfología, usos del suelo y cobertura vegetal principalmente. Se tomó un registro fotográfico con la aplicación Time Stamp como evidencia de lo observado en campo.

En los puntos de muestreo de suelos se tuvo en cuenta los cambios de litología y además se evaluó el acceso a la zona de estudio y la relación con las comunidades indígenas presentes, con el fin de seleccionar los puntos más adecuados.

Para la toma de muestra en un corte, inicialmente se raspo la superficie con el palustre de arriba a abajo en un canal de aproximadamente 15 cm, con el fin de retirar las impurezas y dejar expuesto el suelo para observar los horizontes. Luego, se descartó el horizonte A, el cual corresponde al suelo con mayor materia orgánica, y se estableció la profundidad inicial de acuerdo a la profundidad de este, destacando que en general que la capa orgánica era poco profunda. Posteriormente, se raspo nuevamente de arriba a abajo hasta la profundidad final deseada o posible, colocando una bolsa en la parte inferior para recolectar la muestra. Cuando no se encontró un corte, se realizó un hueco de aproximadamente 50x50 cm para exponer el perfil y realizar la toma de la muestra de manera similar a las muestras en corte. Una vez se obtuvieron las muestras de suelo, se dejaron secar y se homogenizo, luego se dividió en cuatro partes iguales, de las cuales se toman dos partes opuestas que se almacenaron dentro de una bolsa hermética y se rotulo con información relevante.

Las profundidades, coordenadas y observaciones para cada punto se muestran en la tabla 6. Las muestras fueron almacenadas y trasladadas al laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad de Pamplona, y de acuerdo con la guia de laboratorio de suelos de Bowles (1981), de realizo el ensayo granulométrico por el método mecánico

Tabla 5

Información de los puntos de muestreo de suelos

Código de muestra	Coordenadas		Profundidad (cm)		Observaciones
	Latitud	Longitud	Inicial	Final	
CTR – 01	6.4101278	-71.9102131	0.2	1	Cobertura de pastos limpios; suelo de coloración rojiza; suelo seco duro.
CTR – 02	6.3820700	-71.9229115	0.1	0.6	Cobertura de bosque; suelo de coloración anaranjada.
CTR – 03	6.4519203	-71.8668344	0.1	0.8	Cobertura de bosque; suelo color marrón claro; bloques superficiales alrededor; ribera de caño sardina.
CTR – 04	6.4110658	-71.8720854	0.1	0.5	Cobertura de pastos limpios; capa de roca a 50 cm de profundidad; bloques superficiales alrededor.
CTR – 05	6.4703371	-71.8970729	0.1	1	Cobertura de pastos limpios; corte erosionado por acción del agua; consistencia pegajosa debido a la humedad de las lluvias presentadas.

Fuente: Medina (2024)

Etapa 2. Analizar las variables climáticas de precipitación y temperatura en relación con eventos de variabilidad climática (El niño oscilación del sur – (ENOS)) en la cuenca

La recolección de datos meteorológicos se realizó de acuerdo con el catálogo de estaciones del IDEAM, se determinaron las estaciones con datos de precipitación y temperatura más cercanas a la zona de estudio. Una vez identificadas las estaciones, se revisó la serie histórica disponible de

cada estación y se descargaron los datos desde el año 1994 a la fecha, con el fin de obtener una serie histórica suficiente para contrarrestar la ausencia de datos. Posteriormente, se aplicó la herramienta polígonos de Thiessen en QGIS, con el fin de determinar el área aferente de las estaciones sobre la cuenca de estudio y estimar la precipitación promedio de la cuenca.

Se encontraron 4 estaciones cercanas a la zona de estudio, dos pluviométricas (MORICHAL y SANTA INES), una estación climática ordinaria (TAME) y una climática principal (NEVADO DEL COCUY), tabla 6. Sin embargo, esta última no contaba con datos suficientes por lo que para el área aferente correspondiente se usaron datos desde Google Earth Engine de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) las cuales se usaron netamente para el cálculo de caudales.

Tabla 6

Estaciones climatológicas en la zona de estudio

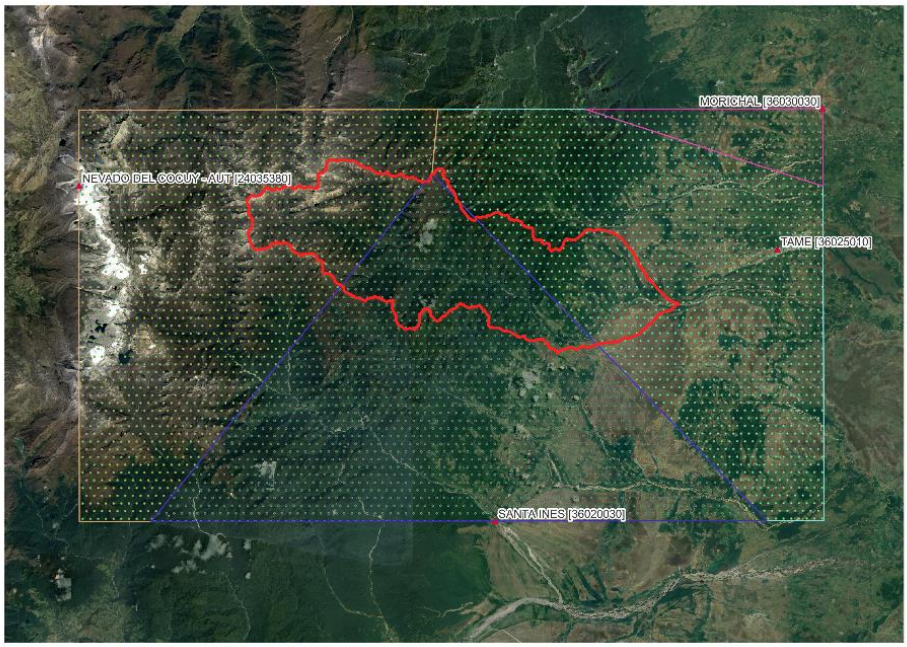
CODIGO	NOMBRE	CATEGORIA	ALTITUD	LATITUD	LONGITUD
36020030	SANTA INES	PM	860	6.23488	-71.9755
36025010	TAME	CO	350	6.45619	-71.7450
36030030	MORICHAL	PM	300	6.57063	-71.7076
24035380	NEVADO DEL COCUY	CP	4676	6.50911	-72.3141

Fuente: Medina (2024)

A partir del polígono de Thiessen se encontró que la estación MORICHAL no tiene área aferente en la zona de estudio como se muestra en la figura 4, por lo tanto, para las correlaciones solo se tuvieron en cuenta dos estaciones (TAME y SANTA INES) debido a que los datos tomados desde estaciones describen mejor el comportamiento de las variables en la zona de estudio.

Figura 4

Polígonos de Thiessen



Fuente: Elaborado en QGIS por Medina (2024)

Para observar el comportamiento de las variables inicialmente se realizó un análisis de un climograma, así como de series temporales en un periodo de 10 años (2014 – 2024). En cuanto a su tendencia central, dispersión y simetría se emplearon gráficos como histogramas, box – plot y qq plots tomando como base lo realizado en Barrios (2021). Además, mediante coeficiente de correlación de Pearson se determinó las relaciones de las variables entre sí mismas (autocorrelación) y en función de otras (correlación cruzada).

Para lo anterior se descargaron las variables de precipitación total mensual y de temperatura máxima media mensual, mínima media mensual y temperatura del aire media mensual de la estación TAME, para un periodo de 1994 – 2024 (30 años) con un total de 364 datos.

En estas series de tiempo se identificaron datos faltantes, los cuales se estimaron de acuerdo con promedios mensuales multianuales de la serie, debido a que no se identificaron series de

referencia que cumplieran ciertas condiciones planteadas en Barrios (2021). La tabla 7 muestra la cantidad y el porcentaje de datos faltantes estimados para cada serie de tiempo consultada.

Tabla 7

Datos faltantes estimados

Estación	Parámetro	Datos faltantes	% Datos
TAME	TMX	126	35
	TMN	69	19
	TMD	34	9.3
	PP	24	6.6
SANTA INES	PP	32	8.8

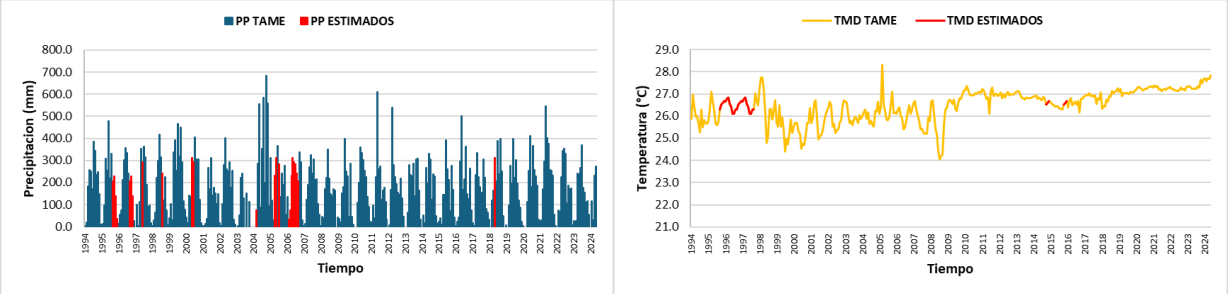
Nota: Temperatura máxima (TMX); temperatura mínima (TMN); temperatura media (TMD); precipitación (PP)

Fuente: Medina (2024)

Estos porcentajes se encuentran por debajo del 10% a excepción de la temperatura media máxima y mínima. Estos datos faltantes se concentran en pocos años como se observa de ejemplo en la figura 2, además, considerando el análisis de series temporales de los últimos 10 años a fin de estudiar la variabilidad climática interanual (2014 – 2024) y la elaboración de un climograma, el porcentaje de datos faltantes desciende a 4.8% para las series de temperatura siendo así un porcentaje aceptable para el análisis.

Figura 5

Datos estimados de la serie de temperatura media y precipitación total de la estación TAME



Nota: Precipitación (PP), Temperatura media mensual (TMD)

Fuente: Medina (2024)

Para el análisis de correlación se tuvieron en cuenta dos tipos de variables; explicativas y de respuesta. Las variables explicativas comprenden los datos de anomalías en la temperatura superficial del mar de la región 3 que fue usada por el IDEAM anteriormente en Montealegre (2014), y el ONI, estos relacionados al ENOS. Estos datos fueron obtenidos del archivo del Centro de Predicción Climática de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA), disponibles en su página web (Centro de Predicción Climática – CPC/NOAA, 2024).

De acuerdo con el ONI, se estableció la presencia del fenómeno del niño y la niña. Según en el informe de Null (2024) para indicar la presencia del niño o la niña los valores deben superar por 5 periodos consecutivos de 3 meses una anomalía superior o igual 0.5 para un evento cálido e inferior o igual a -0.5 para un evento frio, y su intensidad se divide en 4 categorías, débil con anomalías entre 0.5 a 0.9, moderado entre 1 y 1.4, fuerte entre 1.5 a 1.9 y muy fuerte valores superiores a 2.

Se emplearon datos mensuales de la precipitación total (PP) en milímetros y la temperatura media del aire en grados Celsius (°C), provenientes de las estaciones de la red meteorológica del IDEAM previamente determinadas como variables de respuesta.

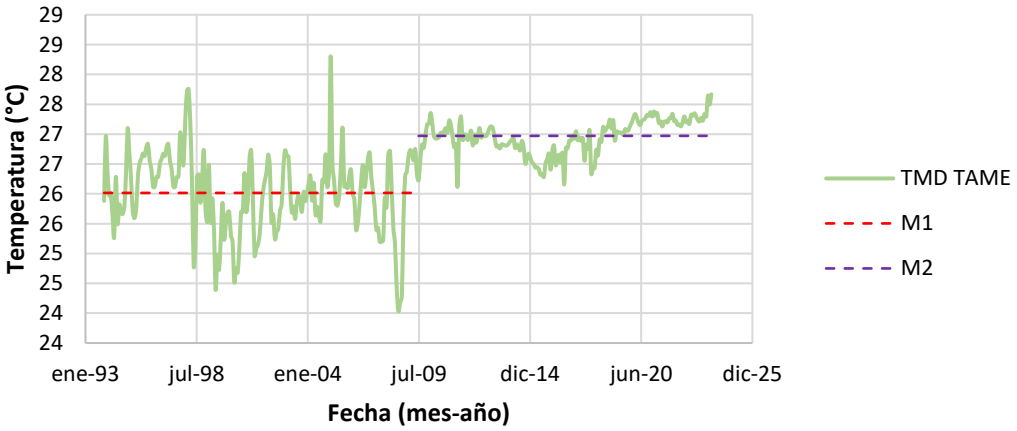
El coeficiente de correlación de Pearson permite establecer la relación entre dos variables. En estudios realizados anteriormente por Barrios (2021) y Ávila, Carvajal, & Gutiérrez (2014), la

correlación cruzada es una de las técnicas más empleadas para el análisis de este tipo de variables. Díaz (2014) argumenta que para aplicar correctamente la correlación cruzada en climatología las series temporales deberán ser estacionarias puesto que las variaciones de las variables deben ser independientes del tiempo, de no ser así deberán estar cointegradas para que el resultado de la correlación exprese una relación real entre las variables.

Ahora bien, la estacionariedad de las series se puede ver a través de la autocorrelación, donde valores significativos en diferentes lags indican la no estacionariedad de la serie y se deberán aplicar técnicas de transformación. Si la serie es no estacionaria por periodicidad o que posee un ciclo anual, la estacionariedad se puede lograr mediante el cálculo de anomalías en relación a las medias mensuales (Díaz, 2014), por lo cual, se calcularon las anomalías de acuerdo a la metodología usada por Barrios (2021). Sin embargo, para la variable temperatura se encontró que, en los últimos años, las anomalías eran todas positivas por lo que dificultaba el análisis de correlación, por lo cual, se realizó la correlación en dos periodos de 15 años (1994 – 2008 y 2009 – 2024) donde las variables eran homogéneas como se muestra en la figura 6. Sin embargo, en el segundo periodo fue necesario calcular las anomalías basadas en medias mensuales de 5 años para disminuir los efectos de la tendencia al aumento de los últimos años.

Figura 6

Homogeneidad de la variable temperatura media de la estación TAME



Fuente: Medina (2024)

El análisis de estacionariedad se apoya, además, en las pruebas de Dickey Fuller Aumentada (ADF, 1979) o la de Phillips – Perron (PP, 1988) o la prueba Kwiatkosky, Phillips, Schmidt, and Shin (KPSS, 1992) disponibles en XLStat.

Estas pruebas determinaron la estacionariedad de las series de anomalías por lo que se aplicó la correlación cruzada entre variables para determinar su relación. Para todos los análisis estadísticos se estableció un nivel de significancia del 5 %.

Por otro lado, se calcularon los índices de anomalías para precipitación y temperatura de acuerdo a la metodología planteada en Montealegre (2014), para el periodo 1994 a 2024 de manera trimestral, considerando los últimos tres trimestres del primer año y los primeros tres del segundo año, también para un evento típico, fuerte, moderado y débil, y para la temporada lluviosa y seca. Este índice se determinó para los años con mínimo 10 meses de datos por lo que se excluyeron algunos años en cada estación.

A partir de estas anomalías, se calculó el índice puntual (no acumulado), el índice acumulado, el índice categórico, la tabla de frecuencias y la tabla de probabilidad, para las series de tiempo de precipitación total mensual promedio de la cuenca y la temperatura del aire media mensual de la estación Tame debido a que es la única estación cercana con esta variable, esto con el fin de determinar la probabilidad de afectación de estos fenómenos sobre las variables meteorológicas superficiales.

Etapa 3. Evaluación del estado ambiental parcial de la cuenca del río Tame, en relación con las presiones antropogénicas

La encuesta (Anexo A) se llevó a cabo con el propósito de recopilar información sobre la el uso del recurso hídrico y las presiones antrópicas que lo afectan en la zona de estudio apoyadas con observaciones en campo. Esta encuesta se realizó con el fin de analizar y evaluar la situación del suministro de agua en diversas comunidades, así como recopilar información adicional sobre la gestión del recurso hídrico en estas áreas. Para esto se consideró la Ley de protección de datos personales o Ley 1581 de 2012 para Colombia. También, mediante observaciones en campo se identificaron las actividades antrópicas realizadas en la zona de estudio. Por otro lado, también se

revisó la información existente en cuanto a estudios de calidad de agua y demanda hídrica registrada en anteriores documentos disponibles.

Con lo anterior se pudo determinar las principales presiones sobre el recurso hídrico en la cuenca de estudio y en qué zonas de dan principalmente.

Etapa 4. Identificación del grado de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico

Se reviso los datos disponibles de caudales diarios de la estación rio Tame, sin embargo, esta no contaba con suficientes datos para realizar los análisis previstos, por lo que, se calculó los caudales para una serie histórica de 2007 – 2024 en el software HEC – HMS, mediante la metodología lluvia escorrentía con el método de pérdidas del número de curva, basándose en la metodología presentada por Amaya (2019) y Quimbay-Moreno et al. (2014).

A partir de los datos modelados, se obtuvieron las curvas de duración de caudales medios diarios con el fin de obtener el Índice de regulación y retención hídrica (IRH) para la cuenca del Rio Tame y los caños tributarios objeto de monitoreo por el PNN El Cocuy de acuerdo a la metodología del IDEAM (2023).

A partir de esto también se pudo determinar la oferta hídrica siguiendo la metodología usada en Salazar (2016) y IDEAM (2023) teniendo en cuenta la resolución 865 de 2004.

En cuanto a la demanda, para el sector doméstico, en base a las encuestas realizadas sobre la población existente, se utilizó la dotación neta por habitante de acuerdo a la resolución 0330 de 2017. Por otro lado, para el sector agrícola se calculó la evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo) en Cropwat y se utilizó el Kc para el cultivo de café encontrado según Cenicafe (2010) y para pastos de pastoreo según la FAO (2006). Por su parte, para la demanda pecuaria se utilizaron los módulos de consumos definidos en el ENA (2014).

A partir de la información de la demanda hídrica y la oferta hídrica disponible se determinó el índice de uso del agua (IUA), y junto con el IRH se estimó el IVH.

Etapa 5. Formulación de recomendaciones y opciones de manejo ambiental

De acuerdo a la información obtenida sobre las afectaciones de las presiones antropogénicas sobre la cuenca y las zonas más vulnerables, se formularan medidas de manejo ambiental que contribuyan al sostenimiento y conservación de la oferta hídrica como servicio ecosistémico.

CAPÍTULO V

Resultados y discusión

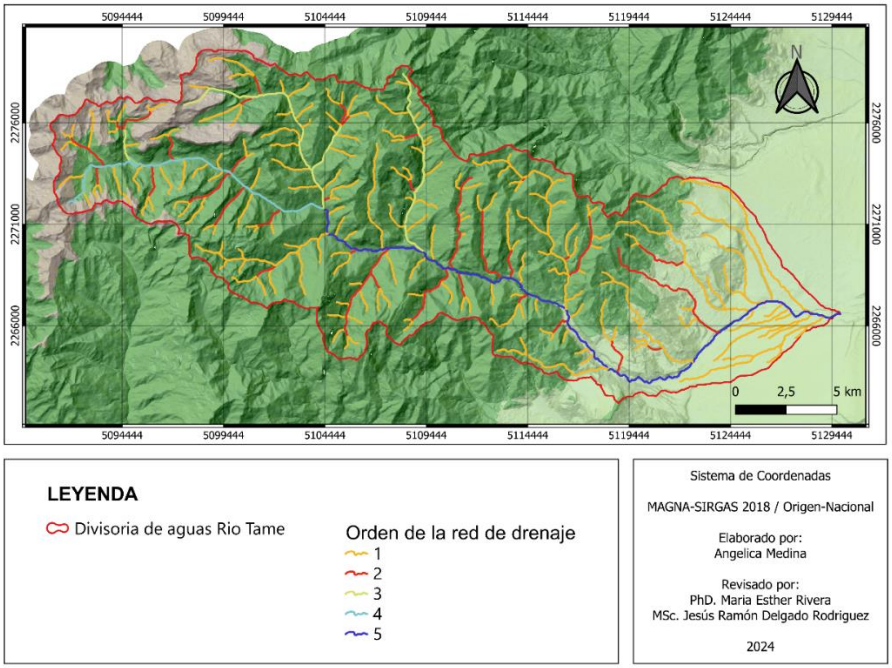
Caracterización física de la cuenca de estudio

Morfometría

La figura 7 se observa la delimitación de la zona de estudio, la cual presenta una forma alargada y cuyo orden según Sthraler (1969) es 5, indicando el grado de ramificación del sistema de drenaje. Además, el área la cuenca es de 344.6 km^2 y según Campos Aranda (1992) se clasifica entre intermedia y pequeña.

Figura 7

Delimitación y ordenes de la red de drenaje



Fuente: Medina (2024), elaborado en el software QGIS versión libre

En la tabla 8 se muestran los valores obtenidos para los parámetros físicos, de forma, relieve, drenaje y tiempo de concentración, de la cual se establece de acuerdo con el factor forma y el índice de circularidad, que es una cuenca ovalada con una producción sostenida de caudales moderada y bajo potencial a crecientes, según lo planteado por el Nucleo Rafael Rangel – Universidad de Los Andes (NURR-ULA, 2017). Conforme al coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, la cuenca es alargada, estas tienden a presentar descargas de agua menores y flujos superficiales más dinámicos. Esto se debe a que el cauce principal es más extenso que los cauces secundarios, por lo que los tiempos de concentración son mayores y las descargas se distribuyen en más tiempo (Córdova, 2016). Sin embargo, las cuencas alargadas suelen presentar un flujo de agua más veloz. Esto se debe a que logran una evacuación más rápida de la cuenca, con un mayor desarrollo de energía cinética en el arrastre de sedimentos hacia el nivel de base Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2024).

Tabla 8

Parámetros físico – morfométricos de la zona de estudio

PARÁMETROS FISICOS			
Parámetro	**Símbolo**	**Unidad**	**Valor**
Área	A	km^2	344.668
Perímetro	P	km	118.268
Longitud máxima de la cuenca	Lm	km	40.148
Longitud axial	La	km	39.084
Ancho promedio	W	km	8.585
Ancho máximo de la cuenca	l	km	14.594
Longitud cauce principal	Lc	km	52.84
PARÁMETROS DE FORMA			
Parámetro	**Símbolo**	**Valor**	**Descripción**
Factor forma	Ff	0.12	Forma estrecha
Índice de circularidad de Miller	Ic	0.310	Forma ovalada
Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius	Kc	1.784	Forma rectangular

Índice de alargamiento	Ia	2.751	La cuenca es muy alargada.
Índice de asimetría	Ias	2.022	El cauce principal se encuentra bastante recargado a una de las vertientes
PARÁMETROS DE RELIEVE			
Pendiente media de la cuenca	S (%)	53.118	El tipo de relieve es escarpado
Pendiente promedio del cauce principal	So (%)	7.003	Medianamente accidentada
Coeficiente de masividad	Cm	6.43	Cuenca muy montañosa
PARÁMETROS DE DRENAJE			
Densidad de drenaje	Dd	1.240	Baja densidad de drenaje
Densidad de corrientes	Dc	0.725	Baja
TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (h)			
Tiempo de concentración (Kirpich, 1942)	3.9142		

Fuente: Medina (2024)

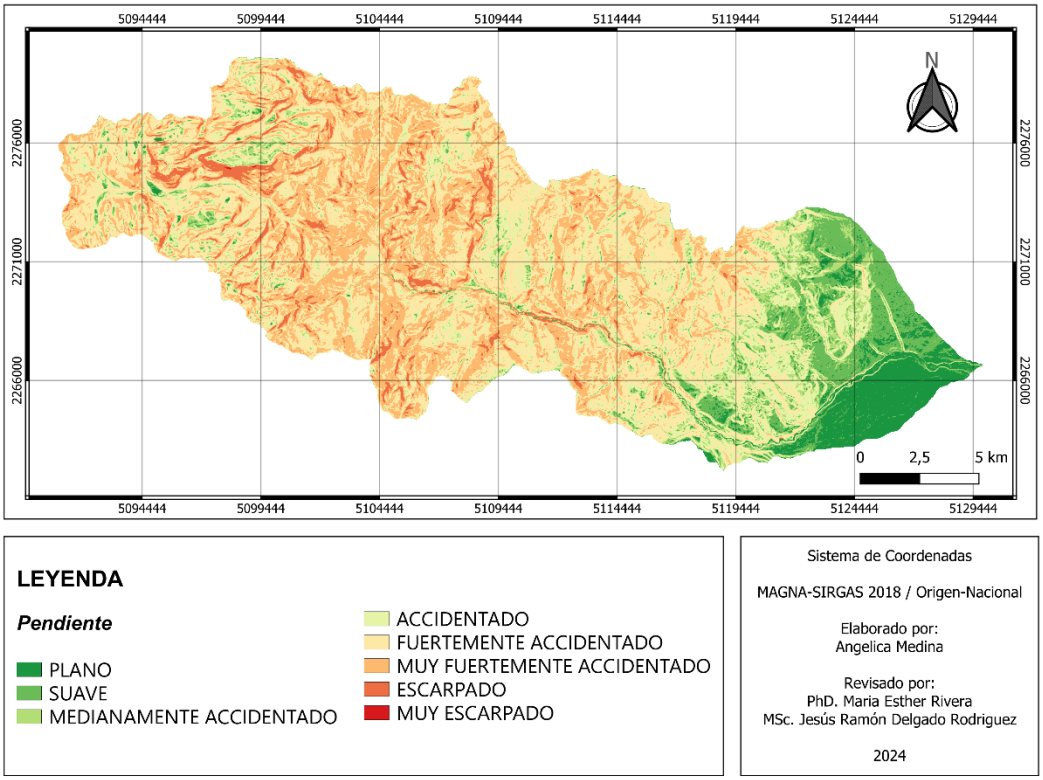
De la tabla 8, se infiere que el relieve de la cuenca es escarpado, lo cual se corrobora con lo presentado por el Consorcio POMCA Quindío (2020), sugiriendo que el agua tiende a fluir hacia la parte inferior de la cuenca, lo cual se correlaciona con el coeficiente de masividad. Este tipo de relieve puede influir en la erosión del suelo y en la dinámica de los flujos superficiales, lo que a su vez puede tener implicaciones en la gestión y conservación de la cuenca.

Con respecto al tiempo de concentración se clasifica como lento, debido a la baja pendiente del cauce principal y la forma alargada de la cuenca la cual representa un mayor recorrido para el agua desde el punto más alejado hasta el punto de salida.

En la figura 8 se muestra la distribución de las pendientes a lo largo de la cuenca, observándose que gran parte de la cuenca presenta una pendiente entre accidentada a muy escarpada contribuyendo a la erosión y arrastre de sedimentos, correspondiente a la zona de la cordillera oriental, y con pendientes menos pronunciadas hacia la parte baja, en la zona de piedemonte, lo cual permite la sedimentación depósitos del material de arrastre.

Figura 8

Pendientes de la zona de estudio

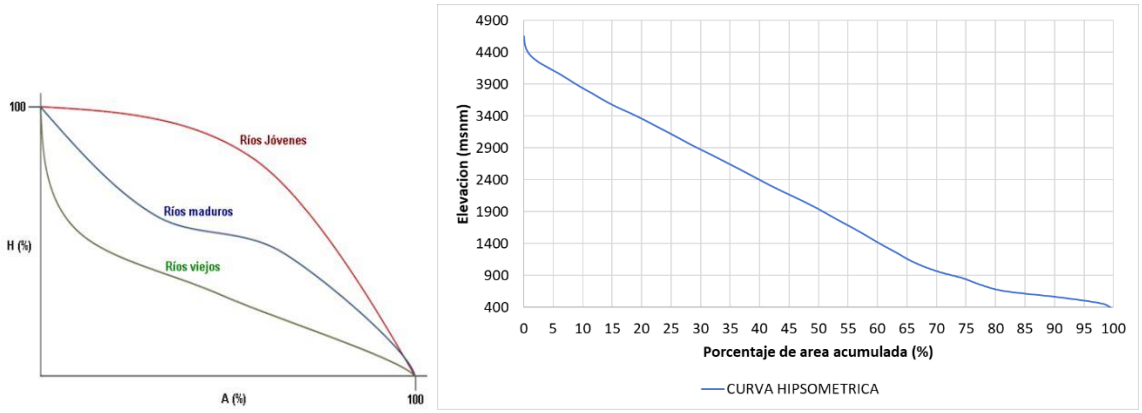


Fuente: Medina (2024), elaborado en el software QGIS versión libre

En la figura 9 se observa la curva hipsométrica, y considerando los tipos curva hipsométrica la zona de estudio encuentra estado de madurez o equilibrio en la parte media a alta, y en estado de vejez de tipo sedimentaria en la parte baja. Además, a razón de los cambios morfológicos y variaciones de pendiente, la parte alta se caracteriza por altos procesos erosivos, en cambio, la parte baja con pendientes entre medianamente accidentado, suaves y planas se caracteriza por una mayor acumulación de sedimentos y una disminución en la velocidad y fuerza de los ríos en esta zona, formando llanuras aluviales lo que se puede considerar como un valle maduro, lo cual se relaciona con el concepto de Thomas (1974) sobre el desarrollo de un valle.

Figura 9

Curva Hipsométrica de la cuenca de estudio



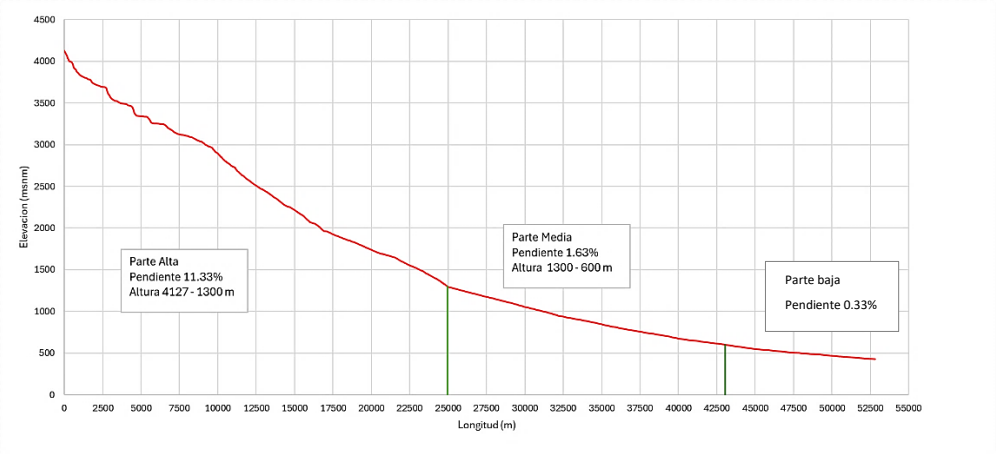
a) b)

Fuente: a) Consorcio Pomca Quindío (2020), b) Medina (2024)

Con respecto al perfil longitudinal del cauce principal (ver figura 10) se observa que es un cauce largo, presenta pendientes pronunciadas características de zona montañosa de la parte alta; pendientes moderadas en la parte media con zonas onduladas y valles; pendientes más suaves representan las planicies o llanuras de la parte baja. Se resalta que, en la parte alta, la corriente es débil pero debido a la alta pendiente inicial y la baja carga de sedimentos, la energía se utiliza para profundizar el cauce por lo que se presentan mayores procesos erosivos en esta zona. Sin embargo, en la parte baja del cauce, el caudal es mucho mayor al igual que la carga y el transporte de sedimentos de grano fino, por lo tanto, la corriente se mueve sobre un gradiente menor, con erosión en el fondo del cauce mínima de acuerdo a lo planteado por Salvatierra (2024).

Figura 10

Perfil longitudinal del cauce principal de la zona de estudio



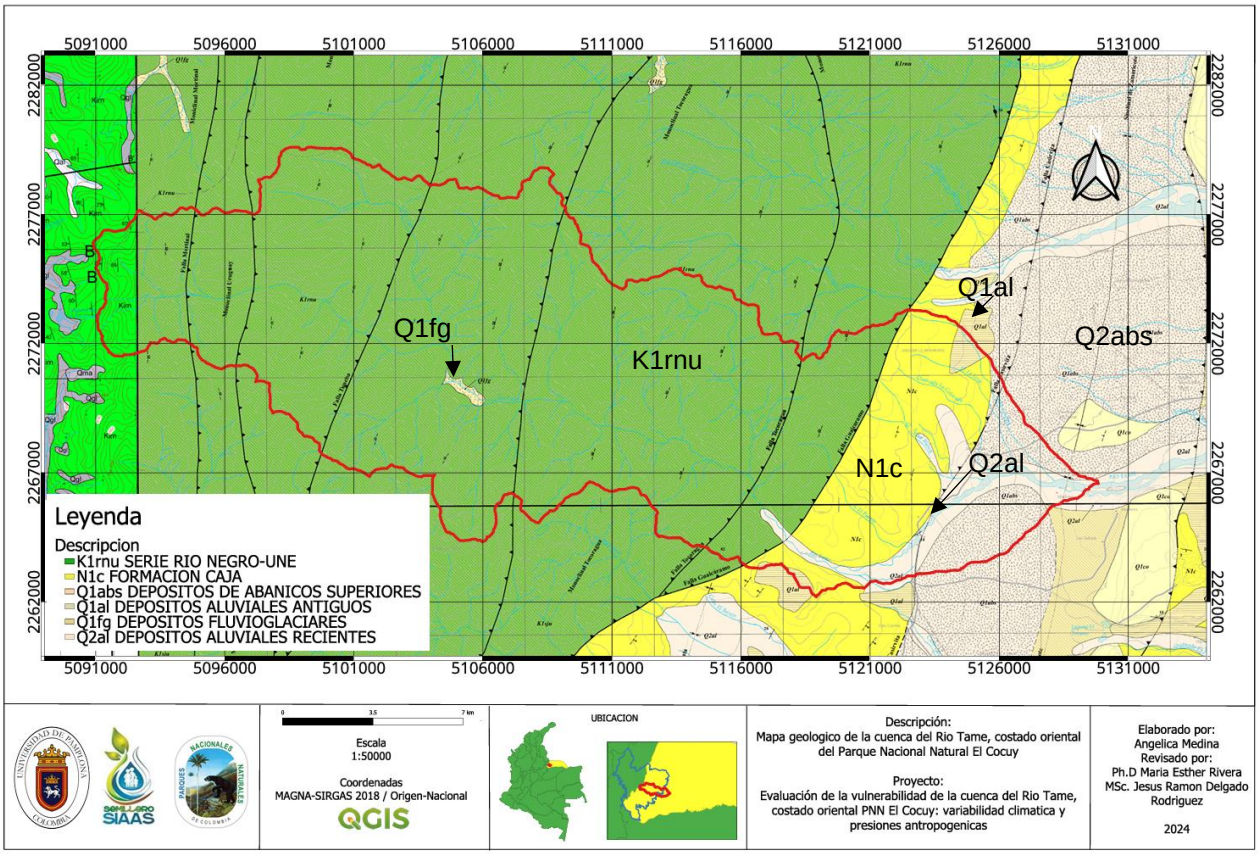
Fuente: Medina (2024)

Información Geológica

El mapa geológico de la cuenca proporciona una representación visual de la distribución y composición de las rocas y sedimentos de la región. La parte baja, corresponde a depósitos aluviales antiguos y recientes, a depósitos fluvio glaciares y depósitos de abanicos superiores, figura 11. Los cuales evidencia que en la zona predominan los procesos de acumulación de sedimentos, teniendo en cuenta además el perfil topográfico.

Figura 11

Mapa geológico de la zona de estudio



Fuente: Modificado de las planchas 137 Cocuy (1985), 138 Tame (2015) y 154 Hato Corozal (2015) del SGC, elaborado en el software QGIS versión libre

La geología descrita en las planchas 137, 138 y 154 para la zona de estudio corresponde a las siguientes unidades geológicas:

- *La Serie Río Negro-Une (K1rnu)*, la cual es un conjunto de arenitas de cuarzo, de grano fino a grueso, con estratificación plano paralela a tangencial, alternando con conjunto de lutitas y lodolitas, y en la parte media inferior, conglomerados con guijos y guijarros, con una edad del Valanginiano y Cenomaniado. Esta misma unidad descrita como Serie

Las Juntas – Une (K1sju) para la plancha 157 y en la plancha 137 como Formación Río Negro o Grupo Caqueza (Kirn).

- *Formación Caja (N1c)*, la cual corresponde a capas discontinuas de areniscas de grano fino a medio, de composición cuarzosa, estructura tabular plana paralela continua con estratificación laminar y en algunos sectores ondulada, con capas centimétricas de lodolitas y arcillolitas; ocasionalmente niveles de conglomerados, su edad el Mioceno Tardío.
- *Depósitos Aluviales Recientes (Q2al),* constituido por materiales areno limosos, arenas limpias finas a muy finas y limo arcillosas en menor proporción.
- *Depósitos Aluviales Antiguos (Q1al),* con geoformas de terrazas en niveles topográficos por encima del cauce actual, compuesto por gravas, bloques, arenas mal seleccionado en una matriz lodo arenosa y en menor proporción arcillas y lodos.
- *Depósitos Fluvioglaciares (Q1fg),* originados por la fusión de bloques de hielo en las partes altas de la región, que llevan consigo bloques, gravas, arenas y en menor proporción arcillas y lodos, las rocas corresponden principalmente a areniscas cuarzosas, de formas variables; por último, encontramos.
- *Depósitos de Abanicos Superiores (Q1abs),* correspondiente a bloques heterométricos embebidos en una matriz lodo arenosa, con pendiente mayor a la de los abanicos inferiores.

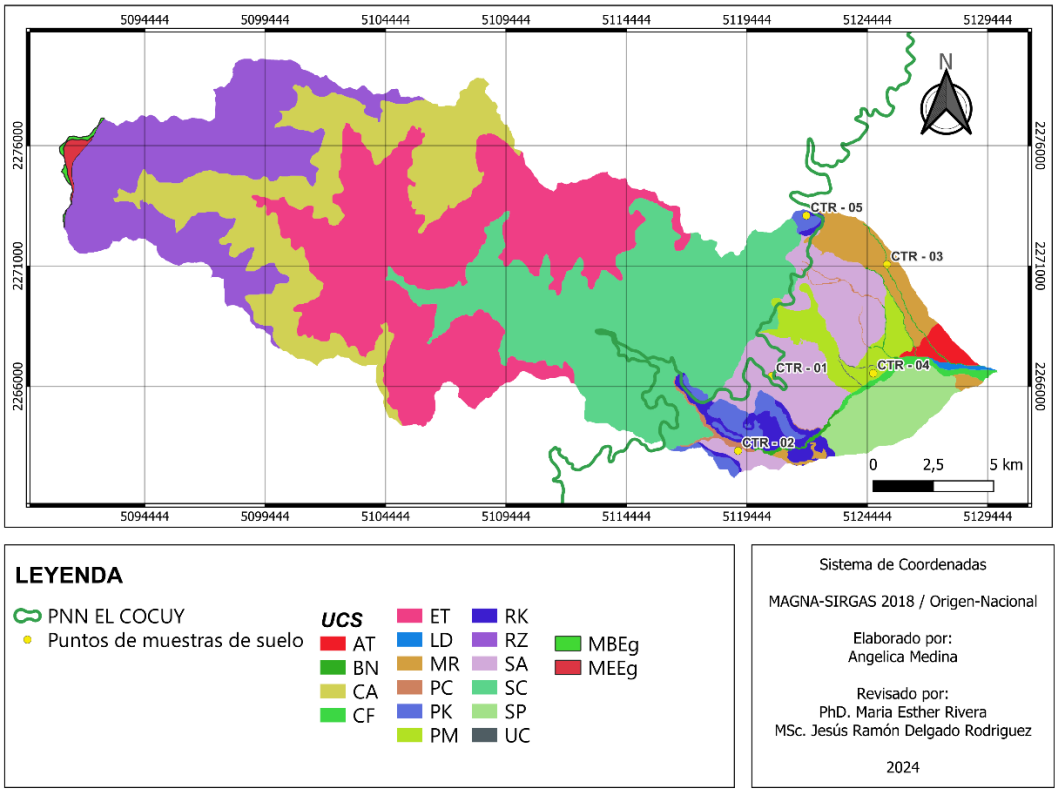
Además, se han descrito siete fallas que cubre la cuenca de estudio, las fallas Casirvita, Guaicaramo, Tocoragua, Salitre, Tuneba, Uruguay y Mortinal (SGC, 2015).

Información de suelos y litología

De acuerdo con la Universidad de Los Llanos y La Gobernación de Arauca (2022) y IGAC (2004), se tienen 18 unidades de suelo, figura 12. Dentro de las cuales se identificaron 11 variedades de suelo (Ver tabla 9).

Figura 12

Suelos de la zona de estudio en el límite del PNN El Cocuy



Fuente: Modificado de Universidad de los Llanos y Gobernación de Arauca (2022) e IGAC (2004), elaborado en el software QGIS versión libre

Tabla 9

Litología de la cuenca en base al tipo de suelo

Nombre	Litología
SC	Areniscas cuarzosas con interestratificaciones delgadas de lodolitas, yeso y lutitas.
ET	Areniscas cuarzosas con interestratificaciones delgadas de lodolitas, yeso y lutitas.
CA	Areniscas cuarzosas con interestratificaciones delgadas de lodolitas, yeso y lutitas.

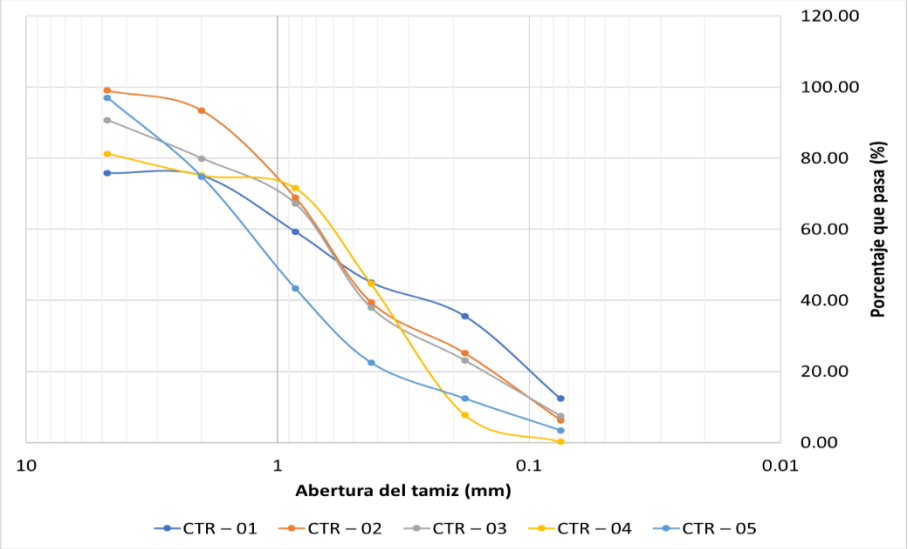
RZ	Areniscas cuarzosas con interestratificaciones delgadas de lodolitas, yeso y lutitas.
MEEg	Rocas sedimentarias clásticas mixtas y depósitos superficiales clásticos hidrogravigénicos
MBEg	Rocas sedimentarias clásticas arenosas con intercalaciones de limo arcillosas
UC	Depósitos aluviales constituidos por cantos redondeados en matriz franco arenosa.
PM	Depósitos coluvio aluviales heterométricos fluvioglaciares en matriz franco arenosa.
PK	Depósitos heterométricos de orígenes aluvio-torrencial constituidos por bloques y matriz de arena y limo envueltos en una matriz gravillo arenosa
CF	Depósitos aluviales, constituidos por acumulaciones de limo, arcilla y arena
MR	Depósitos coluvio aluviales heterométricos fluvioglaciares en matriz franco arenosa.
RK	Depósitos heterométricos de orígenes aluvio-torrencial constituidos por bloques y matriz de arena y limo envueltos en una matriz de arena, limo y arcilla
PC	Depósitos aluviales constituidos por cantos en matriz limo arenosa
BN	Depósitos aluviales constituidos por cantos redondeados en matriz franco arenosa.
SA	Depósitos conglomeráticos de origen aluviotorrencial, constituidos por bloques y matriz areno limosa.
LD	Depósitos aluviales, constituidos por acumulaciones de limo, arcilla y arena
AT	Depósitos aluviales constituidos por cantos redondeados gruesos y finos en matriz arenosa
SP	Depósitos coluvio aluviales heterométricos fluvioglaciares en matriz franco arenosa.

Fuente: Universidad de Los Llanos y Gobernación de Arauca (2022), IGAC (2004)

La información anterior se validó con los datos recopilados en campo sobre los tipos de suelo y la granulometría obtenida de muestras de suelo (Figura 13). En el análisis granulométrico se encontró que la mayor parte de los suelos corresponden a arenas, en las cuales se puede relacionar su proveniencia con los depósitos aluviales. Es de anotar, que en tres muestras (CTR 01, 02 y 05) se encontró una fracción fina en porcentajes menores que permiten describirlas como arenas arcillosas.

Figura 13

Curva granulométrica



Fuente: Medina (2024)

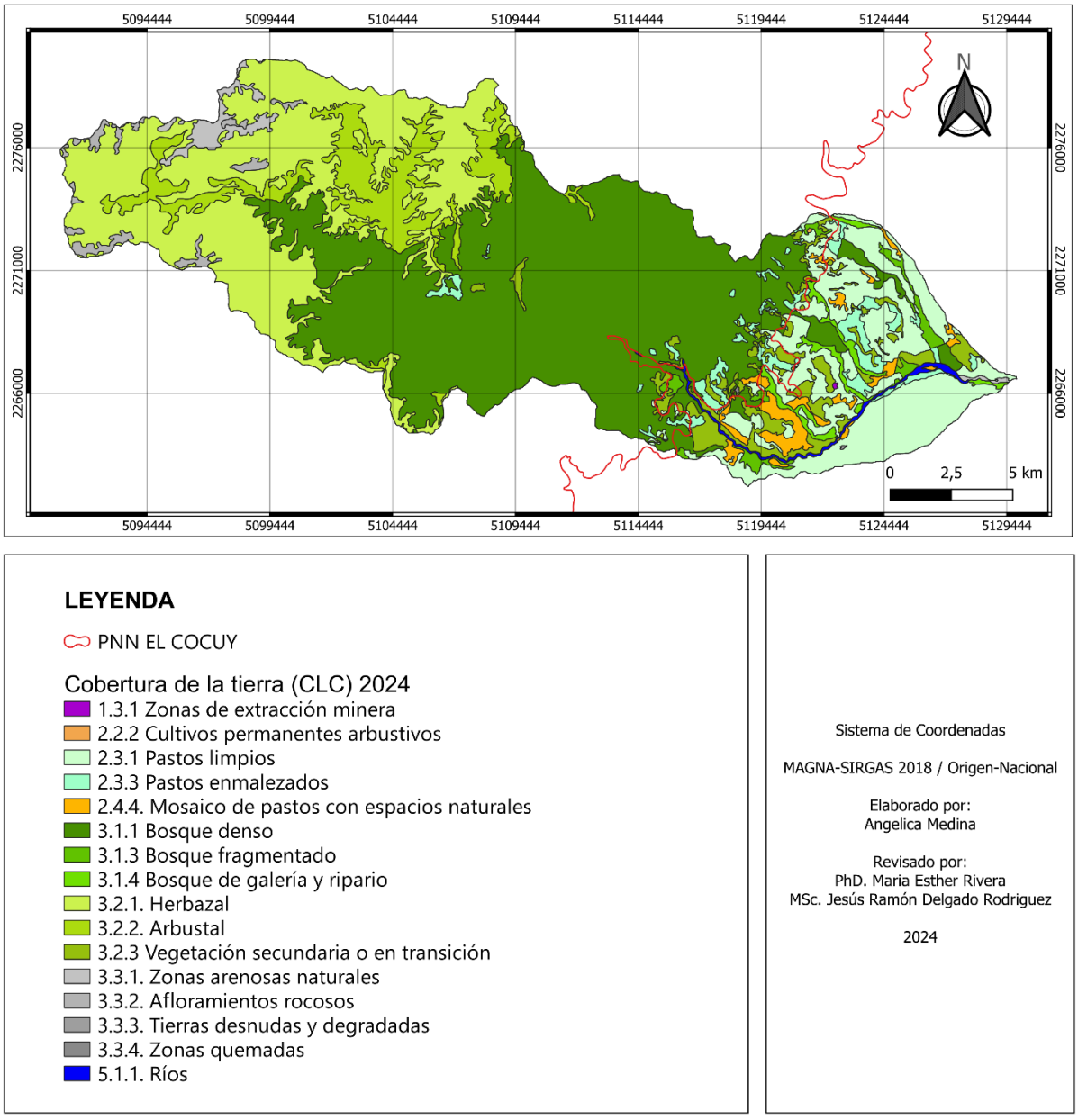
La textura de los suelos es una propiedad física que expresa la distribución de las partículas la cual se define mediante análisis granulométrico, esta propiedad influye de manera significativa en la capacidad de infiltración del agua, ya que está relacionada con la porosidad de los suelos. Los suelos con partículas finas presentan una menor capacidad de infiltración debido a su menor permeabilidad. Por ejemplo, las partículas de arcilla tienden a hincharse cuando se mojan, lo que reduce el tamaño de los poros, provocando una mayor escorrentía superficial durante lluvias intensas. En contraste, los suelos con partículas más gruesas tienden a retener más agua y generar menos escorrentía. Igualmente, los suelos con partículas finas son más susceptibles a la erosión, especialmente en áreas descubiertas y con alta pendiente, puesto que las gotas de lluvia pueden lavar las partículas finas (Pérez, 2024). Por otro lado, las arenas tienden a tener una permeabilidad rápida según la FAO (2006), aunque al combinarse con otras texturas como la arcillosa, la permeabilidad se reduce, por lo que, los suelos de la zona de estudio son variados en cuanto a la permeabilidad siendo susceptibles a la erosión aquellos suelos con partículas finas de arcilla.

Cobertura y uso del suelo

En la figura 14, se observa principalmente en la parte baja de la cuenca una cobertura del suelo transformada en su mayoría por la acción antrópica, tanto fuera como dentro del área protegida del PNN El Cocuy, asociada a pastos de pastoreo. Las coberturas y usos del suelo influyen en el comportamiento hídrico de la cuenca debido a su papel importante en el ciclo hidrológico, dado que, afecta la capacidad de retención y regulación hídrica, influyendo en la infiltración y la escorrentía. Las áreas con coberturas boscosas reducen el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo, disminuyendo la erosión y mejoran la infiltración a través de sus raíces, las cuales mantienen la porosidad del suelo.

Figura 14

Cobertura vegetal del PNN El Cocuy



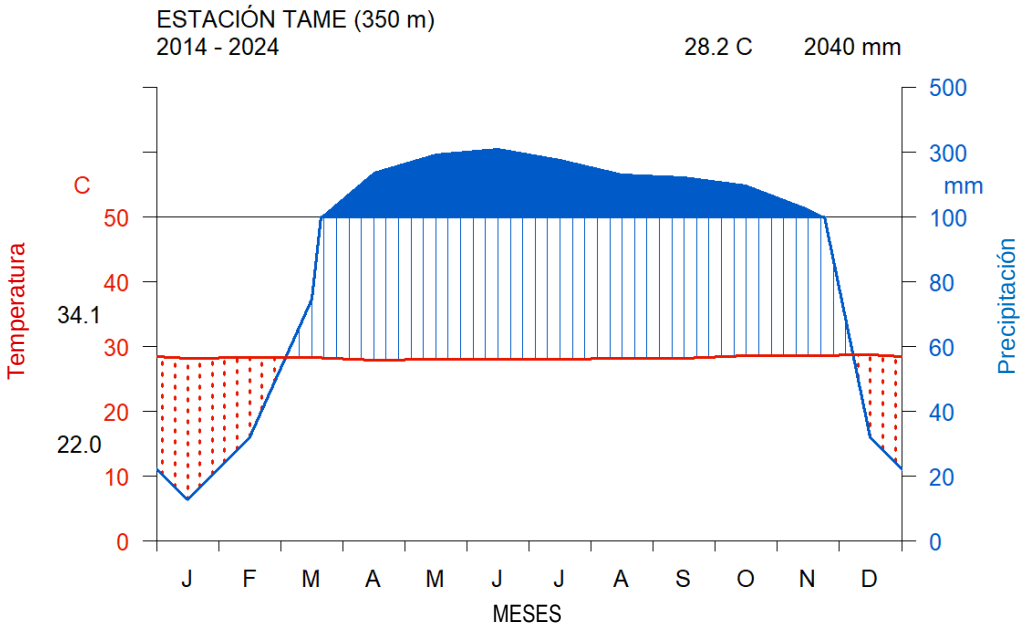
Fuente: Modificado de mapa de Coberturas – 2019 (2021) del PNN El Cocuy y Mapa de Cobertura de la Tierra -2018 , IDEAM (2021), elaborado en el software QGIS versión libre

Análisis de variables meteorológicas de precipitación y temperatura en relación al ENOS

Según el climograma generado (Ver figura 15) el comportamiento de la precipitación para la estación de TAME es monomodal, teniendo como estación seca o de bajas precipitaciones los meses de diciembre a febrero y lluviosas desde abril a octubre con excesos especialmente hacia mayo, junio y octubre, siendo junio el mes más lluvioso en promedio. También se observa que la temperatura media se encuentra entre 28.2°C y oscila entre los 22.0 y 34.1 °C, con un total anual de precipitación de 2040 mm y un máximo mensual de 311 mm en promedio de los últimos 10 años.

Figura 15

Climograma de la estación TAME



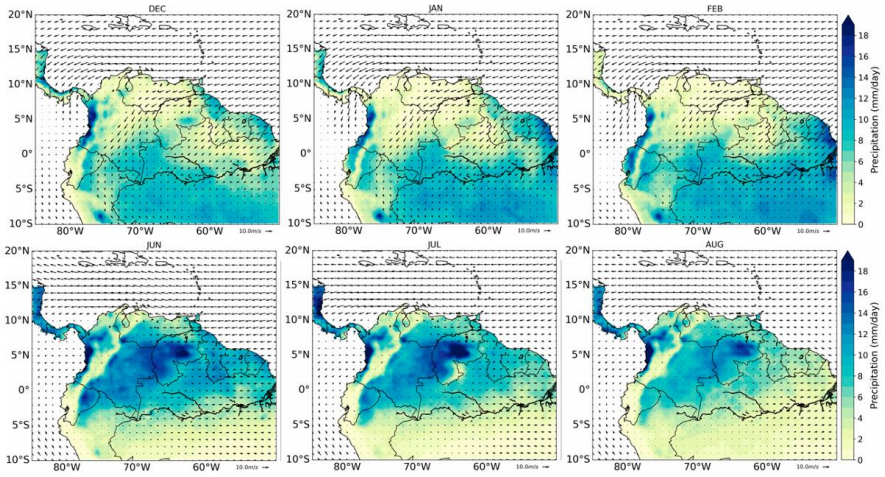
Nota: la zona azul oscuro representa los meses en los que se producen excesos y la zona puenteada roja representa los meses áridos o secos.

Fuente: Medina (2024)

Finalmente, de acuerdo con Poveda, Alvares y Rueda (2011) como se citó en Barrios (2015) el ciclo anual de la precipitación y temperatura en la Orinoquía se encuentra influenciado por el movimiento latitudinal de la Zona de Confluencia Inter Tropical (ZCIT)), la cual marca la convergencia entre los vientos alisios del noreste y sureste. Debido al flujo convergente, la ZCIT es la región de mayor nubosidad y lluvias. En esta zona se generan bajas presiones que favorecen la convección, por lo que se dan las condiciones óptimas para la formación de nubes y lluvias. Además, esta es generalmente discontinua en los Andes, por lo que se divide en dos ramas, la del Pacifico occidental y la rama continental o del Atlántico ecuatorial (Guzman, Ruiz, & Cadena, 2014), este último influye en la temporada de lluvias de la Orinoquia entre los meses de junio a agosto. Por su parte, cuando la ZCIT migra al sur, los vientos alisios del noreste de Venezuela se intensifican, permitiendo que entren desde el noreste hasta el sureste de Venezuela crenado un patrón de circulación conocido como Corriente en Chorro de la Orinoquía (OLLJ por sus siglas en ingles) el cual contribuye a la disminución de las lluvias en los meses de diciembre a febrero (Florian-Vergara et al., 2021), como se muestra en la figura 16.

Figura 16

Datos de precipitación y vientos del periodo 1981 – 2019 de CHIRPS y ERA5



Nota: arriba cuando los vientos de la OLLJ son fuertes, abajo cuando son débiles, y la variación de las precipitaciones.

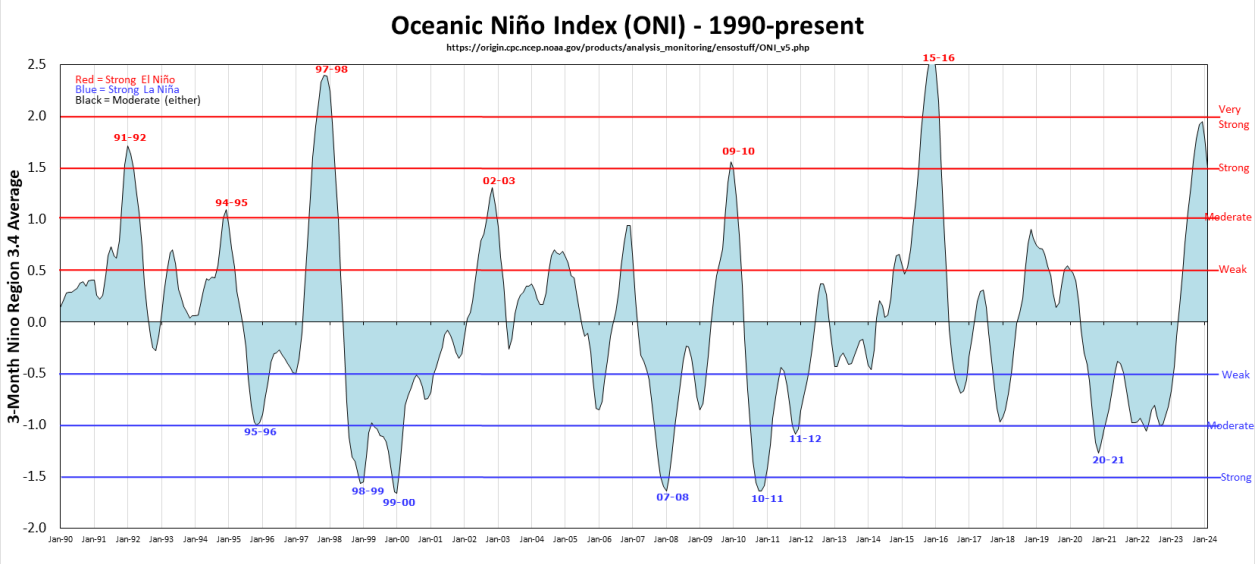
Fuente: Builes-Jaramillo et al., (2022)

En la temporada de lluvias, Barrios (2021) también destaca la llegada de masas de aire húmedas a la región, así como las bandas nubosas relacionadas con el paso de ondas del este y ciclones tropicales sobre el Atlántico. Asimismo, la formación de procesos orográficos convectivos hacia el piedemonte.

Respecto a los eventos presentados del ENOS, la figura 17 resume los eventos desde 1990 al presente de acuerdo al ONI con las líneas de intensidad presentados en el informe de Null (2024).

Figura 17

Intensidad de los eventos El Niño y La Niña



Fuente: Null (2024) en Golden Gate Weather Services

De lo anterior, se encontraron 14 eventos de la niña para el periodo analizado (1994 – 2024), igualmente 10 eventos del niño, en la tabla 10 se registra la intensidad del evento y su duración.

Tabla 10

Intensidad y duración de los eventos de fenómeno de La niña y El niño de acuerdo al ONI.

Evento	Intensidad	Duración
Niña	Moderado	1995-1996; 2011-2012; **2020-2021; 2021-2022**
	Fuerte	1998-1999; 1999-2000; 2007-2008; 2010-2011
	Débil	2000-2001; 2005-2006; 2008-2009; **2016; 2017-2018; 2022-2023**
Niño	Moderado	1994-1995; 2002-2003; 2009-2010
	Muy fuerte	1997-1998; **2015-2016;**
	Fuerte	**2023-2024**
	Débil	2004-2005; 2006-2007; **2014-2015; 2018-2019**

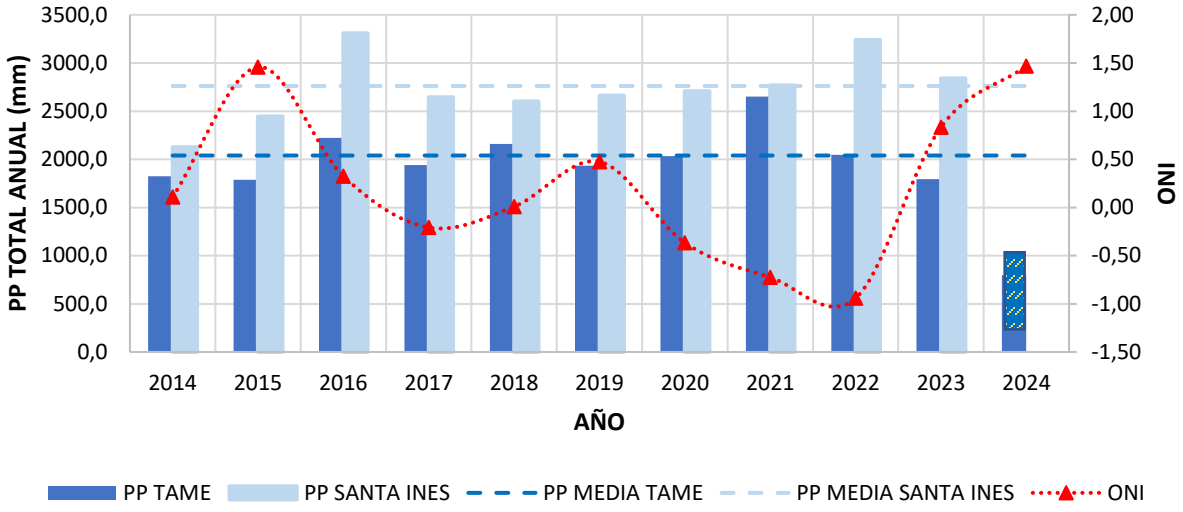
Nota: los eventos en negrilla son los presentados en los últimos 10 años (2014 -2015)

Fuente: Adaptado de la NOAA (2024) y Null (2024) por Medina (2024)

Reduciendo los eventos a los ultimos 10 años, se presentaron 5 Niñas y 4 Niños. En la figura 18, se observa una comparación de los totales de precipitación de cada año durante los últimos 10 años para las estaciones Tame y Santa Inés, junto a los valores promedios del ONI para cada año. Para el año 2024, la estacion Tame es la unica que cuenta con estos registros, donde se observa el total de precipitacion hasta el mes de junio.

Figura 18

Precipitación total anual vs ONI para la zona de estudio



Fuente: Medina (2024)

Para la estación Tame, hacia el año 2014 y 2015 se presentaron precipitaciones por debajo de la media, con el 2015 como el año con menor pluviosidad de la serie con una reducción de 13% respecto a la media, esto se puede relacionar a la presencia de El Niño en esos años. Hacía el año 2016, se observó un aumento, el cual corresponder con la finalización de El Niño muy fuerte que preexistió desde el 2015 y la ocurrencia de una Niña débil que finalizó en diciembre de 2016. Aunque continuamente se presentó otra Niña a finales de 2017 y principios de 2018, el aumento de la precipitación se registró en el año 2018. Posteriormente, en el año 2019 se observa una disminución leve respecto a la media anual con la presencia de El Niño débil de 2018 – 2019. Después, para el año 2021 se observa un aumento significativo de un 28% en el promedio de precipitación, en el cual se presentó con la finalización de la Niña (2020 – 2021) y el retorno (2021 – 2022) ambas con una intensidad moderada. Aunque hacia el 2022 persistió la Niña, no representó un cambio significativo en ese año. Finalmente, en el inicio de El Niño en 2023 de intensidad fuerte, se observó una disminución similar a la de 2015.

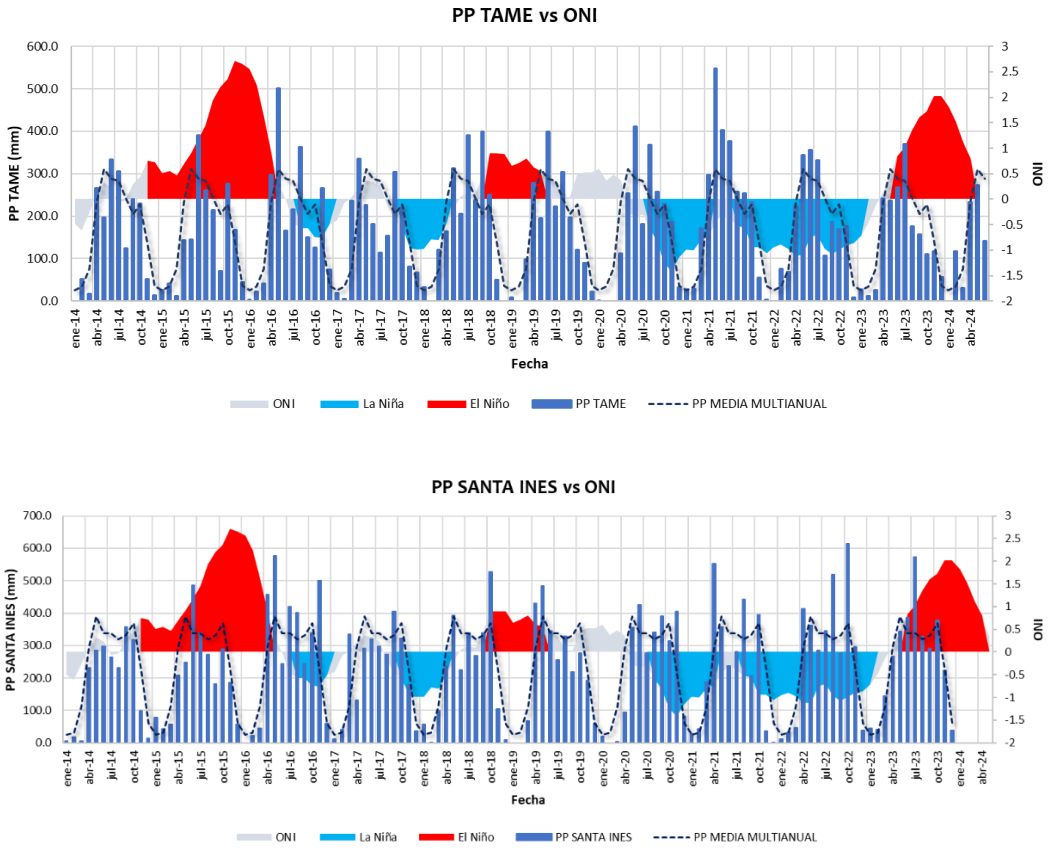
Por su parte, para la estación Santa Inés, se observa un comportamiento similar al descrito anteriormente, con una disminución durante El Niño de 2014 y 2015 de 24% y 12% respectivamente, y un aumento significativo en 2016 del 18%. Sin embargo, la Niña de 2020 – 2021 no tuvo un gran efecto, pero sí se presentó un aumento significativo hacia la Niña del 2022 con un 15%.

A nivel mensual, la precipitación en comparación con el ONI revela varias tendencias importantes que se observan en la figura 19. Durante el fenómeno de El Niño de 2014 a 2016, la estación de Tame experimentó bajas precipitaciones en los últimos meses del 2014 y durante el 2015, con 8 meses por debajo de la media para este último año. Sin embargo, se observaron altas precipitaciones en junio y octubre, lo cual se puede deber a otros factores productores de lluvia como la ZCIT. Aunque el año 2016 tuvo una gran cantidad de lluvias, estas se concentraron en mayo y agosto, mientras que los demás meses quedaron por debajo de la media. Durante El Niño de 2018 y 2019, se registraron precipitaciones por debajo de la media entre noviembre y febrero. Por otro lado, durante la presencia de La Niña en 2021, se observaron aumentos significativos en la mayoría de los meses, indicando un año bastante lluvioso, con la mayor cantidad de precipitaciones en mayo (548 mm). Finalmente, durante El Niño de 2023 – 2024, se presentaron valores de precipitación por debajo de la media desde agosto del 2023, con incrementos en diciembre y febrero, sin embargo, hacia mayo y sobre todo en junio, se encontró bajo la media.

En la estación de Santa Inés, para el año 2015 la mayoría de meses presentan precipitaciones por debajo de la media. Sin embargo, en 2016, la distribución de la precipitación se extiende a más meses, siendo mayo el mes con la mayor cantidad de lluvia, alcanzando 577.7 mm. Durante el fenómeno del niño de 2018 y 2019, las precipitaciones son bajas desde noviembre hasta marzo. En cambio, durante los años de la niña, 2021 y 2022, se observaron aumentos en algunos meses, como abril, agosto y octubre con un máximo de 614 mm.

Figura 19

Precipitación total mensual vs ONI para la zona de estudio



Fuente: Medina (2024)

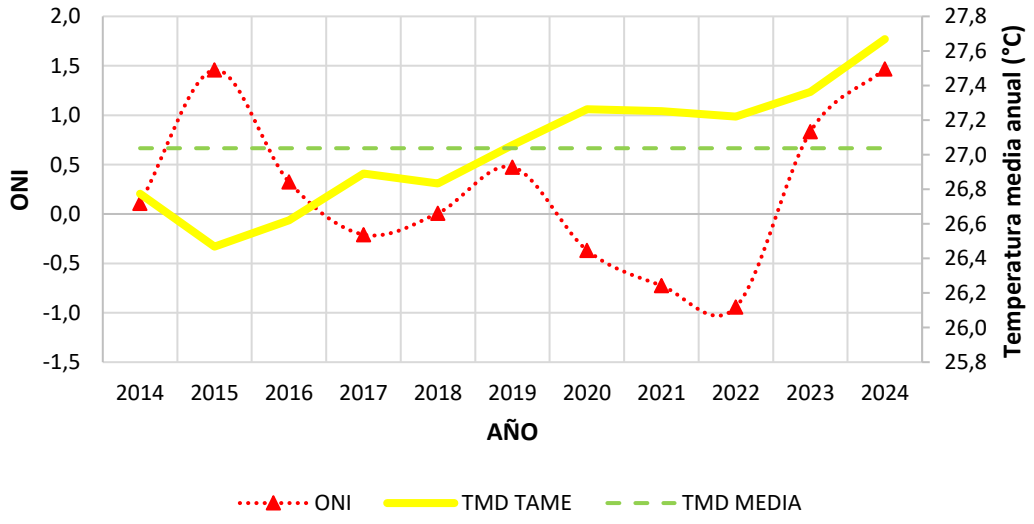
Las precipitaciones bajas durante la temporada seca tienden a disminuir aún más con el fenómeno de El Niño, mientras que aumentan ligeramente con La Niña. Estas variaciones en las precipitaciones durante la temporada seca tienen implicaciones significativas en la gestión de recursos hídricos. Sin embargo, durante El Niño, como en junio de 2015, o abril y mayo de 2016, se pueden presentar altas precipitaciones en algunos meses. De acuerdo con Gil Zapata, et al. (1998), se debe considerar además la advección de humedad desde la amazonia hasta la región Orinoquia, debido al debilitamiento de los alisios del oeste que ingresan desde el pacífico, por lo que pueden presentarse excesos en la temporada de El Niño.

Con lo anterior, se puede inferir que el ONI o los eventos del ENOS podrían influir sobre las precipitaciones en la zona de estudio, sin embargo, la amplitud de la afectación no es similar entre las estaciones, lo cual puede deberse a la ubicación geográfica de las mismas u otros condicionantes de la precipitación.

En cuanto a la temperatura anual promedio registrada, en la figura 20 se observa que en el año 2015 se encuentra por debajo de la media y presenta un aumento hacia el 2016 y 2017, sin embargo, no supera la media. Posteriormente, existió una leve disminución en 2018, seguida de un aumento hacia el 2020. La temperatura vuelve a disminuir en 2021 y 2022, y aumenta nuevamente hacia el 2023 y en lo que va del 2024. Este comportamiento puede estar influenciado también por el ENOS, por tanto, con el Niño la temperatura tiende a aumentar y a disminuir levemente con La Niña. Además, se observa una tendencia al aumento de la temperatura, la cual se puede relacionar al cambio climático u otros factores como los cambios de cobertura y usos de suelo en la región, puesto que, la temperatura varia muy levemente con estos fenómenos de variabilidad climática.

Figura 20

Temperatura media anual vs ONI para la zona de estudio

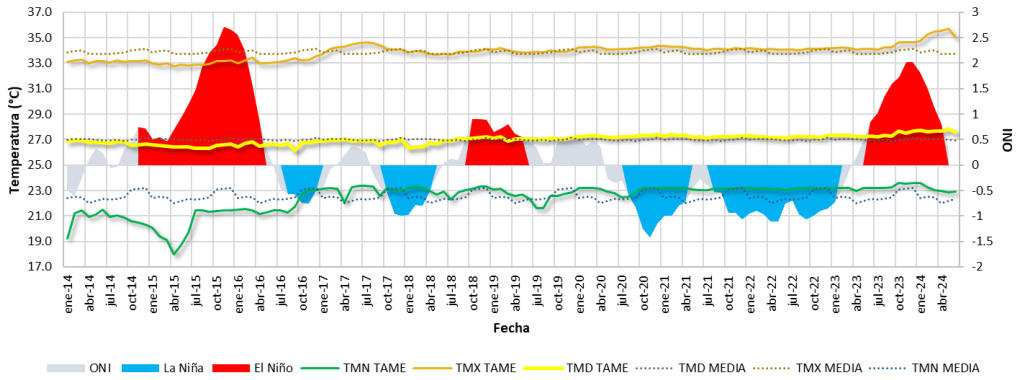


Fuente: Medina (2024)

Respecto a la temperatura mensual, en la figura 21, se observa las variaciones de la temperatura media, la media máxima y media mínima, en relación al ONI. El cambio más notorio se observa un hacia el 2024 para este último fenómeno de El Niño. La temperatura media mensual aumentó hasta 0.8°C en mayo respecto a la media del mes de 27°C, y la temperatura máxima con un aumento máximo de 1.8°C en mayo respecto a la media de 33.9°C. Por su parte, para el año 2015 principalmente, se observan las temperaturas mínimas promedio mensuales más bajas.

Figura 21

Temperatura media, máxima media y mínima media mensual vs ONI para la zona de estudio



Fuente: Medina (2024)

De acuerdo con el ANLA (2022), estos fenómenos junto al cambio climático afectan los patrones climáticos de la zona, con aumentos de temperatura, sequias, seguidas de lluvias extremas lo que contribuye al arrastre de sedimentos y deterioro de la calidad del agua.

Con referencia a la distribución de estas variables climáticas, la figura 22 presenta los histogramas y diagramas de cajas para las variables de precipitación total mensual y temperatura media mensual de la estación TAME, se muestra que la distribución gaussiana de la precipitación tiende a ser asimétrica positiva donde más del 50 % de los datos se ubican en los valores bajos de los primeros 3 intervalos de clase entre 0 y 200 mm, las observaciones por encima de los 338 mm son menos frecuentes, y de acuerdo con el climograma estos representan los picos de excesos de la temporada lluviosa. Igualmente sucede con la precipitación de la estación de SANTA INES, sin embargo, aunque se encuentra sesgada hacia la derecha, aproximadamente el 50% de los datos se

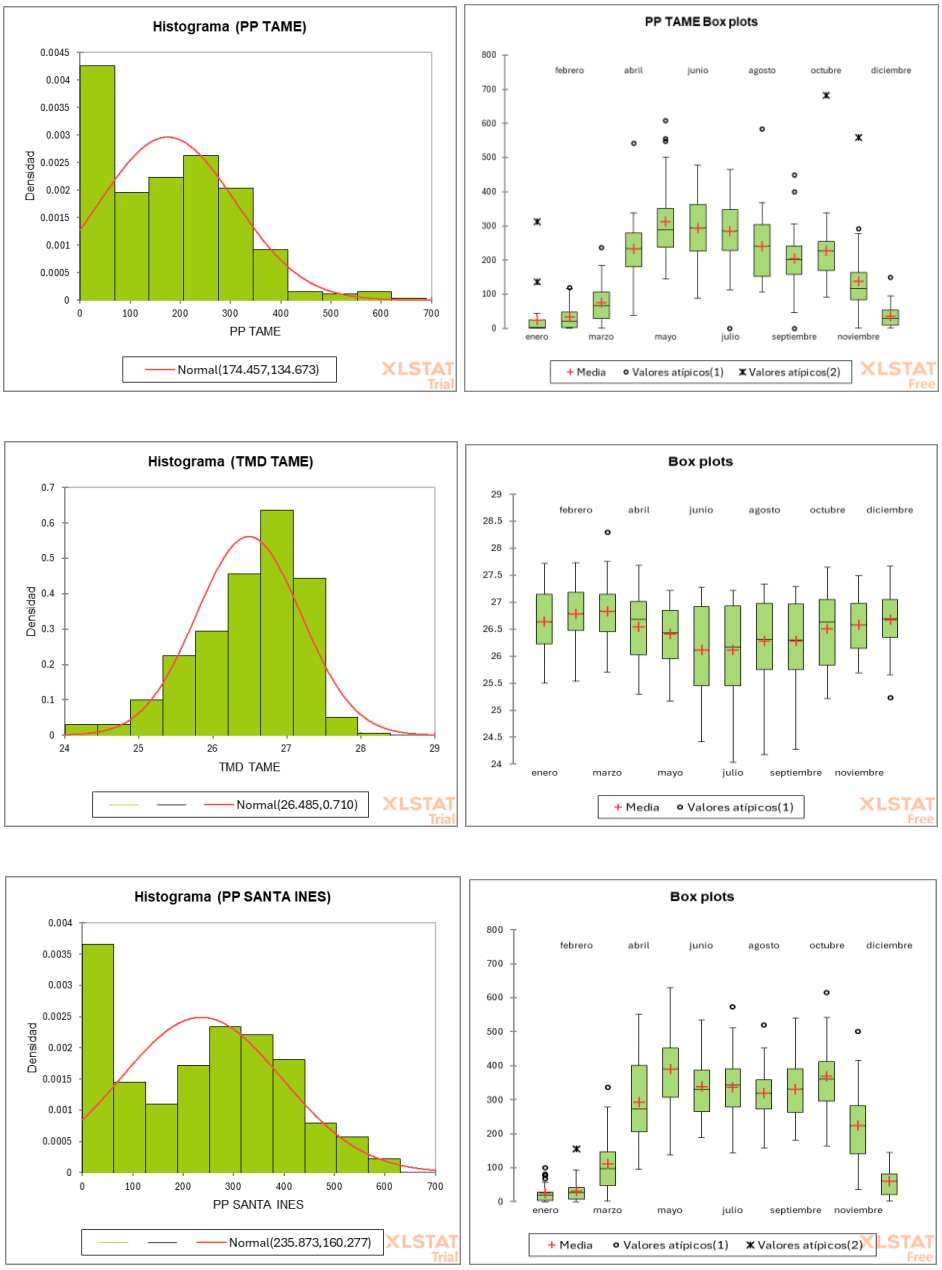
encuentran entre los 200 y 400 mm por lo que en esta estación se presentan más cantidades de lluvia que en la estación de TAME. La temperatura por su parte se observa que una distribución más simétrica alrededor de los 27°C.

En cuanto a los diagramas de cajas, se observa el mismo comportamiento monomodal en la precipitación de la estación TAME con una leve disminución hacia el mes de julio y agosto, con valores atípicos entre abril, mayo y septiembre por encima de la media, correspondiente a los excesos de precipitación que se presentan alrededor de esos meses, igualmente, para la estación SANTA INES se observa un patrón similar con un aumento más marcado de precipitaciones hacia el mes de octubre.

Además, para el mes de enero de la estación TAME, se muestran valores atípicos por encima de 100 mm hasta 300 mm, estos valores se dieron en el mes de enero del año 2005 el cual tiene una media mensual de 25 mm por lo que soy registros muy altos para ese mes, lo cual podría considerarse un error en el registro, sin embargo, los registros de los meses anteriores igualmente se presentaron excesos de lluvia, lo cual podría deberse a la temporada de ciclones tropicales u otro evento acontecido durante ese periodo de tiempo.

Figura 22

Histograma y diagrama de cajas y bigotes de la precipitación y temperatura media

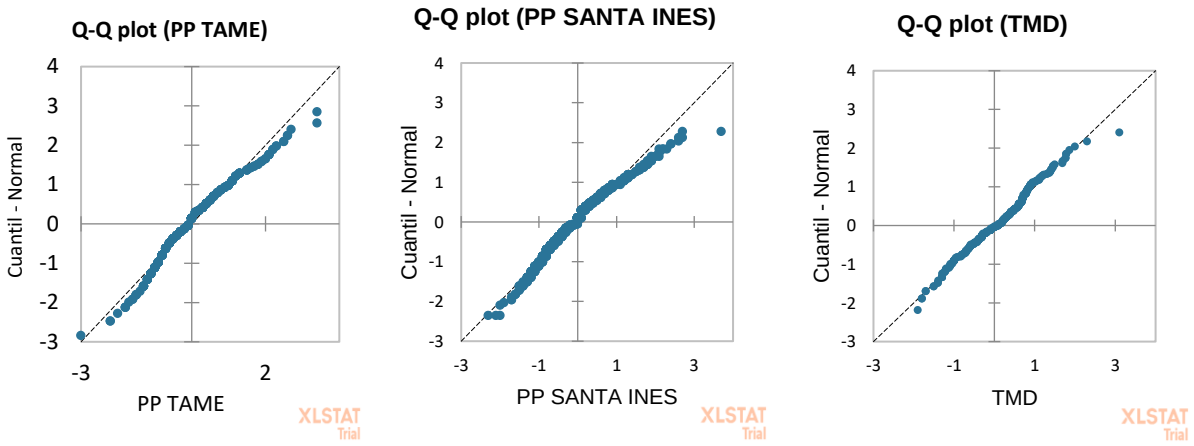


Fuente: Medina (2024)

Esto también se observa en el grafico qqplot para precipitación, como se muestra en la figura 23, presentan datos que se alejan de la media representando anomalías en algunos datos, por lo que su distribución no es normal. Por el contrario, para temperatura pocos datos se alejan de la línea media.

Figura 23

Q - Q plot de las series de precipitación y temperatura de la zona de estudio

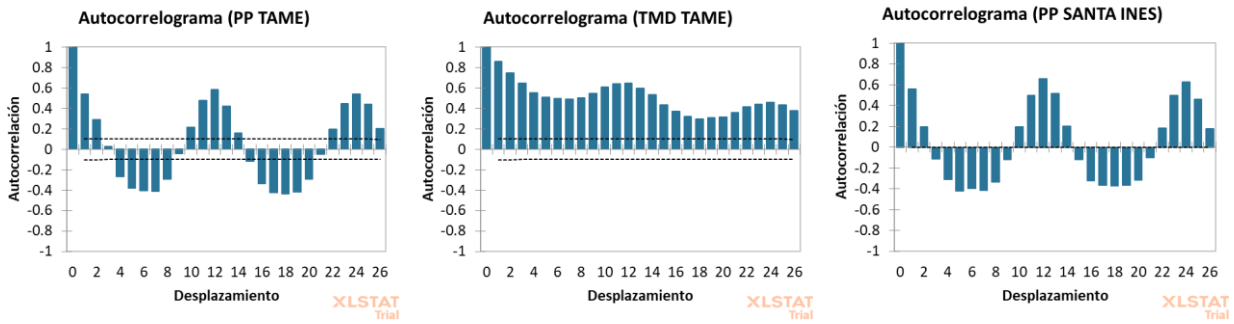


Fuente: Medina (2024)

La variabilidad estacional también se evidencia en el gráfico de autocorrelación de las variables de temperatura y precipitación (Ver figura 24), el correlograma de las series de precipitación presentan un patrón cíclico anual que se presenta cada 12 lags o meses con valores de correlación positivos más altos y significativos por lo cual no son estacionarias. En cuanto a temperatura media, presenta el mismo patrón cíclico anual y además describe una tendencia.

Figura 24

Correlogramas de la estación TAME y SANTA INES

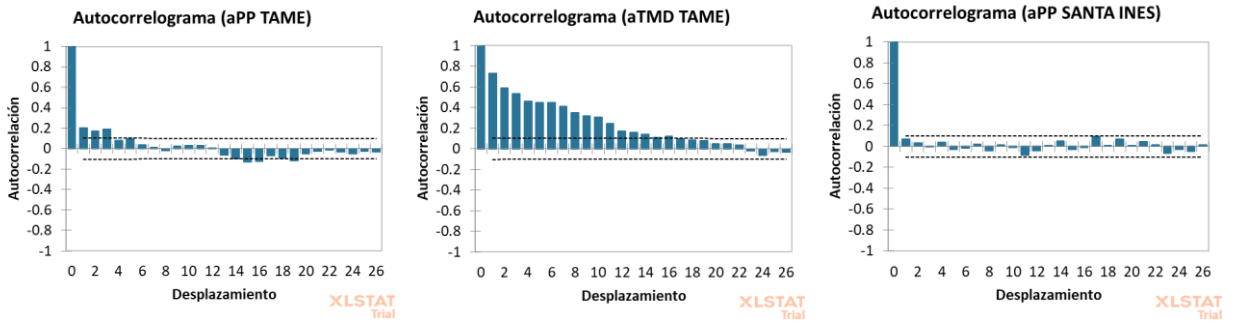


Fuente: Medina (2024)

El calculo de las anomalias permitio obtener la estacionariedad de las series al eliminar la estacionalidad anual como se observa en la figura 25, donde los coeficiente de correlacion son significativos en pocos lags, sin embargo, la temperatura sigue presentando una tendencia por lo que apoyandose de los resultados de pruebas matematicas (Ver tabla 11), la prueba ADF y PP rechazan la hipotesis nula por lo que son estacionarias y la prueba KPSS acepta la hipotesis nula confirmanto la estacionariedad. Por lo anterior, se usaron estas series de anomalias para determinar los coeficientes de correlacion de pearson y cruzada entre las variables.

Figura 25

Correlogramas de la estación TAME y SANTA INES



Fuente: Medina (2024)

Tabla 11

Pruebas matemáticas de estacionariedad

Variable	Dickey-Fuller	Phillips-Perron	KPSS
aPP TAME	<0.0001	<0.0001	0.657
aPP SANTA INES	<0.0001	<0.0001	0.544
aTMD TAME	0.048	<0.0001	0.536
REGION 3	0.000	0.002	0.592
ONI	0.001	0.010	0.954

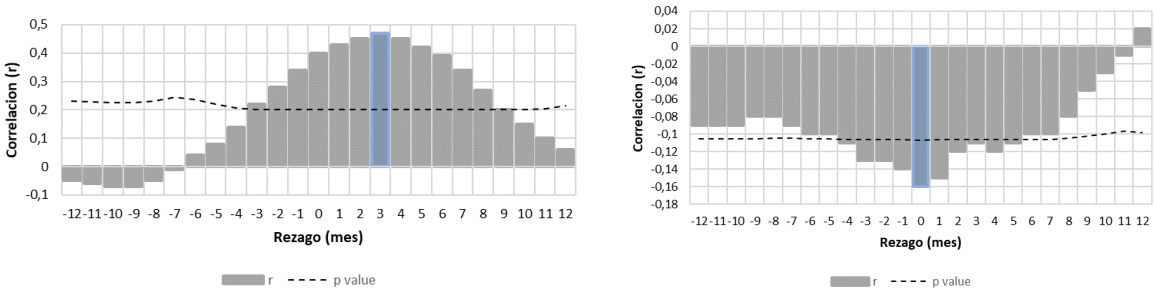
Nota: el valor representa el p-value, con un nivel de significancia de 0.05, por lo que, si este valor es menor, rechaza la hipótesis nula de las dos primeras pruebas, y si es mayor, acepta la hipótesis nula en la tercera prueba.

Fuente: Medina (2024)

En cuanto a los resultados de la correlación cruzada, se obtuvieron correlogramas como los presentados en la figura 26, donde la línea punteada negra indica el nivel de significancia del 5%. Se observa que la correlación del ONI con la temperatura media y la precipitación de la estación TAME, con valores de correlación significativos en varios lags.

Figura 26

Correlogramas de correlación cruzada



a) b)

Nota: a) correlacion cruzada de aTMD y ONI; b) correlacion cruzada de aPP TAME y ONI

Fuente: Medina (2024)

La tabla 12 muestra los valores más altos significativos obtenidos en la correlación cruzada. La mayor relación se da entre los valores del ONI y la aTMS de la Region 3 con los valores de anomalías de temperatura en un lag entre 3, la cual es moderada positiva con un máximo de r = 0.47 , mientras que con la precipitación es baja negativa con un valor de r = - 0.20.

Tabla 12

Valores de la correlación cruzada entre variables explicativas y de respuesta

	aPP TAME		aPP SANTA INES		aTMD TAME	
	CC	lag	CC	lag	CC	lag
REGION 3	-0.17	0	-0.18	-2	0.45	3
ONI	- 0.16	0	-0.20	-1	0.47	3

Fuente: Medina (2024)

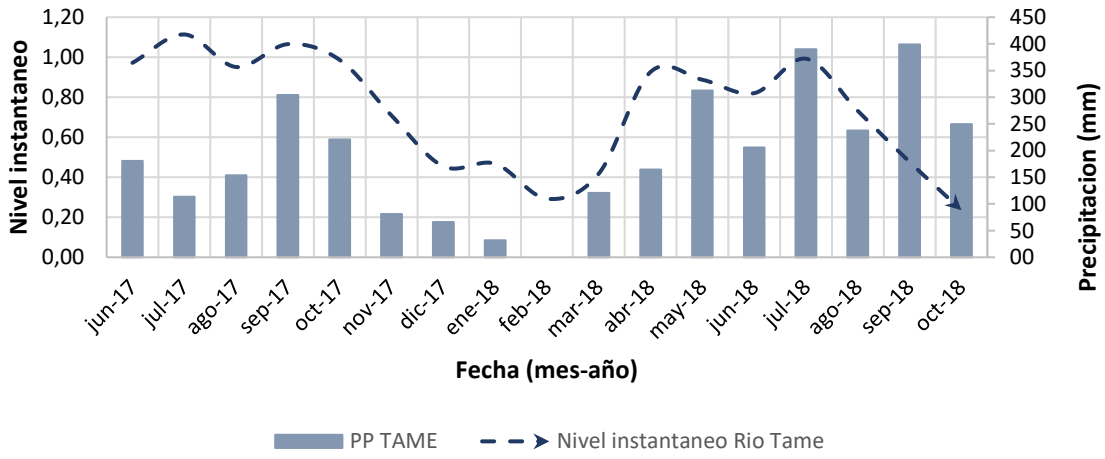
A conclusión de la anterior, se puede decir que la precipitación y temperatura de la zona de estudio están influenciadas por las variaciones de la temperatura superficial del mar, sin embargo, esta relación no es alta, por lo que se deben considerar otros factores climáticos, como

la variabilidad climática estacional influenciada por ZCIT o el debilitamiento de los vientos alisios o la actividad ciclónica del atlántico, también se puede considerar el calentamiento global, la perdida de cobertura u otro factor que pueda afectar estas variables que deberían tenerse en cuenta en estudios posteriores.

Por otra parte, estas variables se relacionan con los niveles del Rio Tame registrados en la estación hidrométrica. La precipitación al aumentar como se observa en la figura 27, incrementa los niveles de agua debido a la escorrentía generada principalmente, por lo que, las precipitaciones influyen significativamente en los niveles del rio.

Figura 27

Nivel instantáneo del Rio Tame y PP TAME



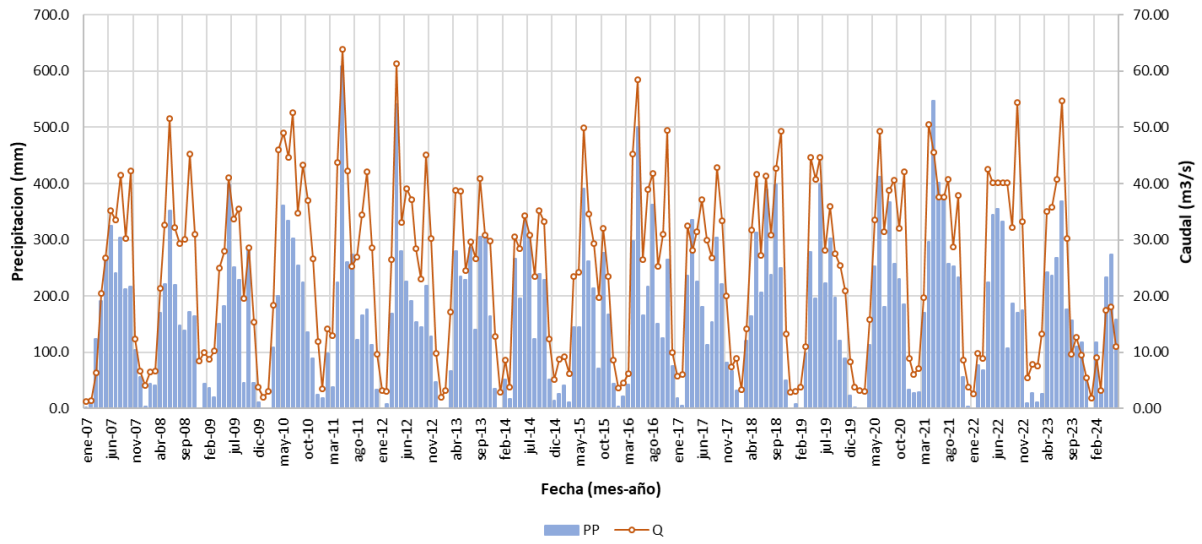
Fuente: Medina (2024)

No obstante, para determinar esta relación matemáticamente, se correlacionaron los datos de caudal obtenidos en HEC – HMS con las variables de precipitación y temperatura. Se obtuvo un r = 0.88 con precipitación y r = -0.35 con la temperatura. Como se observa en la figura 28, en una escala temporal más amplia, existe una alta relación entre la precipitación y los caudales, esto implica que la precipitación influye directamente en el régimen de caudales, si estas se ven afectadas por fenómenos como El Niño, podría traer consecuencias significativas a la

disponibilidad hídrica del rio o sus tributarios. Por otro lado, las precipitaciones extremas podrían incrementar la ocurrencia de crecientes.

Figura 28

Caudales calculados vs Precipitación

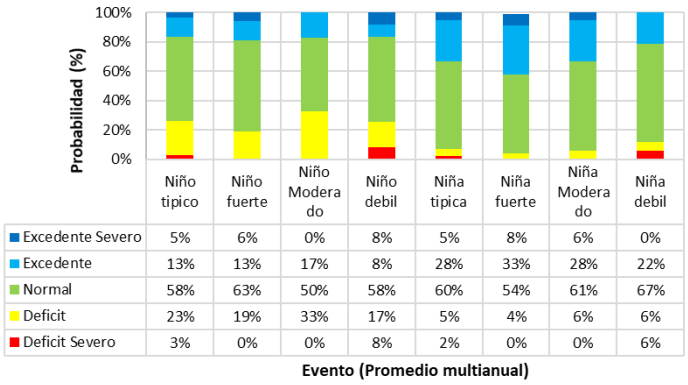


Fuente: Medina (2024)

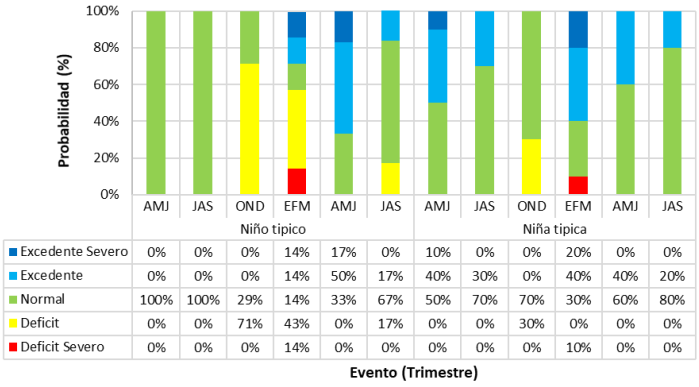
Finalmente, las probabilidades de afectación del ONI sobre la precipitación promedio de la cuenca, indican que prevalecen las condiciones normales para todos los eventos en promedio. Ahora bien, el análisis trimestral es mucho más claro de la posible afectación de un evento típico, en el trimestre OND hay un 71% de probabilidad de déficit y en el trimestre EFM con 43% de déficit y 14% de déficit. Por otro lado, la probabilidad de afectación de la Niña se da hacia el trimestre EFM con 40% de excedente y 20% de excedente severo. Destacando que estos trimestres están relacionados a la época de seca de la zona de estudio. A nivel de temporada, se encontró el mismo comportamiento en la temporada seca, con déficit en el niño y excesos en la niña. Sin embargo, se presencian bajas probabilidad de ocurrir lo contrario a lo esperado en cada evento. Estos resultados se asocian a otros análisis realizados para la región oniquina donde indican que durante el niño o la niña se pueden presentar comportamientos diferentes a lo normal, lo cual puede estar influenciado por el debilitamiento de los vientos alisios o la oscilación de Madden y Julián o la misma ZCIT u otros factores que se puedan considerar. (Ver figura 29).

Figura 29

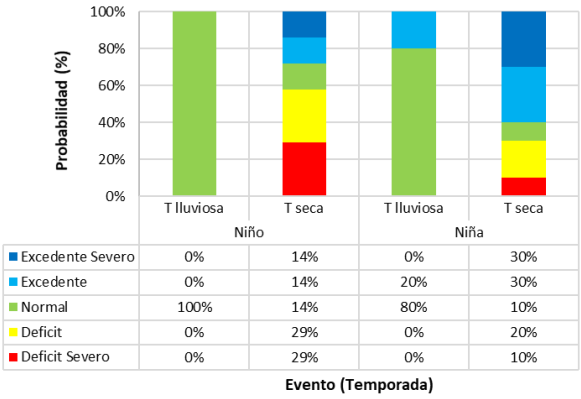
Probabilidad de afectación de El Niño y La Niña sobre la precipitación media de la cuenca



a)



b)



c)

Nota: a) probabilidad de afectación para un evento típico, débil, moderado y fuerte; b) probabilidad de afectación para un evento típico a nivel trimestral del primer y segundo año; c) probabilidad de afectación por temporada seca y lluviosa

Fuente: Medina (2024)

De los anterior se obtiene que estos fenómenos inciden principalmente en la temporada seca por lo cual, durante el niño, esta ausencia de precipitaciones y aumento de temperatura se ven intensificados, debido a esto la época en la que se puede ver afectada de manera significativa la oferta hídrica de la región, y sumado a esto, los periodos de lluvias intensas incrementan la probabilidad de ocurrencia de crecientes. Así mismo, durante la niña pueden existir aumentos en la precipitación en los meses naturalmente secos.

Evaluación del estado ambiental de la cuenca respecto a las presiones antropogénicas

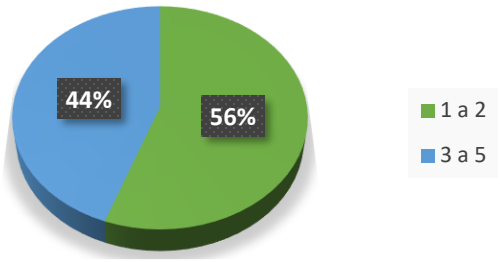
La evaluación del estado ambiental de la cuenca del río Tame ha revelado datos significativos acerca de las presiones antropogénicas que afectan su ecosistema y como estas afectan los procesos hídricos de la cuenca.

En las visitas a campo se logró reconocer que, dentro del área protegida, sobre la cuenca del río Tame, se encuentran asentamientos humanos de campesinos y comunidades indígenas (U'wa) los cuales están llevando a cabo actividades productivas como ganadería y agricultura, lo que deriva en conflictos de uso, ocupación y tenencia de la tierra.

A partir de lo anterior, se diseñó y aplico una encuesta para conocer las interacciones de las personas con la cuenca, con la cual se obtuvo una caracterización inicial de la población (Figura 30), en la cual el 56% de las viviendas encuestadas tienen entre 1 a 2 habitantes, y el restante entre 3 a 5 por lo que la población por vivienda no es muy alta.

Figura 30

Porcentaje de habitantes por vivienda en la zona de estudio

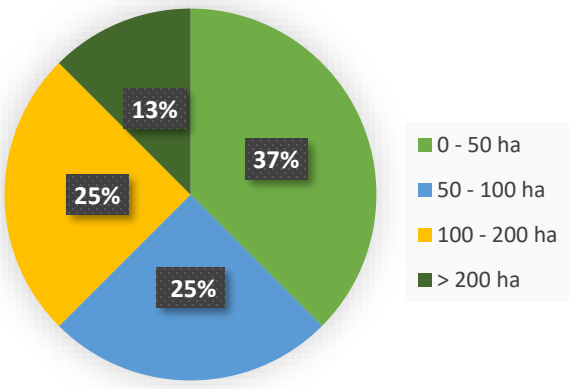


Fuente: Medina (2024)

La distribución de terrenos muestra una marcada desigualdad y de acuerdo con la figura 31, solo el 13% de la población posee áreas mayores a 200 hectáreas, el 50% cuenta con terrenos que varían entre 50 y 200 hectáreas. Por otro lado, el 37% restante dispone únicamente de áreas de 50 hectáreas o menos, lo que acentúa la notable disparidad en la distribución de la tierra entre los habitantes sobre la cuenca. Cabe destacar que gran proporción de estas hectáreas se encuentran dentro del área protegida y uno de los predios encuestados tiene el 75% de su área destinada a la conservación.

Figura 31

Distribución porcentual del área de los predios en la zona de estudio

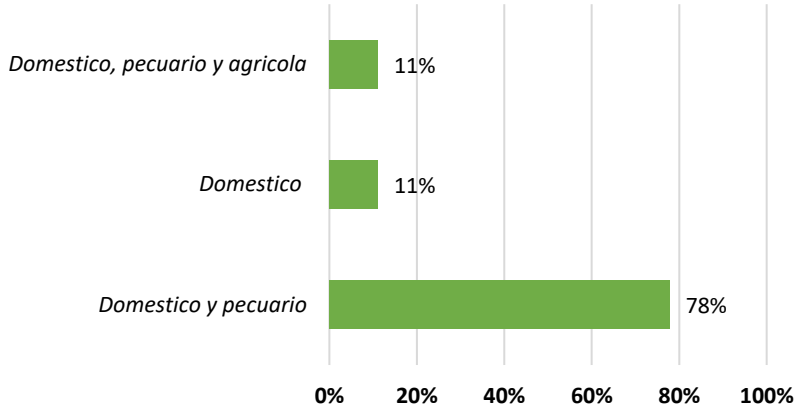


Fuente: Medina (2024)

El recurso hídrico en estos predios se utiliza principalmente para actividades domésticas y pecuarias, como se muestra en la figura 32. También, se destaca que solo un bajo porcentaje (11%) se destina exclusivamente a actividades domésticas, por lo cual, no todas las viviendas o habitantes de la zona de estudio demandan la misma cantidad de agua para el desarrollo de sus actividades. Por otro lado, otro 11%, incluye actividades agrícolas, principalmente cultivos de café los cuales se riegan por el agua lluvia u otros cultivos menores para consumo de la misma población como hortalizas o conuco.

Figura 32

Porcentaje de usos del recurso hídrico en las viviendas en la zona de estudio

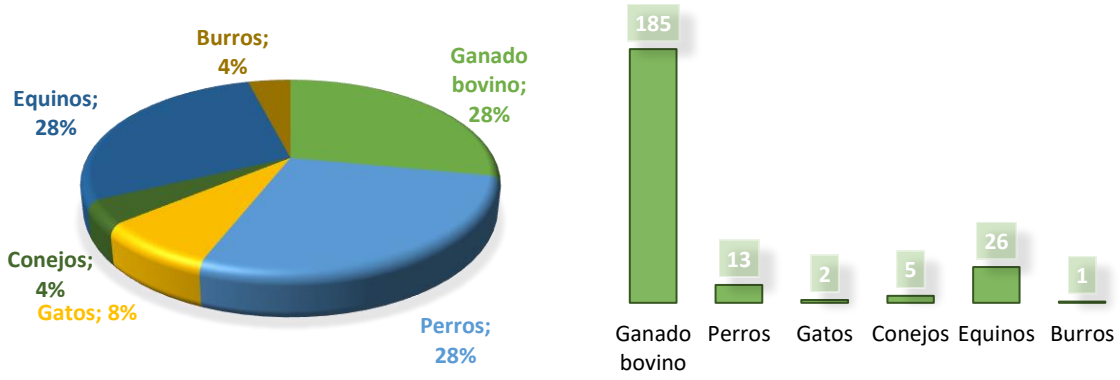


Fuente: Medina (2024)

También, se halló que la mayoría de las viviendas contaban principalmente con ganado bovino, equinos y perros principalmente, de esto, se contabilizo un total aproximado de 185 bovinos que se encuentran en el área protegida para los predios encuestados como se presenta en la figura 33.

Figura 33

Tipo y cantidad de animales en las viviendas en la zona de estudio

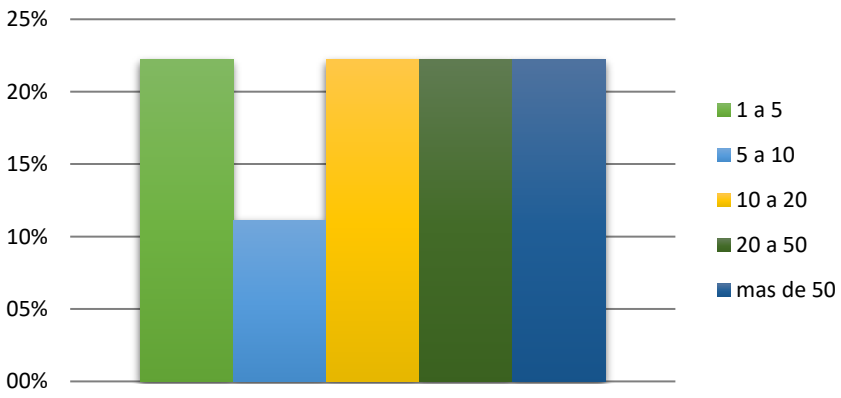


Fuente: Medina (2024)

Sin embargo, de acuerdo con la figura 34, no todas las viviendas cuentan con gran cantidad de animales pues la distribución no es igual por vivienda, algunos concentran más de 50 animales, mientras que, otros solo cuentan con uno o cinco. Por lo que no todas las personas que habitan sobre la cuenca, especialmente dentro del área protegida ejercen igual impacto sobre los recursos naturales del parque.

Figura 34

Cantidad de animales por predio en la zona de estudio



Fuente: Medina (2024)

De lo anterior, se evidencia que la actividad pecuaria principal es la ganadería, donde emplean un sistema extensivo tradicional, esta se destaca por una cobertura de pastizales, como se observa en la figura 35, que contribuye a la transformación de los bosques. Esta pérdida de cobertura afecta la regulación y retención hídrica de la cuenca, cuando se presentan lluvias intensas, los bosques retienen esta agua la cual luego se infiltra en el subsuelo regresando a la superficie tiempo después por medio de los manantiales, así que, se afirma que las cuencas con su cobertura boscosa el caudal de los ríos es casi similar en invierno y verano, pues el caudal dependerá mayormente del agua infiltrada que de la escorrentía (Duque-Escobar, 2022). Por lo cual, la cobertura de pastos limpios disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía por ello durante eventos de lluvias intensas se presentan aumentos exponenciales en el caudal, igualmente, durante periodos de ausencias de lluvia debido a la poca infiltración se reduce la recarga de agua subterránea lo que dificulta el mantenimiento de los caudales.

Figura 35

Cobertura de pastos limpios relacionada a la ganadería en el PNN El Cocuy



a) b)



c) d)

Nota: Coberturas de pastos limpios observadas dentro del área protegida del PNN El Cocuy; a) y b) sobre la zona de caño innominado; c) pastos limpios sobre la zona de caño Puente; d) pastos limpios y suelo erosionado sobre caño sardina

Fuente: Medina (2024)

Esta actividad también afecta la aridez del suelo, debido a varios factores como la deforestación, la compactación del suelo frágil por el transito animal reduciendo el volumen de los espacios porosos, el sobrepastoreo, los incendios o quemas y otros cambios de cobertura para la expansión de potreros, que producen cambios estructurales, provocando detonantes erosivos (Sadeghian, 2009).

Sobre la cuenca del rio Tame, se evidenciaron los efectos de la erosión del suelo (Ver figura 36), donde se observan movimientos en masas y erosión rotacional, algunos propiciados por la escorrentía superficial, la humedad o la saturación del suelo. Además, la mayoría no emplea bebederos para el ganado, sino que hacen uso directamente de la fuente superficial lo que ocasiona la erosión y sedimentación de los cauces debido al pisoteo de los animales que degradan el terreno.

Figura 36

Suelo erosionado sobre la cuenca del Rio Tame



Nota: Las zonas resaltadas en rojo hacen referencia a la erosión rotacional o remociones en masa

Fuente: Medina (2024)

Esta actividad también puede afectar la calidad del agua, tanto por el aumento de los sedimentos como por los residuos de los animales; estiércol y la orina. Los cuales pueden contener altas concentraciones de sustancias químicas que pueden provocar la eutrofización de los cuerpos de agua cercanos, lo que resulta en un aumento de las algas y una disminución del oxígeno en el agua. Esta falta de oxígeno puede ser mortal para los organismos acuáticos. Además, las bacterias y los virus presentes en los desechos animales pueden ser peligrosos para la vida silvestre, especialmente para las especies que dependen del agua dulce para su supervivencia (Ramírez, 2023).

Según el análisis de calidad del agua para el 2023 proporcionado por el PNN El Cocuy y realizado por BIOPOLAB, determinaron el índice de calidad del agua, encontraron la mayoría de

fuentes del rio Tame se encuentran en estado aceptable sobre el límite de 0.71 y 0.73, con el valor más alto de 0.82 para la quebrada agua blanca y más bajo de 0.68 para la quebrada agua clara con una denominación regular. Sin embargo, es de considerar que estas muestras fueron tomadas a la en los puntos cercanos a la salida del parque por lo que aguas arriba la intervención humana no es muy considerable.

Otra presión identificada en la cuenca, es la tala de árboles que se puede dar tanto para expansión ganadera como para la comercialización de madera, esta se encontró en sobre el área de reserva forestal protectora de la cuenca del rio Tame como se muestra en la figura 37. La tala de aboles para estos fines, contribuye a la perdida de cobertura sobre la cuenca, lo cual representa un problema significativo debido a su importancia en la regulación hídrica.

Figura 37

Tala de árboles para madera



Fuente: Medina (2024)

Por otro lado, los pobladores manifiestan que durante la temporada de lluvias de mayo a julio se presentan crecientes por el aumento de caudal exponencial debido a la escorrentía de aguas lluvias, estas se ven favorecidas por la falta de cobertura boscosa en la zona de estudio de las subcuencas o caños tributarios. Estas crecientes han traído problemas de enfermedades o perdidas de animales.

Otro problema asociado a la perdida de cobertura son las quemas (figura 38), esta puede reducir la capacidad de retención del suelo al destruir la materia orgánica, por lo que aumenta la escorrentía y erosión del suelo. Este problema se presenta generalmente en la sabana, y también se observó sobre la cuenca de caño puente.

Figura 38

Zona quemada dentro del PNN



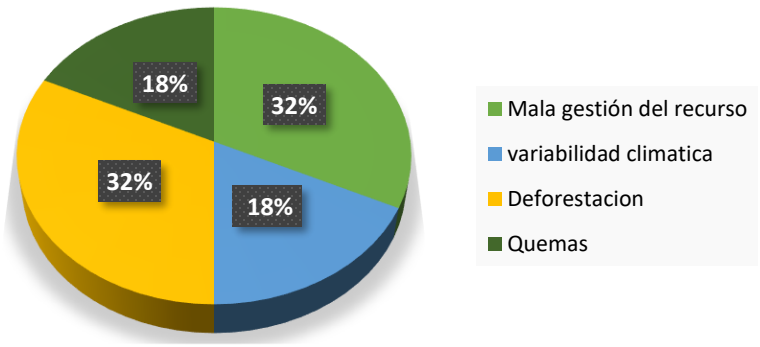
Nota: la zona resaltada en rojo hace referencia a un área quemada

Fuente: Medina (2024)

Por otro lado, los pobladores han oído hablar sobre la variabilidad climática, y consideran que esta, al igual que la mala gestión del recurso hídrico, la deforestación y las quemas inciden en que se presenten sequias o crecientes en las fuentes hídricas superficiales del rio Tame como se muestra en la figura 39.

Figura 39

Factores que inciden en la sequía y crecientes



Fuente: Medina (2024)

La mala gestión influye cuando se realizan prácticas inadecuadas en el uso del agua, el no tratamiento de aguas residuales domésticas, la contaminación por productos químicos agropecuarios, lo que afecta la calidad y disponibilidad hídrica, sumado a esto, presión de la ganadería sobre las fuentes hídricas superficiales que intensifican la erosión y sedimentación.

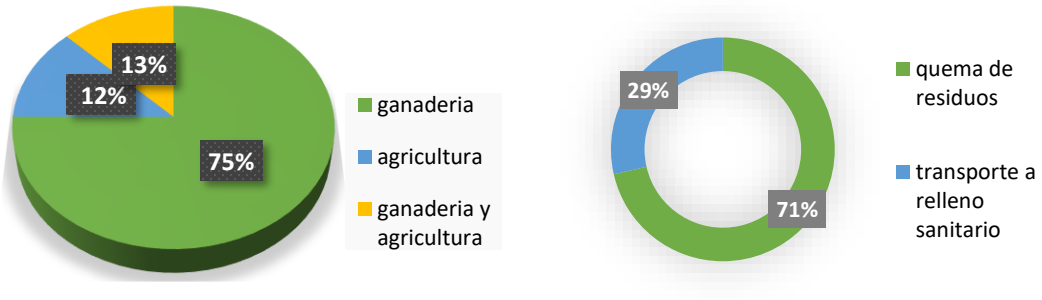
La variabilidad climática como se hablaba anteriormente, afecta los patrones de precipitación y temperatura y por tanto la evaporación, lo que influye en la disponibilidad hídrica debido a las sequias intensas o lluvias extremas que se pueden presentar, lo cual altera los flujos de agua en el rio.

En cuanto a residuos sólidos, que son grandes contaminantes del suelo y el agua, se encontró que principalmente los residuos se derivan de la ganadería principalmente, pues también se derivan de otras activadas agrícolas o domésticas, estos residuos son quemados mayormente y otros son llevados al relleno sanitario más cercano.

Otra actividad que muy pocas veces se considera, son el manejo de los residuos generados tanto por las actividades domésticas como por las actividades pecuarias y agrícolas, estos residuos son mayormente quemados y muy pocas veces transportados al relleno sanitario como se muestra en la figura 40.

Figura 40

Principal fuente de residuos de la vivienda y manejo de los residuos



Fuente: Medina (2024)

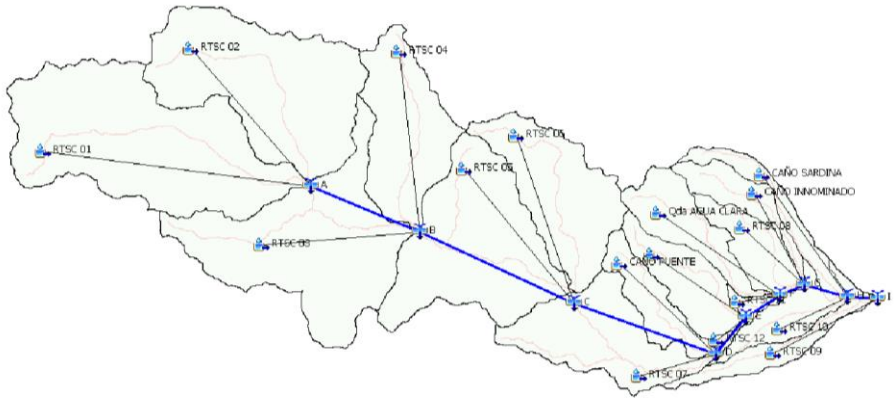
La quema de residuos tiene impacto en el ambiente y los recursos hídricos. Cuando los desechos se queman, se liberan gases tóxicos y partículas finas que contaminan el aire y el suelo, lo que provoca problemas de salud en las personas y daños en la flora y fauna (Atencio, Reyes-Lopez, & Guevara-Garcia, 2013). Estas partículas contaminantes pueden llegar a los cuerpos de agua al infiltrarse en el suelo o por medio de escorrentía durante la lluvia, contaminando las fuentes hídricas afectando la vida acuática. Por lo cual, es importante buscar alternativas sostenibles de manejo de residuos que minimicen el impacto en ambiente.

Indicadores hídricos

Se genero un modelo de cuenca en HEC – HMS, como se muestra en la figura 41, con datos de entrada del número de curva, la atracción inicial, el lag time, y para las fuentes hídricas monitoreadas por el parque, se agregó el flujo base de acuerdo con (Peña & Rodriguez, 2023). Lo cual permitió obtener una aproximación de los caudales de la cuenca. Sin embargo, debido a la falta de datos históricos diarios observados, no se logró hacer la calibración.

Figura 41

Modelo de cuenca del Rio Tame en HEC - HMS

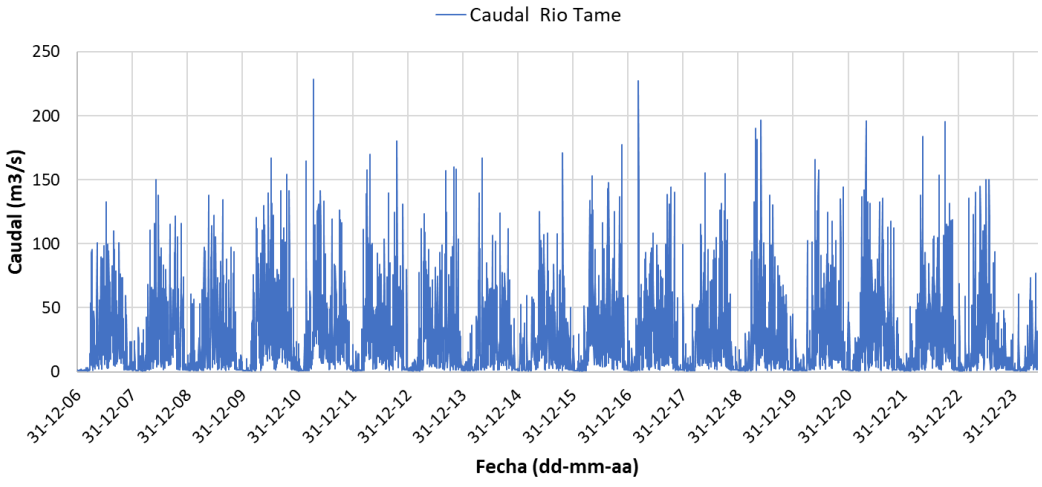


Fuente: Medina (2024)

De los caudales se pudo obtener un caudal máximo de 228.42 m^3/s presentado en abril de 2011, un mínimo que ocurre en los meses de enero, febrero o marzo de 1.113 m^3/s y con un caudal medio de 13.48 m^3/s, figura 42.

Figura 42

Serie de tiempo de los caudales diarios del Rio Tame



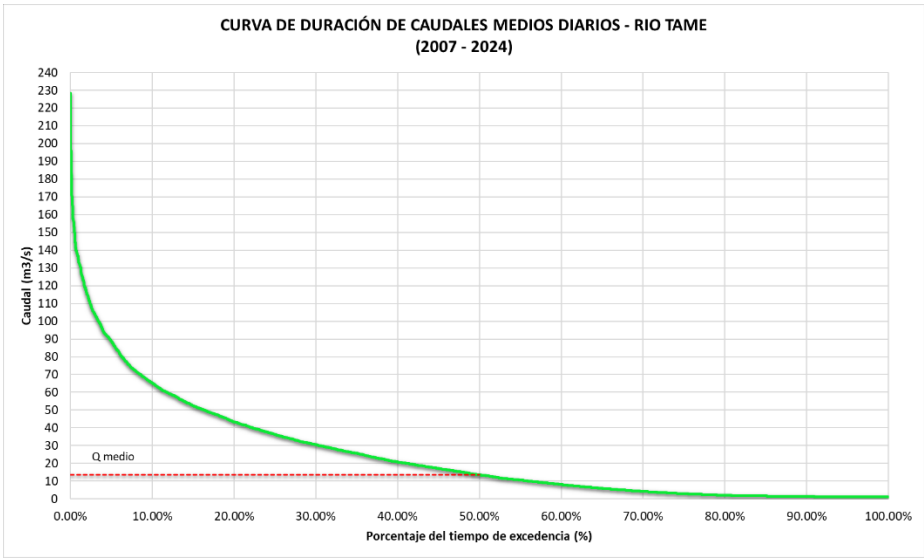
Fuente: Medina (2024)

Índice de Regulación Hídrica - IRH

A partir de estos caudales diarios se construyó la curva de duración de caudales medios diarios (CDC) del Rio Tame (Figura 45), y de 5 se sus fuentes tributarias (Caño Puente, Caño Zorro, Caño Agua Clara, Caño Innominado y Caño Sardina) las cuales se encuentran en el anexo B. Mediante las CDC se determinó el IRH.

Figura 43

Curva de duración de caudales medios diarios - rio Tame (2007 - 2024)



Fuente: Medina (2024)

Los resultados del IRH se presentan en la tabla 13 y figura , en la cual se obtuvo, que la cuenca del rio Tame tiene un índice de regulación hídrica muy bajo, lo cual puede están influenciado por el tipo de suelo, la cobertura vegetal y geología. De acuerdo con Ivanova & Marin-Arevalo (2020), los suelos superficiales con fragmentos de rocas y las altas pendientes, las coberturas de herbazal, pastos limpios, la cobertura boscosa, los pastos enmalezados, con las que se caracteriza la cuenca de estudio, no contribuyen a una buena capacidad de regulación, sumado también las intervenciones antrópicas y captaciones en la parte baja.

Tabla 13

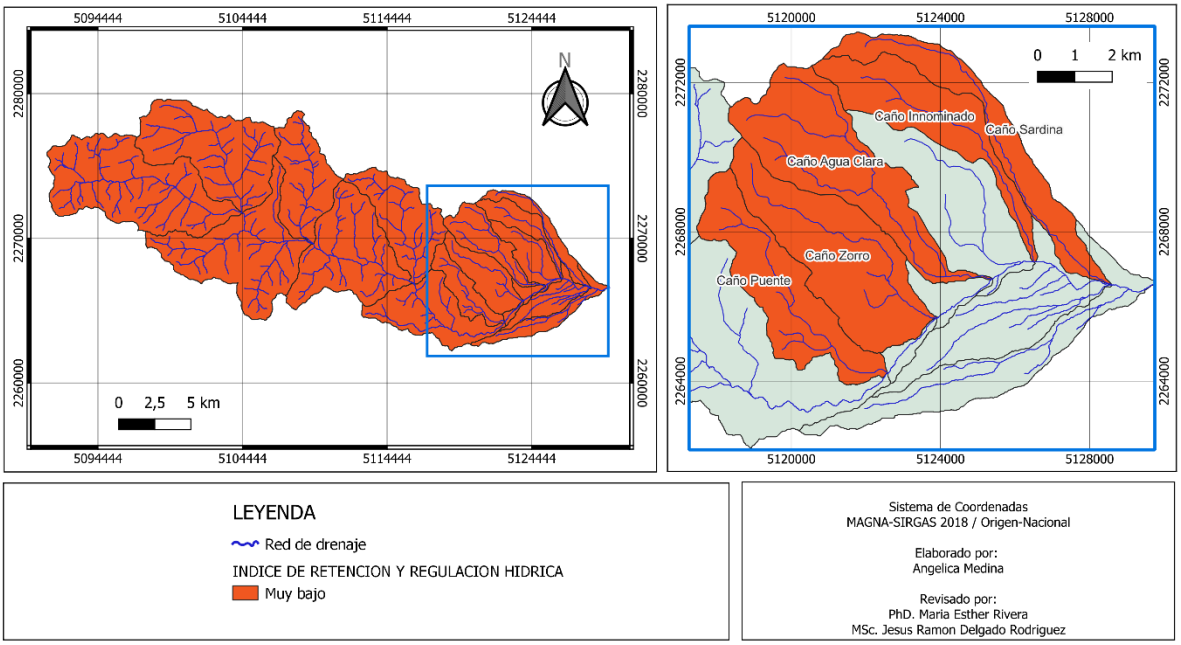
Valores de IRH para la zona de estudio

CUENCA	IRH	
RIO TAME	0.36	Muy Baja
Subzona		
Caño Puente	0.30	Muy Baja
Caño Zorro	0.18	Muy Baja
Caño Agua Clara	0.24	Muy Baja
Caño Innominado	0.11	Muy Baja
Caño Sardina	0.08	Muy Baja

Fuente: Medina (2024)

Figura 44

Índice de retención y regulación hídrica para la zona de estudio



Fuente: Medina (2024), elaborado en el software QGIS versión libre

Esta capacidad de regulación hídrica baja también se ve evidenciada por las variaciones en los caudales que se presentan durante la temporada seca y la temporada de lluvias (ver figura 40), donde cada vez se han presentado más crecientes en los últimos años, según lo expresado por los pobladores, sobre todo en las fuentes tributarias monitoreadas.

Figura 45

Caudal del rio Tame en temporada seca



Nota: caudal en abril de 2024 con pocas lluvias antecedentes

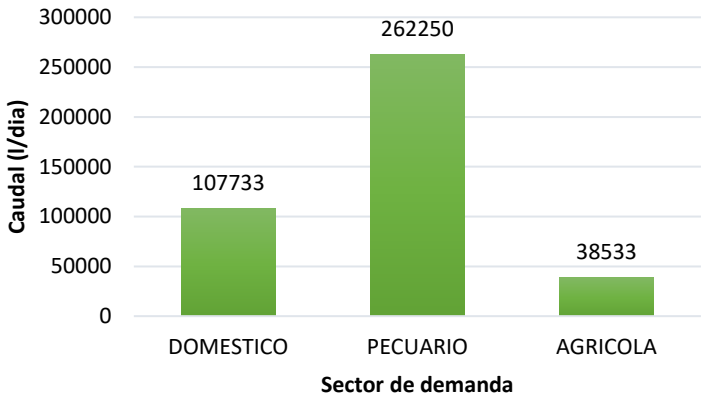
Fuente: Medina (2024)

Índice de uso del agua – IUA

En cuanto a la demanda se contabilizo un total de 369.983 l/día, siendo el sector con más alta demanda el pecuario como se indica en la figura 46. Lo anterior, sin considerar la captación del acueducto municipal, el cual según la contraloría de Arauca (2019) tiene concesionado 168 l/s, lo que equivale a 14’515.200 l/día, en total, la demanda hídrica sectorial fue igual a 0.17 en m3/s.

Figura 46

Demanda hídrica sectorial de la zona de estudio



Fuente: Medina (2024)

Para la oferta hídrica se tuvo un caudal medio de 13.48 m3/s, al cual se le descontó el Q90 por calidad de agua, ya que cuenta con ICA aceptable según el estudio de calidad facilitado por el PNN El Cocuy realizado para el año 2023, y para uno de los tributarios con ICA regular se descontó el Q75. Así mismo, se descontó el caudal ecológico correspondiente al 25% o el Q75, a partir de esto, se obtuvo el índice de uso del agua, el cual fue bajo tanto para la cuenca completa como para las subdivisiones de los tributarios. La tabla 14 y figura 47 presentan los resultados obtenidos para este índice.

Tabla 14

Valores de IUA para la zona de estudio

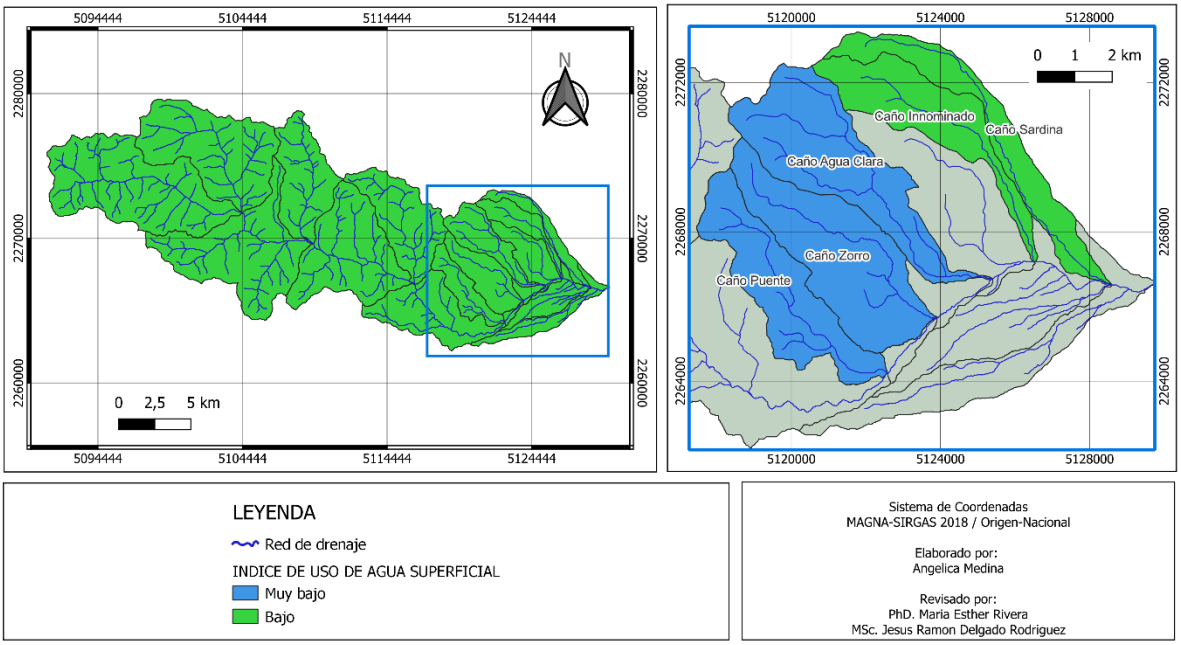
	Oferta (m^3/s)						
	Qmedio	Qambiental	Calidad	Oferta disponible	Demanda (m^3/s)	IUA	
RIO TAME	13.47	1.33	1.18	10.96	0.172	1.57	Bajo
CAÑO PUENTE	0.33	0.16	0.04	0.13	0.00043	0.33	Muy Bajo
CAÑO ZORRO	0.17	0.12	0.02	0.03	0.00027	0.91	Muy Bajo

	Oferta (m^3/s)						
	Qmedio	Qambiental	Calidad	Oferta disponible	Demanda (m^3/s)	IUA	
CAÑO AGUA CLARA	0.43	0.18	0.18	0.07	0.00032	0.32	Muy Bajo
CAÑO INNOMINADO	0.07	0.03	0.01	0.02	0.00025	1.03	Bajo
CAÑO SARDINA	0.04	0.01	0.01	0.02	0.00043	2.17	Bajo

Fuente: Medina (2024)

Figura 47

Indice de uso de agua superficial para la zona de estudio

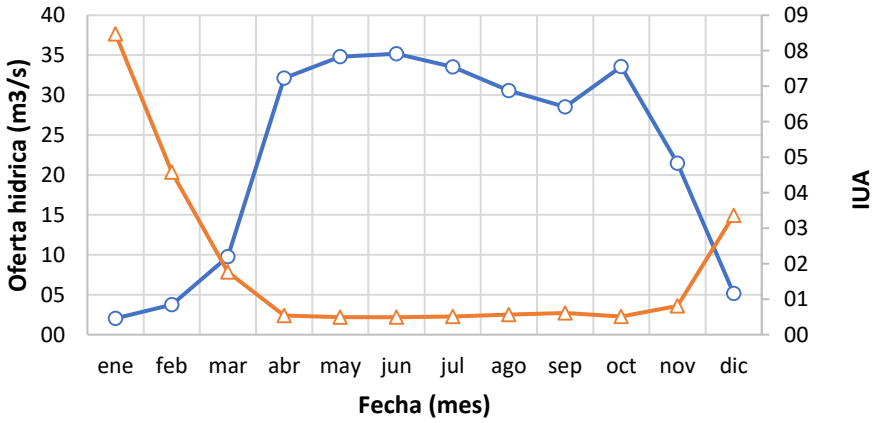


Fuente: Medina (2024), elaborado en el software QGIS versión libre

Sin embargo, si se estima el IUA a nivel mensual, como se observa en la figura 48 para el Rio Tame, presenta un aumento hacia los meses de diciembre, enero y febrero, correspondiente a la temporada seca donde baja la oferta hídrica.

Figura 48

Variación mensual del IUA



Fuente: Medina (2024)

Índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico – IVH

En función de los dos índices desarrollados, se obtuvo el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento hídrico (IVH), el cual establece una vulnerabilidad media para toda la cuenca como se muestra en la tabla 15 y figura 49.

Tabla 15

Clasificación del IVH para la zona de estudio

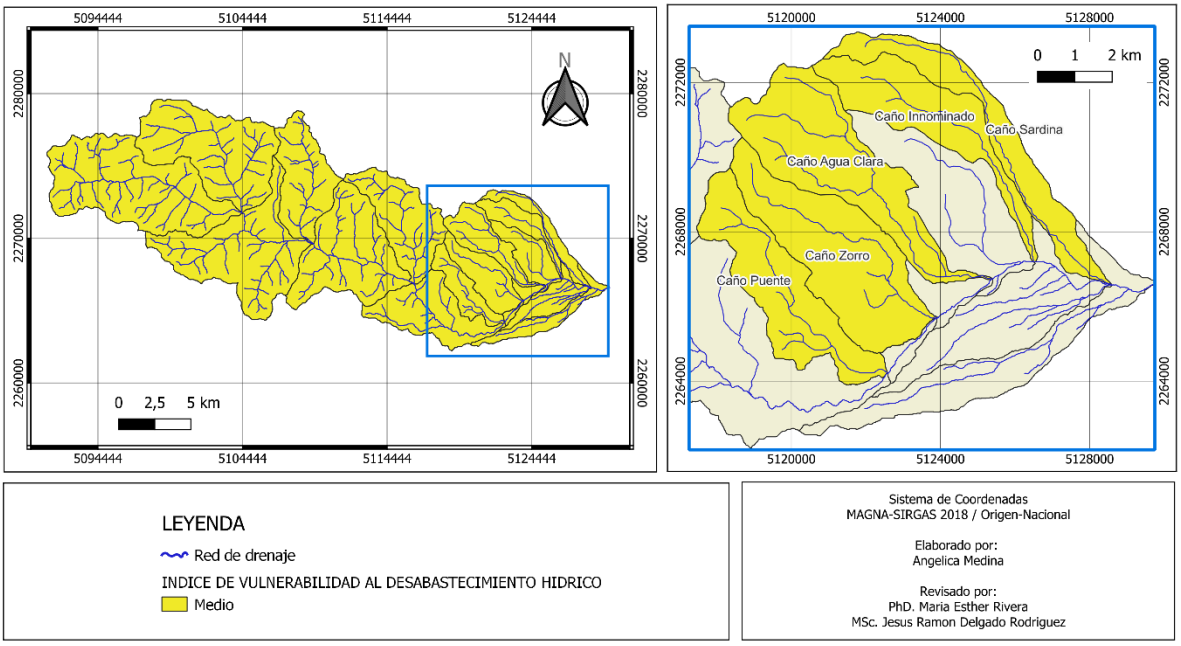
ZONA	IRH	IUA	IVH
RIO TAME	Muy Baja	Bajo	Medio
CAÑO PUENTE	Muy Baja	Muy Bajo	Medio
CAÑO ZORRO	Muy Baja	Muy Bajo	Medio
CAÑO AGUA CLARA	Muy Baja	Muy Bajo	Medio

CAÑO INNOMINADO	Muy Baja	Bajo	Medio
CAÑO SARDINA	Muy Baja	Bajo	Medio

Fuente: Medina (2024)

Figura 49

IVH para la zona de estudio



Fuente: Medina (2024), elaborado en el software QGIS versión libre

Formulación de opciones y recomendaciones de manejo

En el presente apartado, se presentan recomendaciones y opciones de manejo de acuerdo a las problemáticas identificadas. El objetivo principal de estas medidas es promover la sostenibilidad de los recursos hídricos, la conservación de la cuenca y sus servicios ecosistémicos, reduciendo los impactos negativos de la perdida de los bosques, la ganadería y los efectos de la variabilidad climática principalmente, fomentando practicas sostenibles. Además, se busca mejorar la resiliencia de la cuenca frente a los cambios con medidas restaurativas. Para ello se organizaron las medidas de acuerdo a su objetivo.

Objetivo 1: Regular las actividades humanas para reducir su impacto en el recurso hídrico

Se deben regular las actividades de ganadería, tala de árboles, quemas y agricultura en el área protegida, para esto es fundamental establecer normativas y prácticas que minimicen los impactos negativos en los cuerpos de agua. Así como controlar la tala de árboles, la expansión de portreros, el uso de fertilizantes y pesticidas, lo cual es crucial para evitar la pérdida de los bosques y la contaminación.

Además, establecer programas de educación y capacitación para los agricultores y ganaderos locales que brinden información sobre prácticas sostenibles y técnicas de manejo adecuadas. igualmente, sobre el manejo sostenible de los residuos sólidos.

Objetivo 2: Promover el uso de fuentes alternas

Incluir sistemas de captación, recolección y almacenamiento de aguas lluvias desde los tejados de las viviendas rurales, que pueda usarse para el desarrollo de sus actividades, esto permitirá reducir la dependencia a las fuentes hídricas y garantizar el suministro en temporada de sequía.

Objetivo 3: Aprovechar de manera eficiente los recursos hídricos del PNN El Cocuy

Es importante disminuir el desperdicio en los sistemas de captación de agua superficial y almacenamiento de esta. En las viviendas en las que se cuenta con flujo constante, se pueden implementar llaves de paso que controlen el flujo cuando el sistema o tanque de almacenamiento este lleno y de esta manera reducir la cantidad de agua extraída de la fuente, protegiendo el caudal ecológico y la disponibilidad hídrica aguas abajo.

También es importantes seguir realizando estudios sobre el comportamiento hídrico de la cuenca, así como promover campañas sobre el ahorro y usos sostenibles del agua con el fin de generar conciencia en la población.

Objetivo 4: Evaluar la calidad y cantidad de agua en diferentes puntos de la cuenca

Implementar sistemas de monitoreo para evaluar la calidad y cantidad de agua en diferentes puntos de la cuenca. Realizar estudios hidrológicos y de calidad del agua para comprender mejor

los procesos e impactos. Permite identificar posibles problemas en la gestión del agua y tomar medidas correctivas a tiempo para proteger los sistemas acuáticos. Igualmente, evaluar la implementación de nuevas tecnologías de monitoreo como la IoT fomentando la participación y colaboración con otros actores involucrados sobre la cuenca, como corporaciones autónomas regionales, alcaldías, empresas de servicio público ente otras entidades.

Objetivo 5: Mejorar los sistemas de monitoreo actuales realizados por el PNN El Cocuy

El parque está realizando monitoreos al recurso hídrico de manera trimestral, sin embargo, lo ideal es realizar aforos diarios durante un periodo prolongado dada la ausencia de estaciones, pero debido a las dificultades de acceso a los puntos, la falta de instrumentos y personal disponible, dificultan la ejecución, pero debería tenerse en cuenta en actividades futuras de investigación y monitoreo. Por otro lado, en consideración de los monitoreos actuales, se puede incluir la fecha de aforo, y a partir de esto y de los datos de precipitación recolectados de los pluviómetros porder evaluar de mejor manera el comportamiento de estos caudales teniendo en cuenta la humedad antecedente. En cuanto a la información de precipitación, temperatura y humedad relativa, es importante garantizar la toma de mínimo 20 días de datos para realizar promedios y totales mensuales, o en dado caso, complementar datos con otros registros cercanos.

Igualmente, continuar los monitoreos de calidad del agua, sin embargo, establecer diferentes puntos estratégicos que permitan evaluar el impacto de las actividades sobre este factor.

Objetivo 6: Restaurar las áreas degradas de la cuenca según el alcance del PNN El Cocuy

Es importante fomentar la conservación de áreas boscosas en zonas de alta pendiente para reducir la erosión o perdida del suelo y mejorar la infiltración del agua en el suelo. Para ello, es importante crear e implementar programas de reforestación y restauración de los ecosistemas degradados de la zona de estudio. Así como, restaurar las riberas de los ríos o fuentes superficiales con especias nativas, lo cual ayudara a estabilizar el suelo, filtrar contaminantes y proporcionar hábitat para la fauna. Para todo esto, es importante también, establecer mecanismos legales que fomenten la conservación y uso sostenible de los recursos del parque.

Objetivo 7: Promover el uso de técnicas de conservación del suelo para prevenir la erosión y mejorar la retención de agua.

Limitar el pastoreo excesivo: El pastoreo excesivo puede degradar el suelo y afectar la calidad del agua. Para abordar este problema, es fundamental establecer una rotación de potreros y controlar el pastoreo. El establecimiento de áreas de pastoreo rotativo fomenta el uso de pastizales de manera controlada, evitando la sobreexplotación y la degradación del suelo. Esto contribuye a mejorar la calidad del agua al evitar la sobrecarga de pastizales.

Implementar sistemas de manejo arbolizados: En zonas con ganadería dentro del parque nacional, se recomienda implementar sistemas silvopastoriles. Estos sistemas combinan árboles con pastizales y proporcionan múltiples beneficios. Los árboles ofrecen sombra, mejoran la calidad del suelo y reducen la erosión. Además, ayudan a mantener la humedad del suelo y regulan el flujo de agua. La integración de árboles en sistemas ganaderos también mejora la captura de carbono, la biodiversidad y la producción de forraje.

Recuperar y proteger las riberas de los ríos: Proteger las riberas de los ríos es esencial para mantener la calidad del agua. El pisoteo del ganado puede provocar erosión del suelo y contaminación con excrementos animales. Para prevenir esto, se sugiere implementar bebederos de animales alejados de las fuentes hídricas superficiales. Además, promover el cercado de los alrededores de las fuentes ayuda a evitar el ingreso directo del ganado y protege contra la degradación de la zona ribereña.

Se debe tener en cuenta que, para implementar estrategias de manejo, es importante involucrar a las comunidades locales tanto campesinas como indígenas, lo cual fomenta mayor educación ambiental y la conciencia sobre la importancia de conservar la cuenca y promover practicas sostenibles. También establecer incentivos económicos u otros para promover la adopción de prácticas sostenible por parte de la población.

CONCLUSIONES

La cuenca del río Tame es alargada, con potencial moderado de producción sostenida de caudales, y bajas crecientes. En la parte alta y media, presenta pendientes escarpadas debido a la cordillera oriental. Hacia la zona de transición con el piedemonte llanero, las pendientes son menos abruptas, llegando a ser suaves en la parte baja. Esto propicia la erosión del cauce en la parte alta y la acumulación de sedimentos en la parte baja. Además, en la parte baja, se encuentran suelos originarios de depósitos aluviales y se presentan coberturas asociadas a la ganadería tanto dentro como fuera del área protegida.

Los fenómenos de El Niño y La Niña inciden sobre las variables hidrometereológicas principalmente en la temporada seca, por lo cual durante, el niño, esta ausencia de precipitaciones y aumentos de temperatura se ven intensificados, por ello en esta época se puede ver afectada de manera significativa la oferta hídrica de la región, así mismo, durante la niña pueden presentarse aumentos en la precipitación en los meses naturalmente secos. Sin embargo, se considera que durante el niño se pueden presentar excesos de lluvia que pueden estar influenciados por el debilitamiento de los vientos alisios o la oscilación de Madden y Julián o la ZCIT u otros factores que se pueda considerar.

En la cuenca del río Tame, la parte alta está poco intervenida, pero hacia la parte baja, en el parque nacional y en el área de reserva forestal protectora, la ganadería, la tala de árboles y las quemas están transformando los bosques. Esto genera conflictos en el uso del suelo destinado a la conservación y protección de la biodiversidad. Además, estas actividades contribuyen a la erosión del suelo, el aumento de la escorrentía y la disminución de la infiltración, lo que influye sobre la regulación hídrica, aumentando la ocurrencia de crecientes y manteniendo caudales muy bajos en la temporada seca.

La cuenca del río Tame presenta una vulnerabilidad media al desabastecimiento hídrico, influenciada mayormente por el índice de regulación hídrica que se relaciona al comportamiento de los caudales, los cuales están dependen de las características físicas de la cuenca, de la precipitación y la temperatura influenciadas a su vez por el ONI. Con lo cual se puede decir que la influencia de la variabilidad climática y las presiones antrópicas se da principalmente en la

regulación y retención hídrica. Así mismo, considerando la afectación durante la época seca y el aumento del índice de uso del agua en esta temporada, es importante considerar la vulnerabilidad en esta época y plantear medidas de mitigación para estos cambios que permitan el uso sostenible de la cuenca.

Es fundamental implementar medidas de regulación y control para proteger y conservar los recursos hídricos de la cuenca. La participación activa de las comunidades locales en la toma de decisiones y la implementación de estrategias, junto con la promoción de la educación ambiental, son factores clave para lograr la sostenibilidad de la cuenca. Además, es necesario mejorar los sistemas de monitoreo y realizar estudios hidrológicos y de calidad del agua de forma periódica. La protección de las riberas, la conservación de áreas boscosas, la implementación de prácticas agrícolas sostenibles y el manejo del ganado de manera adecuada son acciones indispensables para mantener el equilibrio en la cuenca. Todo esto debe estar respaldado por mecanismos legales que garanticen la conservación y uso sostenible de los recursos naturales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda seguir realizando investigaciones complementarias, en las cuales se analicen otros factores de variabilidad climática a parte del ENOS, que puedan influir en la cuenca, como la Oscilación del Atlántico Norte (NAO), la Oscilación de Madden y Julián (OMJ), las variaciones decadales, cuasi bienales, entre otros factores, y de igual manera analizar el cambio climático. Lo cual ayudaría a complementar la información sobre los patrones climáticos pasados y futuros en la cuenca.

Para este tipo de estudios, es necesario contar con un amplio catálogo de variables climáticas, como el viento, la humedad relativa y los caudales de las fuentes hídricas, por lo cual es importante aumentar las estaciones hidrometeorológicas en la cuenca y las variables que miden. Esto es esencial para comprender la variabilidad climática y su impacto en la cuenca.

Igualmente, realizar estudios de suelo para comprender de manera puntual el impacto de la ganadería en la zona de estudio, evaluando la calidad del suelo, la erosión, la compactación del suelo y otros efectos ambientales causados por la ganadería. Esto puede ayudar a implementar prácticas de manejo de ganadería sostenible que ayuden a la recuperación de la zona de estudio.

Finalmente, es importante que la comunidad a tome conciencia del impacto que sus actividades tienen en el medio ambiente, especialmente dentro del área protegida. Igualmente, a las entidades territoriales, a tener en cuenta estos aspectos climáticos y de vulnerabilidad de la cuenca encontrados en la formulación de planes de manejo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agencia Nacional de Licencias Ambientales. (2022). *Reporte de Alertas del Análisis Regional de Arauca*. Obtenido de https://www.anla.gov.co/images/documentos/reportes-alertas/2022-11-28-rep-alertas-Arauca.pdf

Amaya Maldonado, E. (2019). *Estimación de caudales medios para la subcuenca del río Teusacá mediante el software HEC-HMS. Universidad Santo Tomás*. Obtenido de https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15342

Autoridad Nacional del Agua. (2024). *Fisiografía.* Obtenido de https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/pampas/F

Ávila, Á. J., Carvajal, Y., & Gutiérrez, S. (2014). *Análisis de la influencia de El Niño y La Niña en la oferta hídrica mensual de la cuenca del río Cali.* Obtenido de https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/20731

Barrios, J. S. (2021). *Índices Locales del Ciclo El Niño Oscilación del Sur para las Regiones Naturales de Colombia.* Obtenido de repositorio UNAL: https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/79362

Borunda, A. (2023). ¿Qué es el fenómeno de El Niño y La Niña? [Video]. National Geographic. https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-el-fenomeno-de-el-nino-y-la-nina

Bowles, J. E. (1981). *Manual de laboratorios de suelos en ingeniería civil. Bogotá:* McGraw Hill.

Builes-Jaramillo, A., Yepes, J., & Salas, H. D. (2022). *The Orinoco Low-Level Jet and Its Association with the Hydro climatology of Northern South America.* Journal of Hydrometeorology, 23(2), 209–223. https://doi.org/10.1175/jhm-d-21-0073.1

Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López de Armentia, A., Del Río, J., & De Marco, S. (2018). *Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina).* Obtenido de SciELO: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652018000100005#a2

Campos Aranda, D. (1992). *Procesos del Ciclo Hidrológico*. San Luis de Potosí: Editorial Universitaria Potosina.

Castañeda, M., Ordoñez, N. (2020). *Estudio de la vulnerabilidad climática del recurso hídrico de la cuenca del río Pamplonita*. https://repository.usta.edu.co/handle/11634/20700

Castro, E. (2022). *Estimación De La Oferta Hídrica Del Parque Nacional Natural Farallones De Cali En La Vertiente Oriental* - CALI. Universidad del Valle.

Ccama, J., & Turpo, R. (2020). *Modelamiento de la vulnerabilidad del recurso hídrico considerando la incidencia del cambio climático en la cuenca del rio Chancay –*

Lambayeque utilizando SWAT. Obtenido de https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3330/Jose_Trabajo_Bachiller_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Centro Nacional de Investigaciones de Café. (2022). *Aplicativo de balance hídrico para el cultivo de café en Colombia*. Obtenido de https://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/4393/1/avt0539.pdf

Chiles, G. (2020). *Caracterización de la variabilidad climática de la cuenca hidrográfica del río Mira en el período 1981-2010, con base en la información hidrometeorológica disponible.* Obtenido de https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/7782

Consorcio POMCA Quindío. (2020). *Morfometria*. Obtenido de POMCA Rio La Vieja: Caracterizacion de la cuenca Rio La Vieja: https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/7_CapituloI_Diagnostico_Morfometria.pdf

Consorcio Rio Garagoa. (2017). *Morfometría* . Obtenido de Actualización POMCA Rio Garagoa Fase De Diagnóstico: Caracterización Físico-Biótica De La Cuenca: https://www.car.gov.co/uploads/files/5c1a9fcf99956.pdf

Córdova, M. (2016). *Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas*. Obtenido de https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26#google_vignette

Córdova, M. (2016). Parámetros geomorfológicos de cuencas hidrográficas. Obtenido de https://www.prontubeam.com/articulos/articulos.php?Id_articulo=26#google_vignette

Corporación Autónoma Regional Del Tolima. (2024). *¿Qué es una reserva forestal protectora regional?* Obtenido de https://www.cortolima.gov.co/servicio-al-ciudadano/glosario/627-que-es-una-reserva-forestal-protectora-regional

David, A. G., & Geusep, O. V. (2023). *Análisis y simulación de caudales en las cuencas del río Nús y Penderisco en el contexto del cambio climatico y la gestion del riesgo en antioquía.* https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/35563

Díaz, J. M. (2014). *Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: el caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin**. Obtenido de https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1012-70892014000100005

Duque-Escobar, G. (2022). *Bosques: Regulación hídrica y Pluviométrica*. Obtenido de godues: https://godues.wordpress.com/2022/05/28/bosques-regulacion-hidrica-y-pluviometrica/

Flórez, A., Torres, L. (2022). Análisis de correlación de índices macroclimaticos del fenómeno del niño y la niña con respecto a la precipitación en la Región Andina colombiana. Repositorio

Institucional Universidad Católica De Colombia - RIUCaC. https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/e1a2d74d-91bf-4614-ab44-24cac4a4ab07/full

Florian-Vergara, C., Salas, H. D., & Builes-Jaramillo, A. (2021). *Análisis de la precipitación y la evaporación en el Orinoco colombiano según los modelos climáticos regionales del experimento CORDEX-CORE*. Tecnológicas, 24(52), e2144. https://doi.org/10.22430/22565337.2144

Gallo, O. (2022). *Estimación de la oferta hídrica para la planificación de cultivos en una cuenca.* Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/82003/1121837331.2022.pdf?sequence=1

Gil Zapata, M, Quiceno, N y Poveda Jaramillo, G. (1998). *Efecto del ENSO y la NAO sobre el ciclo anual de la hidrología de Colombia: análisis de correlación, reanálisis de NCEP/NCAR y modelos de pronóstico.* Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Posgrado en Recursos hidráulicos.

Güiza, N. (2019). *Estimación de los cambios en los índices asociados a la oferta y la demanda del recurso hídrico en la cuenca del río Coello bajo escenarios de cambio climático.* Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76347

Guzmán, D., Ruiz, J., & Cadena, M. (2014). *Regionalización De Colombia Según La Estacionalidad De La Precipitación Media Mensual, A Través Análisis De Componentes Principales (Acp).* Obtenido de IDEAM: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21141/Regionalizacion+de+la+Precipitacion+Media+Mensual/1239c8b3-299d-4099-bf52-55a414557119

Hernández-Gamboa, J. S. & Otálora-Herrán, M. C. (2018). *Estimación de los índices hídricos (IUA, IRH, IVH) y formulación de medidas para la mitigación del desabastecimiento en la subcuenca Arroyo Grande Corozal (2502-01-07) de la cuenca río Bajo San Jorge*. Trabajo de Grado. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería de Civil. Especialización en Recursos Hídricos. Bogotá, Colombia

Hydrologic Engineering Center. (2024). *HEC-HMS.* Obtenido de https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2024). *Indicadores* . Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/agua/indicadores1

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). Estudio Nacional del Agua 2010. Bogota D.C. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2014). Estudio Nacional del Agua 2014. IDEAM. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2023). Estudio Nacional del Agua 2022. IDEAM. Obtenido de http://www.ideam.gov.co/web/agua/estudio-nacional-del-agua

López, J. J., González, M., Scaini, A., Goñi, M., Valdenebro, J. V., & Gimena, F. N. (2012). *Caracterización del modelo HEC-HMS en la cuenca de río Arga en Pamplona y su aplicación a cinco avenidas significativas*. Obras Y Proyectos, 12, 15–30. https://doi.org/10.4067/s0718-28132012000200002

Lumivero. (2024). *XLSTAT*, Your Data Analysis Solution. Obtenido de https://www.xlstat.com/es/

Marin, M., Clinciu, I., Constantin Tudose, N., Ungurean, C., Adorjani, A., Mihalache, A., . . . Cacovean, H. (2020). *Assessing the vulnerability of water resources in the context of climate changes in a small forested watershed using SWAT: A review*. Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935120302231#sec2

Martínez, A., & Orozco, I. (2022). *Metodología para evaluar la vulnerabilidad de sistemas hidrológicos ante los potenciales efectos del cambio climático.* Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-62662022000100150

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Guía técnica para la Formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. Obtenido de https://www.andi.com.co/uploads/guia_de_pomcas.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2024). *¿Qué es el Cambio Climático?* Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/que-es-el-cambio-climatico/

Montealegre, J. E. (2014). *Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico.* Obtenido de IDEAM: http://www.ideam.gov.co/documents/21021/440517/Actualizacion+Modelo+Institucional+El+Ni%C3%B1o+-+La+Ni%C3%B1a.pdf/02f5e53b-0349-41f1-87e0-5513286d1d1d

Null, J. (2024). *El Niño and La Niña Years and Intensities*. Obtenido de Golden Gate Weather Services: https://ggweather.com/enso/oni.htm

Nucleo Rafael Rangel – Universidad de Los Andes. (2017). Practica forma de la cuenca. Obtenido de

http://www.nurr.ula.ve/saladegeografia/documentos/hidrografia/practicas_hidrografia/practica_forma_de_la_cuenca/guia_forma_cuenca/practica_forma_cuenca.pdf

Osorio, D. (2019). *Vulnerabilidad de la disponibilidad actual y futura del recurso hídrico en el valle de Aburrá y sus cuencas abastecedoras.* Obtenido de https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77492

Ovalle, R. (2019). *Evaluación de la vulnerabilidad hídrica de la cuenca hidrográfica del río Aipe mediante la estimación de indicadores hídricos y modelación de la respuesta hidrológica.* Obtenido de https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/64e21220-8a97-4fad-9bb1-27e8d1811e18/content

Parque Nacional Natural de Colombia. (2021). *Parque Nacional Natural El Cocuy: Plan de manejo 2022 – 2027.*

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2014). *Importancia económica de la provisión y regulación hídrica de los parques nacionales naturales de Colombia para los sectores productivos del país.*

Parques Nacionales Naturales de Colombia. (2024). *Parque Nacional Natural El Cocuy - Parques Nacionales Naturales de Colombia*. Parques Nacionales Naturales De Colombia. Obtenido de https://www.parquesnacionales.gov.co/nuestros-parques/pnn-el-cocuy/

QGIS Project. (2024). *Manual de aprendizaje QGIS*. Obtenido de https://docs.qgis.org/3.34/es/docs/training_manual/foreword/index.html

Quimbay-Moreno, R. J., Miranda-Gómez, J. F., & Robles-Cruz, L. F. (2014). *Diseño de la metodología para determinar caudales característicos mensuales multianuales en una cuenca rural no instrumentada a través del programa HEC-HMS*. Repositorio Institucional Universidad Católica De Colombia - RIUCaC. https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/1ca99f38-8da8-4f3c-b295-55ec62774621

Ramírez, K. (2023, March 22). *Huella hídrica en ganadería: impacto y soluciones. Igualdad Animal México*. https://igualdadanimal.mx/blog/la-huella-hidrica-de-la-ganaderia-industrial/

Red.es. (2024). *Guía práctica de introducción al Análisis Exploratorio de Datos.* Obtenido de https://datos.gob.es/sites/default/files/doc/file/analisis_exploratorio_de_datos_2021_v6.pdf

Registro Único Nacional de Áreas Protegidas. (2024). *Cuenca Rio Tame* https://runap.parquesnacionales.gov.co/area-protegida/421

Rosero, D. (2018). *Evaluación espacial de la vulnerabilidad al cambio climático en la cuenca del río Blanco ubicado en el departamento de Nariño*. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjIts6QqO-

DAxVlTDABHd7vATEQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Frepositorio.unal.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2Funal%2F69864%2F1085921967.2018.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw2Bm

Rosero, D. (2018). *Evaluación espacial de la vulnerabilidad al cambio climático en la cuenca del río Blanco ubicado en el departamento de Nariño*. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjIts6QqO-DAxVlTDABHd7vATEQFnoECBcQAQ&url=https%3A%2F%2Frepositorio.unal.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2Funal%2F69864%2F1085921967.2018.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw2Bm

Ruiz-Ochoa, M. A., Torres-Corredor, J. S., Vargas-Corredor, Y. A., & Orduz-Amaya, L. P. (2023). *Variabilidad climática (precipitación, temperatura y humedad relativa) para la gestión hídrica del departamento del Casanare, Colombia*. Información Tecnológica, 34(5), 47–60. https://doi.org/10.4067/s0718-07642023000500047

Ruiz-Ochoa, M., Vargas-Corredor, Y., Orduz-Amaya, L., & Torres-Corredor, J. (2022). *Variabilidad climática en la planificación hídrica de la cuenca del río Cravo Sur (Casanare, Colombia).* Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642022000400117#B15

Sadeghian, K. (2009). *Impacto de la ganadería sobre el suelo*. Obtenido de alternativas sostenible de manejo.

Salazar, D. A. (2016). *Procedimiento para calcular la oferta hídrica superficial por método relación lluvia-correntía, caso de estudio cuenca de la quebrada Apauta para el año 2015*. Obtenido de http://hdl.handle.net/10654/15513.

Santos, E. (2019). *Modelo desarrollado en Python, para determinar la disponibilidad del recurso hídrico superficial y efectos de la variabilidad climática en la cuenca del río Atulapa, Esquipulas, Chiquimula, Guatemala.* Obtenido de https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/14426/TFSC1628_BIB310618_TFG_DOCINADE_Santos-Mansilla%2c%20Edwin_Guillermo_2019.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Saravia, J. C. (2015). *¡Pero qué linda relación tienen! La correlación de Pearson*. Stats SOS. https://statssos.wordpress.com/2015/03/10/pero-que-linda-relacion-tienen-la-correlacion-de-pearson/

Tahiri, A., Amraoui, F., Sinan, M., Bouchaou, L., Berrada, F., & Benjmel, K. (2022). Influence of climate variability on water resource availability in the upper basin of Oum-Er-Rabiaa, Morocco. Groundwater for Sustainable Development, 19, 100814. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100814

Vázquez, M., Ramírez, J., Rocha, D., Collazo, J., Edgar, R., Alan, A., & Orozco, I. (2021). *Evaluación del efecto del cambio climático y variabilidad climática sobre las fuentes de abastecimiento superficial: caso de estudio presa La Purísima.* Obtenido de http://repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/5882/1/Evaluación%20del%20efecto%20del%20cambio%20climático%20y%20variabilidad%20climática%20sobre%20las%20fuentes%20de%20abastecimiento%20superficial%20caso%20de%20estudio%20presa%20La%20Purísima.pdf

Wickman, H., & Grolemund, G. (2017). *R for Data Science*. Obtenido de https://r4ds.had.co.nz/

Zambrano, K. (2023). *Sesion IV*. Obtenido de RPubs: https://rpubs.com/KarolZ/1119798

ANEXOS

Anexo A: Formato de encuesta

Universidad de Pamplona
Facultad de Ingenierías y Arquitectura
Ingeniería Ambiental
Parque Nacional Natural El Cocuy

La siguiente encuesta se realiza con fines netamente académicos, sin ánimo de lucro, con el propósito de culminar una de las etapas para el desarrollo del trabajo de grado titulado **'Evaluación de la vulnerabilidad de la cuenca del Río Tame, costado oriental Parque Nacional Natural El Cocuy: variabilidad climática y presiones antropogénicas'**, a cargo de la estudiante Angélica Medina Quiñonez de la Universidad de Pamplona. Este trabajo está bajo la dirección de la PhD en Hidrología María Esther Rivera y el Geólogo Jesús Ramón Delgado Rodríguez, con la ayuda y supervisión del Parque Nacional Natural El Cocuy. La información consignada en el formulario está protegida por la ley de protección de datos personales o la ley 1581 de 2012 para Colombia, y será utilizada únicamente con fines académicos y de para la gestión de parques.

ENCUESTA	
Objetivo	Determinar la demanda hídrica sectorial sobre las fuentes tributarias del rio Tame Identificar las presiones antropogénicas sobre el recurso hídrico
Fecha	
Información personal	
Nombre	
Coordenadas del predio	
altitud	
vereda	

Con lo anterior, me gustaría realizar algunas preguntas sobre el tema propuesto, es completamente opcional y puede negarse a responder en cualquier momento si así lo prefiere.

1. ¿Cuántas personas integran el hogar?

1 a 2	3 a 5	5 a 7	Mas de 7

2. ¿Qué usos le da al recurso hídrico?

Domestico	Pecuario	Agrícola	Todas las anteriores	Otros

¿Cuales? _____

3. ¿Qué animales tiene en su predio?

Ganado bovino	Animales domésticos	Todas las anteriores	Otros:

4. Sistema de producción ganadera

Tradicional	Mejorado	Intensivo

5. Número de animales y en qué fase se encuentra

Fase de cría	*Fase de destete*	*Fase de reproducción*	*Fase de engorde*
1 a 5	1 a 5	1 a 5	1 a 5
6 a 10	6 a 10	6 a 10	6 a 10

10 a 20	10 a 20	10 a 20	10 a 20
más de 20	más de 20	más de 20	más de 20

6. ¿Emplea bebederos para el suministro de agua? SI____NO___ otro_____
Si la respuesta es sí, ¿Cuáles son las dimensiones de los bebederos y frecuencia de suministro?

Dimensiones o capacidad	*Frecuencia diaria*

7. ¿Qué tipo de cultivos tiene y el área? RM

Tipo de Cultivo	*Área (ha)*

8. Tipo de riego del cultivo

Aspersión	Gravedad	Goteo	Conducción por tuberías	Sin información

9. ¿Qué tipo de fuente utiliza para el suministro de agua? RU

Quebrada	Caño	Rio	Subterránea	Acueducto veredal	Red urbana

Otro:_____

10. ¿Cuenta con una captación de agua? SI____ NO____, si la respuesta es sí ¿Cuál es la fuente?
_____

11. ¿Cuenta con sistemas de almacenamiento de agua? SI ____ NO ___ , si la respuesta es sí, ¿Cuáles son las dimensiones?

Sistema	*Dimensiones o capacidad*
Tanque	
Estanque	

12. ¿Ha experimentado escasez o sequías? SI___ NO___ , si la respuesta es sí, ¿En qué fecha se presentó? Y describa el evento.

Fecha	*Descripción*

13. ¿Ha evidenciado crecientes? SI___ NO___, si la respuesta es sí, ¿En qué fecha se presentó? Y describa el evento.

Fecha	*Descripción*

14. ¿Ha realizado o evidenciado quemas? SI ___ NO___ , si la respuesta es sí, ¿En qué fecha se presentó? Y describa el evento.

Fecha	*Descripción*

15. ¿Cómo se han visto afectadas sus actividades ante los eventos de sequía o lluvias extremas?

Problemas por escasez o sequia	*Fecha*	*Problemas por lluvias extremas*	*Fecha*
Enfermedades de animales		Inundaciones de cultivos o potreros	
Incendios forestales		Enfermedades	
Escasez de alimentos		Perdida de bienes materiales	
Perdida de animales		Perdida de animales	
Otro		Otro	

16. ¿Ha oído hablar o conoce el termino de variabilidad climática? SI ___ NO____

17. ¿Considera que el fenómeno del Niño y la Niña afectan las lluvias y caudales de la zona? SI____ NO___

18. ¿Cuenta con sistema de almacenamiento de aguas lluvias para eventos de sequía? SI___ NO___ , si la respuesta es sí, ¿Cuál es el tipo de sistema y sus dimensiones?

Sistema	*Dimensiones o capacidad*
Tanque	
Estanque	

19. ¿Qué factores cree que inciden en la sequía?

Mala gestión del recurso	Desvió de cauces	Perdida de suelos	Variabilidad climática
Otros:			

20. ¿Cuál es la principal fuente de residuos en su predio?

Ganadería_____ agricultura_____ domestico ____ Otro_____

21. ¿Qué manejo les dan a los residuos generados en su hogar?

Botadero ____ quemas de residuos ____ transporte a relleno sanitario _____ ninguno ____

Otro_____

22. ¿tiene conocimiento sobre las practicas sostenibles de manejo de residuos? SI___ NO___

23. Observaciones y comentarios adicionales

Anexo B: Curva de duración de caudales para las fuentes tributarias

