

**EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN OFERTA-DEMANDA HÍDRICA EN LA SUBZONA
HIDROGRÁFICA DEL RÍO ZULIA BAJO ESCENARIO ACTUAL Y DE CAMBIO
CLIMÁTICO AL AÑO 2060**



Jorge Iván Guevara Serrano

Ing. Biotecnológico, Esp. Ordenamiento y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Gestión de Cuencas Hidrográficas

Director

Darwin Mena Rentería

Ing. Ambiental y Sanitario, Esp. en Gestión Ambiental, Esp. en Hidroinformática, M.Sc.
en Evaluación de Recursos Hídricos, M.Sc. Inteligencia Artificial Aplicada, Doctorando
en Ingeniería del Agua y Medio Ambiental

Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS
BOGOTÁ, COLOMBIA
SEPTIEMBRE 2026**

Dedicatoria

*“A la memoria de mi abuela Bárbara Rodríguez, cuya luz, ocurrencias y ejemplo
siguen guiando mis pasos, incluso en su ausencia.*

*A mi padre, Iván Guevara, por ser el pilar fundamental de toda la familia, por sus
sacrificios silenciosos y por enseñarme el valor inquebrantable de la responsabilidad.*

*A mi tía Sandra Guevara, por toda una vida de lucha y trabajo incansable; esto
no hubiera sido posible sin ti.*

*A mi esposa Paola, mis hijos Dilan y Simón, por su paciencia infinita durante las
largas noches de modelación y escritura, por su amor y por ser mi refugio en los
momentos de mayor exigencia.*

Este logro es de ustedes.”

Agradecimientos

El desarrollo de esta investigación no habría sido posible sin el acompañamiento, la guía y el apoyo incondicional de diversas personas e instituciones a las cuales deseo expresar mi más profunda gratitud.

A Dios, por brindarme la salud, la sabiduría y la fuerza necesaria para culminar este reto académico.

A la Universidad Santo Tomás, a la Facultad de Ciencias Ambientales y a la Maestría en Gestión de Cuencas Hidrográficas, por brindarme un espacio de excelencia académica y por formar profesionales con visión crítica y responsabilidad territorial.

A mi director de tesis, el ingeniero Darwin Mena Rentería. Gracias por su rigor científico, por su visión pragmática y por impulsarme a ver más allá de los datos matemáticos. Sus valiosos aportes y debates técnicos fueron fundamentales para dotar esta investigación de la madurez y el sentido crítico que el territorio exige.

A Miguel Cristancho, por su invaluable apoyo técnico, su disposición constante y su orientación en el procesamiento de la demanda y el dominio de la herramienta WaterALLOC.

A los profesionales de la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) que, desde el territorio y con verdadera vocación, compartieron sus conocimientos y sus perspectivas sobre la realidad operativa y los desafíos institucionales de la cuenca del río Zulia.

A mi compañero Wilson Gamboa, por las jornadas de estudio, la camaradería y el apoyo mutuo en este proceso de formación.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Finalmente, a mi familia y amigos. Gracias por entender mis ausencias, por escucharme hablar de hidrología durante meses y por ser el respaldo emocional que me sostuvo hasta el final de este proyecto.

Tabla de contenido

Dedicatoria.....	2
Agradecimientos	3
Índice de Tablas	7
Índice de Figuras.....	8
Índice de Ecuaciones.....	9
Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción	12
1 Planteamiento Del Problema.....	16
2 Objetivos	19
2.1 Objetivo General.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
3 Justificación y Pertinencia Social	20
4 Marco De Referencia	23
4.1 Marco Teórico.....	23
4.1.1 Fundamentos de la Modelación Hidrológica Distribuida	23
4.1.2 Base Teórica del Modelo HydroBID	24
4.1.3 Teoría de Asignación y Optimización de Recursos (WaterALLOC)	25
4.1.4 Marco Teórico del Cambio Climático: Escenarios SSP	26
4.1.5 Conceptualización de la Oferta, Demanda e Índices	27
4.1.6 Marco Institucional y de Gobernanza	31
4.1.7 Discusión Crítica sobre los Límites de la Modelación y la Seguridad Hídrica.	31
4.2 Marco Conceptual.....	32
4.3 Marco Legal.....	34
4.4 Marco Contextual.....	36
4.4.1 Localización y Descripción General.....	36
4.4.2 Características Hydroclimatológicas	37
4.4.3 Aspectos Socioeconómicos y Usos del Suelo.....	38
4.5 Estado del Arte.....	39
4.5.1 Avances en Modelación y Escenarios Climáticos	39
4.5.2 La Modelación Hidrológica en Colombia.....	40
4.5.3 El Río Zulia y Norte de Santander	41
4.5.4 Análisis Comparativo de Herramientas de Modelación en la Literatura	42
4.5.5 Matriz de Sistematización de Antecedentes	44
5 Metodología	48
5.1 Enfoque y Alcance.....	48
5.1.1 Alcance Temporal y Escenarios de Simulación.....	49
5.1.2 Alcance Metodológico y de Gestión.....	50
5.2 Procesamiento de Información Hydroclimática	50
5.2.1 Información Cartográfica y Topológica.....	50
5.2.2 Información Hidrometeorológica Histórica.	51
5.2.3 Proyecciones Climáticas (Escenarios SSP).	51
5.3 Configuración y Calibración del Modelo de Oferta – HydroBID	52
5.3.1 Parametrización.....	52

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

5.3.2	Calibración y validación.	52
5.3.3	Simulación de Escenarios Futuros.	53
5.4	Esquematización del Modelo de Demanda – WaterALLOC.....	53
5.4.1	Sistematización de Demandas.....	53
5.4.2	Esquematización de la Red (Topología).	53
5.4.3	Simulación del Balance.....	54
5.5	Cálculo de Índices de Desempeño y Lineamientos de Gestión.	54
5.5.1	Cálculo de Índices de Desempeño Hídrico.	54
5.5.2	Formulación de Lineamientos de Gestión.	55
6	Resultados	56
6.1	Información Hydroclimática de la Cuenca	56
6.1.1	Comportamiento Histórico de la Precipitación	57
6.1.2	Comportamiento Histórico de la Temperatura	58
6.2	Modelación Hidrológica de la Oferta – HydroBID	61
6.2.1	Configuración de la red hidrográfica (AHD) y definición de las HRU	61
6.2.2	Calibración del modelo: ajuste de parámetros y métricas de bondad	62
6.2.3	Validación del modelo y bondad de ajuste.	70
6.2.4	Oferta hídrica bajo condición histórica (línea base 1989 – 2020).	72
6.2.5	Determinación del caudal ambiental y capacidad de regulación	77
6.2.6	Proyecciones hidrológicas al año 2060 por escenario SSP.....	80
6.3	Balance Hídrico y Análisis de Escasez – WaterALLOC.....	81
6.3.1	Esquema de red de flujo: nodos, arcos y prioridades de asignación.....	82
6.3.2	Balance oferta – demanda bajo escenario histórico (línea base)	84
6.3.3	Balance oferta – demanda bajo escenarios SSP al año 2060	86
6.3.4	Índice del Uso del Agua (IUA).	90
6.3.5	Índices de Desempeño del Sistema: Confiabilidad y Vulnerabilidad.	93
7	Lineamientos de Gestión Integral del Recurso Hídrico	96
8	Discusión y Conclusiones.	100
8.1	Incertidumbre y Limitaciones de la Modelación.	104
9	Recomendaciones	106
10	Referencias.....	108
11	Anexos	114

Índice de Tablas

Tabla 1. Marco Legal y Normativo Asociado a la Gestión del Recurso Hídrico y Cambio Climático.	34
Tabla 2. Estudios Relevantes sobre Modelación Hidrológica, Cambio Climático y Gestión Hídrica.	44
Tabla 3. Parámetros Físicos finales de Calibración en HydroBID.	64
Tabla 4. Métricas estadísticas de bondad de ajuste (Calibración 1990 - 2010).	65
Tabla 5. Estadísticas globales de bondad de ajuste para el periodo de Validación (2011 - 2020) exutorio de la cuenca.	70
Tabla 6. Variación porcentual de la oferta hídrica multianual proyectada frente a la línea base.	80
Tabla 7. Déficit - Período Base.	85
Tabla 8. Déficit - Período SSP 1.	87
Tabla 9. Déficit - Periodos SSP 2.	88
Tabla 10. Déficit - Período SSP 3.	89
Tabla 11. Proyección del Índice del Uso del Agua (IUA) multianual y su variación respecto al periodo base.	91
Tabla 12. Índices globales de desempeño hídrico del sistema para el exutorio de la cuenca.	93

Índice de Figuras

Figura 1. Rangos de Categorización e Interpretación del Índice de Uso del Agua (IUA).	29
Figura 2. Localización General de la Subzona Hidrográfica del Río Zulia en el Contexto Nacional y Departamental.....	37
Figura 3. Esquema Metodológico del Desarrollo de la Investigación.	48
Figura 4. Distribución espacial de la red de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca del río Zulia.	57
Figura 5. Distribución de la precipitación en la cuenca del río Zulia.	58
Figura 6. Distribución de la temperatura en la cuenca del río Zulia.	59
Figura 7. Ubicación espacial de las estaciones de calibración	63
Figura 8. Curva de Duración de Caudales Cornejo.	66
Figura 9. Hidrograma de la estación de caudal Cornejo.	67
Figura 10. Curva de Duración de Caudales Puerto León.	68
Figura 11. Hidrograma de la estación Puerto León.	69
Figura 12. Curva de duración de caudales para el periodo de Validación (2011 - 2020).	71
Figura 13. Caudal promedio anual simulado en el exutorio de la cuenca del río Zulia.	73
Figura 14. Régimen de caudales medios mensuales multianuales para el periodo base.	74
Figura 15. Hidrograma periodo base 1989 - 2020.	75
Figura 16. Curva de duración de caudales de oferta del periodo base 1989-2020.	76
Figura 17. Nodos de demanda en la cuenca del río Zulia.	82
Figura 18. Concesiones Cuenca río Zulia.	84
Figura 19. Constancia entrega información oficial de CORPONOR.	116

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Balance Hídrico.....	23
Ecuación 2. Aproximación de Onda Difusiva Lagrangiana (Modelo HydroBID).	24
Ecuación 3. Función Objetivo del Flujo de Costo Mínimo (Modelo WaterALLOC).	25
Ecuación 4. Restricción de Balance de Masas Nodal.	26
Ecuación 5. Índice de uso del agua IUA.	28
Ecuación 6. Índice de Satisfacción de Derechos.....	30
Ecuación 7. Índice de Vulnerabilidad.	30
Ecuación 8. Índice de Regulación Hídrica (IRH).	78
Ecuación 9. Volumen total del área bajo la CDC	78

Resumen

La seguridad hídrica en cuencas andinas tropicales enfrenta retos sin precedentes ante el cambio climático y la presión antrópica. La presente investigación evaluó la sostenibilidad hídrica de la Subzona Hidrográfica del río Zulia (Norte de Santander, Colombia) mediante el acoplamiento de un modelo de simulación continua a paso diario (HydroBID) y un algoritmo de optimización de asignación (WaterALLOC). Metodológicamente, se reconstruyó la línea base histórica de oferta y demanda (1989-2020) y se proyectó el balance hídrico al año 2060 bajo los escenarios climáticos SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Los resultados evidenciaron que, aunque las proyecciones climáticas sugieren incrementos volumétricos multianuales de hasta un +17.94%, el sistema padece de una severa asimetría temporal. Si bien la confiabilidad volumétrica global supera el 98%, el sistema registró déficits operativos en el 41,69% de los días evaluados, concentrando los mayores déficits en la temporada de estiaje. Esta vulnerabilidad temporal demuestra que la demanda agroindustrial y poblacional supera la capacidad física de regulación de la cuenca, generando un estrés operativo constante que compromete silenciosamente el flujo base y la integridad del ecosistema acuático. Se concluye que un incremento en la precipitación anual no equivale a mayor seguridad hídrica, evidenciando las limitaciones de la planificación basada en promedios estáticos. Por consiguiente, se formularon lineamientos técnicos de adaptación climática, proponiendo el tránsito hacia concesiones dinámicas, la implementación de telemetría y la restauración ecosistémica para garantizar la sostenibilidad operativa y ambiental de la cuenca.

Palabras clave: Seguridad hídrica, Cambio climático, HydroBID, WaterALLOC, Río Zulia, Caudal ambiental.

Abstract

Water security in tropical Andean basins faces unprecedented challenges due to climate change and anthropogenic pressure. This research evaluated the water sustainability of the Zulia River Hydrographic Subzone (Norte de Santander, Colombia) by coupling a continuous daily simulation model (HydroBID) and an allocation optimization algorithm (WaterALLOC). Methodologically, the historical baseline of water supply and demand (1989-2020) was reconstructed, and the water balance was projected to the year 2060 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP3-7.0 climate scenarios. The results showed that, although climate projections suggest multi-year volumetric increases of up to +17.94%, the system suffers from severe temporal asymmetry. While overall volumetric reliability exceeds 98%, the system recorded recurrent operational deficits in 41.69% of the evaluated days, with the greatest deficits concentrated in the dry season. This temporal vulnerability demonstrates that agro-industrial and domestic demand exceeds the physical regulation capacity of the basin, generating constant operational stress that silently compromises the base flow and the integrity of the aquatic ecosystem. It is concluded that an increase in annual precipitation does not equal greater water security, exposing the limitations of planning based on static averages. Consequently, technical guidelines for climate adaptation were formulated, proposing the transition towards dynamic concessions, the implementation of telemetry, and ecosystem restoration to guarantee the operational and environmental sustainability of the basin.

Keywords: Water security, Climate change, HydroBID, WaterALLOC, Zulia River, Environmental flow.

Introducción

La seguridad hídrica constituye el eje vertebrador del desarrollo socioeconómico y la preservación ecosistémica a nivel global. Sin embargo, este frágil equilibrio enfrenta actualmente un desafío sin precedentes derivado de la alteración del sistema climático. De acuerdo con el Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), la intensificación del ciclo hidrológico está reconfigurando drásticamente la distribución espacial y temporal de la precipitación. Bajo las nuevas narrativas de las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP), se proyecta que la disponibilidad de agua dulce en las regiones tropicales se volverá cada vez más asimétrica e incierta (Riahi et al., 2017). En este contexto, la planificación hídrica tradicional, fundamentada en la premisa de la estacionariedad climática, ha quedado obsoleta, obligando a las naciones a transitar hacia modelos de gestión dinámicos y adaptativos.

A nivel nacional, Colombia es un territorio altamente susceptible a estas perturbaciones. Sus cuencas andinas, caracterizadas por una compleja orografía y regímenes de flujo rápido, experimentan una creciente vulnerabilidad evidenciada en los reportes del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2022) y en proyecciones climáticas regionales (Pabón-Caicedo et al., 2013). Esta fragilidad climática se entrelaza con una presión antrópica acelerada, configurando escenarios críticos en regiones fronterizas como el departamento de Norte de Santander. Específicamente, la Subzona Hidrográfica del río Zulia (Código 1602) representa el epicentro de esta problemática. Esta cuenca, con una extensión de 3.484 km², es el motor agroindustrial de la región, soportando distritos de riego arroceros de gran escala, industrias termoeléctricas y el abastecimiento doméstico de quince municipios (CORPONOR, 2018).

A pesar de su importancia estratégica, la gestión del recurso hídrico en el río Zulia atraviesa una crisis estructural. Durante los periodos de estiaje, el sistema colapsa operativamente,

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

desencadenando conflictos socioambientales directos entre los usuarios ubicados aguas arriba y aguas abajo. Esta situación se ve agravada por procesos históricos de deforestación y cambio de uso del suelo que han mermado la capacidad de retención natural de la cuenca (Montenegro & Wilmer, 2023; Peñaloza et al., 2008). Históricamente, el abordaje de esta problemática por parte de las autoridades ambientales se ha fundamentado en el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) y en el ENA. Sin embargo, una revisión exhaustiva del estado del arte evidencia un vacío de conocimiento crítico: los diagnósticos recientes de la cuenca operan bajo agregados estáticos a escala mensual (Fernández-Cañas & Duarte-Sánchez, 2024) que enmascaran los extremos diarios y no integran el acoplamiento dinámico entre la oferta natural, las reglas de extracción humana y las nuevas proyecciones climáticas del AR6.

Esta limitación metodológica y técnica constituye el problema central que justifica la presente investigación. Existe una necesidad imperativa de dotar a las autoridades ambientales de herramientas técnico-científicas de alta resolución que superen el diagnóstico retrospectivo y permitan cuantificar la vulnerabilidad operativa del sistema frente al inminente cambio climático. Para cubrir esta brecha, la presente tesis de maestría tiene como objetivo general evaluar la sostenibilidad hídrica de la Subzona Hidrográfica del río Zulia a partir de la relación oferta y demanda, mediante el uso integrado de las herramientas de modelación HydroBID y WaterALLOC bajo escenarios de cambio climático, con el fin de diseñar estrategias de gestión integral del recurso.

Metodológicamente, la investigación se estructuró bajo un enfoque cuantitativo y longitudinal de simulación hidrológica continua a paso diario. Inicialmente, se implementó el modelo lluvia-escorrentía semidistribuido HydroBID (Moreda et al., 2014) para reconstruir la oferta hídrica de línea base (1989-2020) y proyectar los rendimientos futuros (2021-2060) forzados por los

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

escenarios climáticos regionalizados SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0. Posteriormente, estas series continuas se acoplaron al algoritmo de optimización de redes de flujo WaterALLOC (RTI International, 2023), permitiendo simular la asignación prioritaria del recurso entre los sectores agrícola, doméstico y otros, para finalmente calcular los índices macroscópicos de desempeño (Confiabilidad Volumétrica y Vulnerabilidad).

Los hallazgos de esta modelación integrada revelaron conclusiones de alto impacto que desafían los paradigmas actuales de gestión en la región. En primer lugar, se demostró que los escenarios de cambio climático no inducirán una desecación volumétrica anual de la cuenca (proyectando incrementos multianuales de hasta el +17%), sino que desencadenarán una asimetría temporal severa, agudizando las sequías en el primer cuatrimestre del año con reducciones de caudal de hasta un -29%; hallazgo que concuerda con las tendencias climáticas advertidas para cuencas vecinas en los Andes tropicales (Mena-Rentería et al., 2025). En segundo lugar, al evaluar la interacción humana, el modelo evidenció un fallo estructural crónico: el sistema es incapaz de satisfacer la demanda en el 41.69% del tiempo evaluado. Este déficit operativo demostró que la aparente normalidad visual del río durante los estiajes se sostiene mediante el sacrificio de la eficiencia agrícola y, de manera crítica, mediante la aniquilación del flujo base ecosistémico, lo que ha provocado la pérdida de capacidad de autodepuración del río y episodios de mortandad de fauna acuática.

Frente a este diagnóstico, el principal aporte y contribución de la investigación radica en la formulación de lineamientos técnicos de adaptación climática orientados a la política pública. El estudio trasciende el análisis matemático para proponer a la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) una ruta de modernización institucional, exigiendo el tránsito hacia concesiones dinámicas, la implementación de telemetría satelital, la exigencia

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

operativa a los sistemas de tratamiento de aguas residuales y la adopción consciente y científica del caudal ambiental.

Para dar respuesta integral a este proceso, el documento se encuentra organizado en diez capítulos. Los capítulos 1 al 5 exponen el problema, los objetivos, la justificación y los marcos de referencia (teórico, legal y contextual) y el estado del arte que sustentan la investigación. El Capítulo 6 detalla el diseño metodológico y las herramientas de simulación aplicadas. El Capítulo 7 presenta y analiza exhaustivamente los resultados de la información hidroclimática, la modelación de la oferta (HydroBID) y el balance de escasez (WaterALLOC). El Capítulo 8 desarrolla los lineamientos de gestión integral formulados. El Capítulo 9 articula la discusión crítica de los hallazgos con las conclusiones definitivas del estudio. Finalmente, el Capítulo 10 enuncia las recomendaciones dirigidas a futuros investigadores y planificadores del territorio.

1 Planteamiento Del Problema

A escala global, la gestión integral del recurso hídrico enfrenta un desafío sin precedentes debido a la alteración del sistema climático. Según el Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021), la intensificación del ciclo hidrológico no solo implica un aumento en la temperatura media global, sino modificaciones severas en los patrones de precipitación y evapotranspiración. Las proyecciones bajo las nuevas Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP) sugieren que la disponibilidad de agua dulce se volverá cada vez más incierta, exacerbando la competencia entre usos en regiones tropicales. Esta incertidumbre climática obliga a transitar de modelos de gestión estacionarios a enfoques adaptativos que consideren escenarios futuros críticos (Riahi et al., 2017).

En el contexto nacional, Colombia presenta una alta vulnerabilidad ante estos fenómenos, especialmente en sus cuencas andinas. El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2017), en su Tercera Comunicación Nacional, y estudios posteriores (Pabón-Caicedo et al., 2020), advierten sobre la reducción de la capacidad de regulación hídrica y la alteración en la frecuencia de eventos extremos como El Niño y La Niña. Estas variaciones climáticas, sumadas a la presión antrópica, amenazan la seguridad hídrica en departamentos como Norte de Santander, donde la oferta natural está siendo comprometida por la degradación de las cuencas abastecedoras.

Específicamente, la Subzona Hidrográfica del río Zulia (Código 1602), localizada en la frontera colombo-venezolana, constituye una unidad territorial estratégica para el departamento de Norte de Santander con una superficie aproximada de 3.484 km². Abarca la jurisdicción de quince entidades territoriales, incluyendo a San José de Cúcuta, capital del departamento y centro de mayor presión demográfica (CORPONOR, 2018a). Esta cuenca es vital para el abastecimiento

humano, la agroindustria y el saneamiento básico; sin embargo, enfrenta conflictos severos por el uso del agua.

La problemática se agudiza en los periodos de estiaje, donde se evidencia un desabastecimiento crítico. Las comunidades rurales reportan interrupciones en el servicio de agua potable, viéndose obligadas a captar agua cruda de canales de riego agrícola para sus necesidades domésticas, lo que genera riesgos sanitarios. En situaciones extremas, la interrupción del servicio afecta la escolaridad y obliga al abastecimiento mediante sistemas de contingencia como carrotanques (CORPONOR, 2018b). A esto se suma una presión demográfica acelerada en cinco subcuencas, lo que limita la prestación de servicios ecosistémicos y aumenta la competencia por el recurso.

Adicionalmente, la cuenca sufre procesos de deterioro físico. La deforestación y la expansión de la frontera agrícola y pecuaria han provocado la erosión de los suelos, disminuyendo la capacidad de infiltración y regulación hídrica (Montenegro & Wilmer, 2023). La compactación del suelo en las rondas hídricas altera el balance de sedimentos y degrada los tramos del río necesarios para la recuperación natural del sistema (Peñaloza et al., 2008). Este escenario actual de degradación, combinado con las proyecciones de cambio climático que sugieren aumentos de temperatura y variabilidad en los caudales (Fernández-Cañas & Duarte-Sánchez, 2024), configura un panorama de alta vulnerabilidad hídrica.

A pesar de la existencia de instrumentos de planificación como el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA), gran parte de la información disponible y los estudios previos se fundamentaban en escalas temporales mensuales o en herramientas que no integraban dinámicamente la relación oferta-demanda bajo las nuevas narrativas climáticas (SSP). Esta falta de información a paso diario sobre proyecciones hidroclimáticas limitaba la capacidad técnica para la toma de decisiones informadas y oportunas. Frente a este panorama, resultó imperativo evaluar

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

el régimen hidrológico de la cuenca mediante modelos robustos como HydroBID y WaterALLOC, herramientas que permitieron simular con alta resolución el comportamiento del sistema y cuyos resultados servirán de insumo para diseñar estrategias de adaptación al año 2060.

A partir de la anterior situación, la presente investigación resolvió la siguiente pregunta científica: *¿Qué lineamientos de gestión integral se requieren para garantizar la seguridad hídrica en la cuenca del río Zulia al año 2060, considerando las alteraciones que los escenarios de cambio climático (SSP) provocarán en la disponibilidad y demanda del recurso?*

2 Objetivos

2.1 Objetivo General

Evaluar la sostenibilidad hídrica de la Subzona Hidrográfica del río Zulia a partir de la relación oferta y demanda mediante el uso de las herramientas de modelación HydroBID y WaterALLOC, bajo escenarios de cambio climático, para el diseño de estrategias de gestión integral del recurso.

2.2 Objetivos Específicos

1. Determinar la oferta hídrica de la subzona hidrográfica mediante el modelo HydroBID, considerando la variabilidad histórica (1989–2020) y las proyecciones de cambio climático (SSP1–2.6, SSP2–4.5 y SSP3–7.0) para el año 2060.
2. Analizar el balance hídrico y los índices de satisfacción de la demanda en los escenarios actuales y futuros mediante el modelo WaterALLOC, integrando la oferta simulada y la demanda de los usos prioritarios del sistema.
3. Formular lineamientos de gestión integral del recurso hídrico orientados a la optimización de la asignación y la reducción de la vulnerabilidad hídrica.

3 Justificación y Pertinencia Social

La presente investigación cobra relevancia estratégica al alinearse directamente con la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) de Colombia, la cual establece como directriz fundamental "garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico mediante una gestión y un uso eficiente y eficaz, articulados al ordenamiento y uso del territorio" (MinAmbiente, 2010). En un contexto donde la demanda hídrica ha superado el crecimiento demográfico y la variabilidad climática amenaza la oferta natural, este estudio aporta herramientas técnicas para materializar dicha política en la cuenca del río Zulia, trascendiendo el diagnóstico hacia la proposición de índices para la adaptación climática.

Desde la perspectiva científica y metodológica, la investigación aborda una brecha crítica en la modelación hidrológica regional. Si bien existían estudios previos sobre el balance hídrico, en su mayoría se basaban en escalas temporales mensuales que enmascaraban los eventos extremos y la variabilidad diaria del caudal. La implementación del modelo HydroBID, desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), permitió simular la hidrología a paso diario, reduciendo la incertidumbre en la estimación de la oferta (Moreda et al., 2014). A su vez, la integración con el modelo WaterALLOC constituyó un avance significativo respecto a los balances estáticos tradicionales, ya que posibilitó modelar dinámicamente la asignación del agua entre usuarios (agrícola, doméstico y otros), proporcionando una representación fidedigna de la complejidad del sistema hídrico (RTI International, 2023).

En cuanto a la relevancia climática, el estudio actualizó las proyecciones locales al incorporar los nuevos escenarios de cambio climático basados en las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés) del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021). Al utilizar la información de la Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM) y forzar los modelos con estas nuevas narrativas (SSP1-

2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0), la investigación superó la obsolescencia de estudios basados en escenarios anteriores (RCP), ofreciendo a los tomadores de decisiones un panorama de riesgos hídricos actualizado al año 2060.

Desde una perspectiva histórica y socioambiental, el asentamiento y desarrollo de las comunidades de Norte de Santander han estado intrínsecamente ligados a la proximidad de los cuerpos de agua, siendo el río Zulía el eje vertebrador de la dinámica social y productiva de la región. Sin embargo, esta dependencia ancestral se enfrenta hoy a un punto de inflexión: la alteración del régimen hidrológico amenaza con romper el equilibrio que ha permitido la subsistencia tanto de estas poblaciones como de los ecosistemas que las integran. Por tanto, la pertinencia de este estudio radicó en la necesidad urgente de comprender estas nuevas dinámicas cuantitativas para salvaguardar el patrimonio hídrico.

En este contexto, el proyecto contribuye directamente a las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), específicamente el ODS 6 (Agua limpia y saneamiento). La utilización de modelos de asignación como WaterALLOC permitió cuantificar de manera objetiva el estrés hídrico de la cuenca y evaluar su vulnerabilidad frente a las proyecciones climáticas. Esto proporcionó una base técnica robusta que permitió formular lineamientos de gestión orientados a priorizar el consumo humano y la seguridad alimentaria (UNESCO WWAP, 2019), garantizando a su vez la visibilización de la necesidad del caudal ambiental para los ecosistemas acuáticos.

De esta manera, la modelación matemática trasciende el ejercicio académico para convertirse en un instrumento de planificación vital. Los hallazgos y lineamientos de esta tesis se constituirán como un insumo técnico para la sociedad y entidades como la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR) en tres frentes fundamentales:

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

- **Reducción de conflictos:** Proveerá a las comunidades y a los entes territoriales de información científica imparcial, fundamental para la futura resolución de disputas por el agua en épocas de estiaje y escasez.
- **Planificación resiliente:** Servirá de guía conceptual y cuantitativa para que las autoridades ambientales y alcaldías municipales puedan transitar de una gestión reactiva (limitada a la atención de emergencias) a una gestión preventiva, fundamentada en la adaptación anticipada al cambio climático (Global Water Partnership [GWP], 2000).
- **Empoderamiento comunitario:** Facilitará la generación de conocimiento accesible sobre el futuro hídrico del territorio, propiciando que la sociedad civil pueda participar de manera informada en la construcción de políticas públicas y en el fortalecimiento de la gobernanza alrededor de esta unidad hidrológica.

4 Marco De Referencia

4.1 Marco Teórico

El presente marco teórico estableció los fundamentos científicos, matemáticos y conceptuales que sustentaron la simulación del ciclo hidrológico y la gestión de la oferta y demanda en la cuenca del río Zulia. Se estructuró en cuatro ejes: la modelación hidrológica distribuida, la teoría de asignación de recursos, las nuevas narrativas sobre el cambio climático y la institucionalidad del agua.

4.1.1 Fundamentos de la Modelación Hidrológica Distribuida

La modelación hidrológica se define como la representación simplificada de un sistema real complejo mediante expresiones matemáticas y lógicas (Chow et al., 1994). Para efectos de esta investigación, se adoptó el enfoque de modelación distribuida, que, a diferencia de los modelos agregados, considera la variabilidad espacial de los parámetros físicos (tipo de suelo, cobertura, pendiente) y divide la cuenca en unidades discretas de respuesta. El principio físico rector es la Ley de Conservación de Masa (Ecuación de Balance Hídrico), que establece que el cambio en el almacenamiento de un volumen de control es igual a la diferencia entre las entradas y las salidas (Gupta et al., 2005):

Ecuación 1.

Balance Hídrico.

$$\frac{ds}{dt} = I(t) - O(t)$$

Donde:

ds/dt es la tasa de cambio del almacenamiento en el tiempo.

$I(t)$ son las entradas (Precipitación P).

O(t) son las salidas (Evapotranspiración *ET*, Infiltración *Inf*, Escorrentía *Q*).

Este enfoque permitió simular no solo el caudal de salida, sino también los procesos internos de la cuenca, lo cual resulta indispensable para la gestión territorial del río Zulia.

4.1.2 Base Teórica del Modelo HydroBID

HydroBID es un sistema integrado desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) que acopla una base de datos de hidrografía analítica (AHD) con un modelo hidrológico físico. A diferencia de modelos como SWAT o HEC-HMS que utilizan el método del Número de Curva o el Hidrograma Unitario tradicional, HydroBID fundamenta su tránsito de avenidas en una formulación lagrangiana (Moreda et al., 2014).

Aproximación de Onda Difusiva Lagrangiana (LWD).

El núcleo del modelo utiliza la aproximación de onda difusiva para resolver las ecuaciones de Saint-Venant. La formulación lagrangiana permite simular el movimiento de parcelas de agua a través de la red de drenaje, lo que reduce los errores numéricos asociados a la discretización espacial fija. La ecuación que gobierna el flujo en HydroBID se puede expresar como una solución a la ecuación de advección-difusión (Moreda et al., 2014; RTI, 2018).

Ecuación 2.

Aproximación de Onda Difusiva Lagrangiana (Modelo HydroBID).

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0$$

Donde:

Q es el caudal.

c es la celeridad de la onda (velocidad de propagación).

D es el coeficiente de difusión hidráulica.

Esta formulación es teóricamente superior para cuencas con topografía compleja como las de la región andina, ya que permite capturar la atenuación del hidrograma y el tiempo de viaje del flujo con mayor precisión física que los métodos empíricos (Cunha et al., 2021).

Unidades de Respuesta Hidrológica.

HydroBID opera sobre la Analytical Hydrography Dataset (AHD), que representa la cuenca como un grafo topológico de captaciones conectadas. Cada unidad de drenaje (Catchment) funciona como un volumen de control donde se calculan los balances verticales de humedad del suelo antes de transitar el flujo lateralmente hacia el cauce principal (Moreda et al., 2014).

4.1.3 Teoría de Asignación y Optimización de Recursos (WaterALLOC)

La gestión de la demanda se aborda mediante la teoría de Redes de Flujo. El modelo WaterALLOC se basa en los principios del modelo MODSIM, el cual conceptualiza la cuenca como una red de nodos (fuentes, demandas, embalses) y arcos (ríos, canales) (Labadie, 2010).

El problema de asignación de agua se resuelve matemáticamente como un problema de optimización de flujo de costo mínimo. En cada paso de tiempo, el modelo busca satisfacer las demandas minimizando las penalizaciones asociadas al déficit, sujeto a restricciones físicas y legales (RTI International, 2023):

Ecuación 3.

Función Objetivo del Flujo de Costo Mínimo (Modelo WaterALLOC).

$$\text{Minimizar } Z = \sum_{l \in L} c_l \cdot q_l$$

Sujeto a:

Ecuación 4.*Restricción de Balance de Masas Nodal.*

$$\sum_{l \in Entradas_n} q_l - \sum_{l \in Salidas_n} q_l = 0 \quad \forall n \in N$$

Donde:

c_l es el "costo" o prioridad asignada al arco l (el agua para consumo humano tiene un "costo" negativo muy alto para asegurar su prioridad sobre la agricultura).

q_l es el flujo en el arco l .

La segunda ecuación representa la conservación de masa en cada nodo n (Ley de Kirchhoff para redes hidráulicas).

Esta base teórica es la que permitió a la investigación simular no solo cuánta agua hay, sino quién recibe agua y quién no durante una sequía, aplicando las prioridades de la Ley 99 de 1993.

4.1.4 Marco Teórico del Cambio Climático: Escenarios SSP

La investigación adoptó el marco conceptual del Sexto Informe de Evaluación (AR6) del IPCC. Se transita del concepto de Forzamiento Radiativo (RCPs) al de Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs).

Los SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) integran las proyecciones de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) con narrativas sobre desarrollo futuro (Riahi et al., 2017). Para el río Zulia, se analizaron tres trayectorias teóricas:

SSP1-2.6 (Sostenibilidad): Asume un mundo que transita hacia límites verdes, representando el escenario optimista de mitigación.

SSP2-4.5 (Camino Medio): Escenario de tendencias actuales, donde los patrones sociales y económicos evolucionan sin cambios disruptivos mayores.

SSP3-7.0 (Rivalidad Regional): Representa un resurgimiento del nacionalismo y conflictos regionales, con altas emisiones y baja cooperación para la adaptación (O'Neill et al., 2016).

La aplicación de estos escenarios generalmente requiere procesos de Downscaling (reducción de escala), dado que los Modelos de Circulación General (GCM) tienen resoluciones muy gruesas (>100 km) que no capturan la orografía de los Andes (Pabón-Caicedo et al., 2020).

4.1.5 Conceptualización de la Oferta, Demanda e Índices

Oferta Hídrica Total y Superficial.

Para efectos de esta investigación y en concordancia con la modelación hidrológica física, la oferta hídrica se define como el volumen total de agua que escurre por la superficie de la cuenca y se concentra en la red de drenaje, resultado de la interacción entre la precipitación, la evapotranspiración y las características del suelo (IDEAM, 2022). Esta variable corresponde a la disponibilidad natural del sistema simulada por el modelo lluvia-escorrentía, antes de cualquier extracción antrópica o restricción normativa. En cuanto a la demanda, se ingresó como una serie de tiempo continua basada en el caudal concesionado por la autoridad ambiental, asumiendo una demanda constante equivalente a la asignación legal máxima. Esto permite evaluar la garantía de suministro bajo condiciones de máxima presión sobre el recurso.

Índice de Uso del Agua (IUA).

Es el indicador principal de presión sobre el recurso, definido teóricamente por la relación porcentual entre la demanda hídrica sectorial (D) y la oferta hídrica disponible (O) (IDEAM, 2019):

Ecuación 5.

Índice de uso del agua IUA.

$$IUA_j = \frac{DHMN_j}{OHDS_j} \times 100$$

Donde,

IUA_j Índice de uso del agua en la unidad espacial de referencia j para condición hidrológica promedio o de año seco (%).

$DHMN_j$ Demanda Hídrica Multisectorial en la unidad espacial de referencia j (Mn3/año).

$OHDS_j$ Oferta Hídrica Disponible Superficial en la unidad espacial de referencia j para condición hidrológica promedio o de año seco (Mn3/año).

En la OHDS el factor de reducción corresponde solamente al caudal ambiental.

Este índice constituye una métrica de diagnóstico fundamental en la planificación hidrológica, ya que permite clasificar el nivel de estrés al que está sometida una cuenca y establecer alertas tempranas para la gestión de la demanda frente a épocas de escasez.

Figura 1

Rangos de Categorización e Interpretación del Índice de Uso del Agua (IUA).

Rango Índice de Uso del Agua	R	G	B	Categoría	Interpretación Índice de Uso del Agua
> 100	170	0	0	Crítico	La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible
50,01 - 100	255	0	0	Muy alto	La presión de la demanda es muy alta respecto a la oferta superficial disponible
20,01 - 50	255	170	0	Alto	La presión de la demanda es alta respecto a la oferta superficial disponible
10,01 - 20	255	255	0	Moderado	La presión de la demanda es moderada respecto a la oferta superficial disponible
1,0 - 10	150	230	0	Bajo	La presión de la demanda es baja respecto a la oferta superficial disponible
≤ 1	0	160	170	Muy bajo	La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible
Sin Información	255	255	255	S.I.	-

Nota. La figura presenta la escala de colores RGB y la clasificación del riesgo según la normativa nacional. Tomado de la Hoja Metodológica del Estudio Nacional del Agua, por IDEAM, 2022.

4.1.5.3 Índices de Desempeño del Sistema (WaterALLOC).

Complementario al IUA, y con el fin de evaluar la gestión operativa de las concesiones bajo escenarios de cambio climático, se adoptaron los indicadores dinámicos de desempeño de sistemas hídricos propuestos por Hashimoto et al. (1982):

4.1.5.3.1 Índice de Satisfacción de Derechos (Confiabilidad Volumétrica).

Este indicador evalúa la capacidad del sistema hídrico para cumplir con los volúmenes de agua concesionados o demandados por los usuarios. No implica la medición del consumo real en campo, sino la simulación de la garantía de suministro. Se define como la proporción del volumen de agua que el modelo logra asignar respecto al volumen total solicitado en los derechos de agua (UNESCO, 1987).

Ecuación 6.

Índice de Satisfacción de Derechos.

$$R_v = \left(\frac{\sum_{t=1}^T Q_{suministrado}(t)}{\sum_{t=1}^T Q_{demanda}(t)} \right) \times 100$$

Donde:

R_v es la confiabilidad volumétrica (%).

$Q_{suministrado}$ es el caudal asignado por el modelo.

$Q_{demanda}$ es el caudal de la concesión.

Índice de Vulnerabilidad.

Este índice cuantifica la severidad de los déficits cuando el sistema falla. Representa el volumen promedio faltante durante los periodos de escasez, permitiendo estimar la magnitud del impacto potencial sobre los sectores productivos (Loucks & Van Beek, 2017).

Ecuación 7.

Índice de Vulnerabilidad.

$$V = \frac{\sum_{t \in F} (Q_{demanda}(t) - Q_{suministrado}(t))}{N_f}$$

Donde:

V es la vulnerabilidad en (m^3/s).

$Q_{suministrado}$ es el caudal asignado por el modelo.

$Q_{demanda}$ es el caudal de la concesión.

N_f corresponde al número de eventos donde la demanda no pudo ser satisfecha completamente.

4.1.6 Marco Institucional y de Gobernanza

La investigación se enmarcó en la estructura del Sistema Nacional Ambiental (SINA) de Colombia. Las entidades teóricamente relevantes para el flujo de datos y toma de decisiones en el proyecto son:

- MinAmbiente: Ente rector de la política (PNGIRH) y definidor de los lineamientos de cambio climático (Ley 1931 de 2018).
- IDEAM: Entidad encargada del levantamiento y manejo de la información científica e hidrológica (Ley 99 de 1993).
- CORPONOR: Autoridad ambiental regional, administradora del recurso en la cuenca del Zulia y responsable de la implementación del POMCA (Decreto 1076 de 2015).

4.1.7 Discusión Crítica sobre los Límites de la Modelación y la Seguridad Hídrica.

Aunque la arquitectura algorítmica de modelos como HydroBID y WaterALLOC representa el estado del arte en la simulación distribuida, su aplicación exige una postura crítica frente a la incertidumbre inherente a la modelación ambiental. Desde una perspectiva epistemológica, un modelo hidrológico no es una réplica exacta de la realidad, sino una simplificación matemática sometida a la hipótesis de equifinalidad (Beven, 2006); es decir, múltiples combinaciones de parámetros físicos pueden generar resultados de caudal de salida similares, lo que introduce un grado de incertidumbre paramétrica ineludible.

En el contexto de la seguridad hídrica, la literatura reciente advierte sobre el riesgo de interpretar las proyecciones climáticas (SSPs) como un destino determinístico. Los modelos de evaluación de recursos hídricos operan bajo el supuesto de estacionariedad en las reglas de operación antrópica, lo cual rara vez se cumple en territorios andinos con gobernanza compleja. Por tanto, la seguridad

hídrica cuantificada en esta investigación no debe entenderse como un dictamen absoluto, sino como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones bajo incertidumbre profunda, donde los resultados matemáticos marcan tendencias prospectivas, pero requieren ser complementados con el conocimiento territorial y el monitoreo adaptativo.

4.2 Marco Conceptual

Balance Hídrico. Se define como la aplicación del principio de conservación de la masa al ciclo hidrológico de una cuenca, permitiendo cuantificar la disponibilidad de agua mediante la relación entre las entradas (precipitación), las salidas (evapotranspiración, escorrentía, demanda) y el cambio en el almacenamiento durante un periodo determinado. Es la herramienta base para determinar si existe déficit o superávit en el sistema (Sokolov & Chapman, 1974; IDEAM, 2022).

Cambio Climático. Referido a la variación estadísticamente significativa del estado medio del clima o de su variabilidad, que persiste durante un periodo prolongado (generalmente decenios o más). Este fenómeno se atribuye directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (IPCC, 2018; UN-Climate Change, 2021).

Demanda Hídrica. Corresponde al volumen de agua requerido por los diferentes usuarios (domésticos, agrícolas, industriales, pecuarios, entre otros) para satisfacer sus necesidades consuntivas y no consuntivas en un tiempo y lugar determinados. Esta variable depende de factores socioeconómicos, tecnológicos y culturales, y su cálculo es indispensable para establecer conflictos por uso en la planificación de cuencas (IDEAM, 2019; UNESCO WWAP, 2021).

Escenarios de Cambio Climático (SSP). Las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés) son la nueva generación de escenarios climáticos utilizados por el IPCC. Estos no solo proyectan las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que integran narrativas

sobre posibles futuros desarrollos socioeconómicos (demografía, economía, tecnología), permitiendo analizar cómo diferentes políticas de sostenibilidad podrían mitigar o exacerbar el calentamiento global al año 2100 (Riahi et al., 2017).

Gestión del Riesgo. Es el proceso social y técnico de planificación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y la promoción de una mayor conciencia del mismo. En el contexto hídrico, busca prevenir o reducir la vulnerabilidad ante eventos extremos como sequías o inundaciones, garantizando la continuidad de los servicios ecosistémicos y la seguridad humana (UNGRD, 2012; UNDRR, 2020).

Modelación Hidrológica. Se entiende como la representación simplificada de un sistema real complejo (la cuenca) mediante expresiones matemáticas y lógicas para simular los procesos del ciclo hidrológico. Estos modelos, como HydroBID, son herramientas esenciales para predecir el comportamiento del flujo de agua bajo condiciones cambiantes, como el uso del suelo o el clima, donde la observación directa no es posible o suficiente (Gupta et al., 2005; Moreda et al., 2014).

Oferta Hídrica. Representa la cantidad de agua superficial y subterránea disponible en una cuenca hidrográfica para satisfacer las demandas ecosistémicas y antrópicas. Se clasifica en oferta neta y total, y su estimación depende de la precipitación, la capacidad de regulación de los suelos y las características morfométricas de la zona de estudio, siendo variable en el tiempo y el espacio (IDEAM, 2022; MinAmbiente, 2010).

Seguridad Hídrica. Capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, el bienestar humano y el desarrollo socioeconómico, garantizando al mismo tiempo la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y la preservación de los ecosistemas (UN-Water, 2013).

Sostenibilidad Hídrica. Es la gestión del recurso hídrico que asegura la satisfacción de las necesidades actuales de la sociedad y los ecosistemas sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades. Implica un equilibrio dinámico entre la disponibilidad física del agua, la eficiencia en su uso y la equidad en su distribución (Brundtland, 1987; Global Water Partnership, 2018).

Vulnerabilidad (Climática). Grado en que un sistema es susceptible o incapaz de afrontar los efectos adversos del cambio climático, incluidos la variabilidad climática y los fenómenos extremos. La vulnerabilidad está en función del carácter, la magnitud y la rapidez del cambio climático al que está expuesto un sistema, así como de su sensibilidad y su capacidad de adaptación (IPCC, 2014; Magrin, 2015).

4.3 Marco Legal

El desarrollo de la presente investigación se enmarcó en la normatividad ambiental colombiana vigente, la cual establece los lineamientos para la planificación de cuencas, el uso eficiente del agua y la adaptación al cambio climático. En la Tabla 1 se presenta la matriz legal aplicable:

Tabla 1

Marco Legal y Normativo Asociado a la Gestión del Recurso Hídrico y Cambio Climático.

Norma / Instrumento	Objetivo General / Descripción	Aplicabilidad al Proyecto de Investigación
Ley 99 de 1993 Congreso de la República	Crea el Ministerio del Medio Ambiente y organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA). Establece la protección de cuencas abastecedoras y la prioridad del consumo humano.	Fundamenta la institucionalidad (CORPONOR). El proyecto se alinea con el principio de prevalencia del consumo humano al evaluar la oferta hídrica para abastecimiento en el Zulia.
Ley 373 de 1997 Congreso de la República	Establece el programa para el uso eficiente y el ahorro del agua. Obliga a implementar planes para optimizar el consumo y reducir pérdidas.	El modelo WaterALLOC permitió identificar ineficiencias en la asignación actual y cuantificar la magnitud del déficit hídrico.
Ley 1931 de 2018	Establece directrices para la gestión del cambio climático, buscando reducir la	Es el marco rector de la tesis. El estudio responde a esta ley generando escenarios

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Norma / Instrumento	Objetivo General / Descripción	Aplicabilidad al Proyecto de Investigación
Congreso de la República	vulnerabilidad y promover la adaptación y mitigación en la planificación territorial.	SSP para la adaptación planificada en la cuenca al año 2060.
Decreto Único 1076 de 2015	Compila la normatividad del sector ambiente (incluye dec. 1640/2012). Regula la planificación, ordenación y manejo de cuencas hidrográficas (POMCAS).	El proyecto actualiza el diagnóstico del POMCA del río Zulia con modelación hidrológica a paso diario, fortaleciendo este instrumento de planificación.
MinAmbiente (MADS)		
Decreto 2245 de 2017	Reglamenta el acotamiento de las rondas hídricas como áreas de protección ecológica para la conservación del cauce y regulación hidrológica.	Justifica técnicamente la protección de riberas para mantener la capacidad de regulación simulada en HydroBID, mitigando la erosión identificada en el problema.
MinAmbiente (MADS)		
Política Nal. Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010-2022)	Estrategia para garantizar la sostenibilidad hídrica mediante gestión de Oferta, Demanda, Calidad, Riesgo, Fortalecimiento y Gobernabilidad.	El proyecto aborda integralmente la política: cuantifica la Oferta, modela la Demanda y gestiona el Riesgo climático mediante simulación numérica.
MinAmbiente		
Política Nacional de Cambio Climático (2014)	Incorpora la gestión del cambio climático en decisiones públicas para un desarrollo resiliente y bajo en carbono.	La tesis materializa esta política a escala local, proveyendo datos prospectivos que permiten transitar hacia una gestión resiliente en el Zulia.
MinAmbiente		
Resolución 0751 de 2018	Adopta la Guía Técnica para los Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico (PORH), definiendo criterios de calidad y destinación.	Los resultados del balance hídrico y zonas de déficit (WaterALLOC) son insumos técnicos base para la futura reglamentación de usos que exige el PORH.
MinAmbiente (MADS)		
Política Nacional del Agua (2026-2050), MinAmbiente.	Actualiza los lineamientos de gobernanza, seguridad hídrica y sostenibilidad frente a la variabilidad climática extrema.	Actúa como marco rector actualizado que fundamenta la formulación de los lineamientos prospectivos y de adaptación de esta investigación.

Nota. Elaboración propia basada en la normatividad ambiental vigente en Colombia (2025).

4.4 Marco Contextual

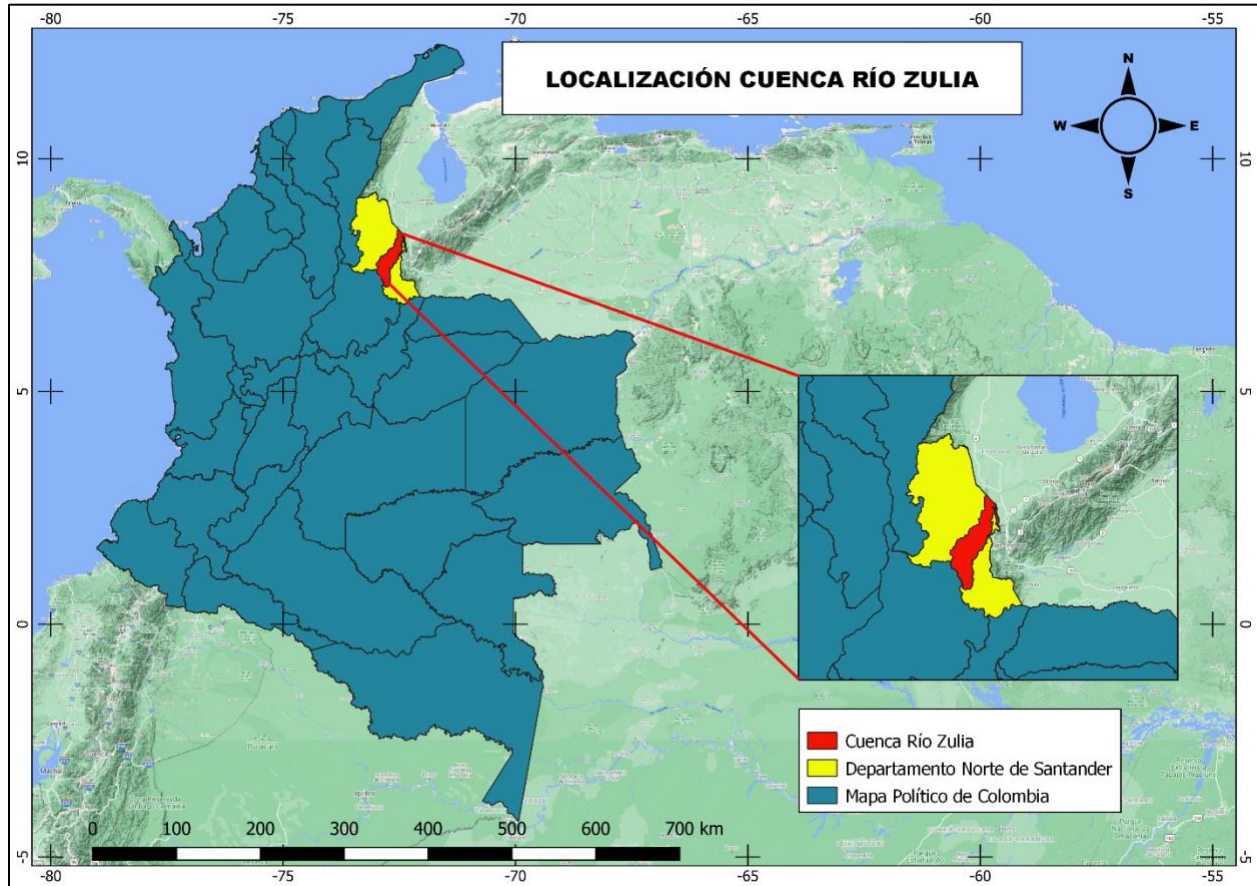
4.4.1 Localización y Descripción General

La investigación se desarrolló en la Subzona Hidrográfica del Río Zulia (código 1602), ubicada en el departamento de Norte de Santander, al nororiente de la región andina colombiana, sobre la frontera con la República Bolivariana de Venezuela. Esta unidad hidrográfica abarca una superficie aproximada de 3.484 km² y comprende, total o parcialmente, la jurisdicción de quince (15) municipios: Arboledas, Bochalema, Cúcuta, Cucutilla, Durania, El Zulia, Gramalote, Mutiscua, Pamplona, Puerto Santander, Salazar, San Cayetano, Santiago, Silos y Tibú (CORPONOR, 2018).

Geográficamente, la cuenca presenta un gradiente altitudinal significativo que va desde los 45 m.s.n.m. en su desembocadura (Puerto Santander) hasta los 4.306 m.s.n.m. en las zonas de nacimiento sobre la Cordillera Oriental. Esta variación topográfica condiciona la diversidad de pisos térmicos y ecosistemas estratégicos, incluyendo áreas de especial importancia ecológica como el Páramo de Santurbán, vital para la regulación hídrica regional.

Figura 2

Localización General de la Subzona Hidrográfica del Río Zulia en el Contexto Nacional y Departamental.



Nota. El mapa ilustra la ubicación espacial de la cuenca (en rojo) dentro del departamento de Norte de Santander (en amarillo) y su posición relativa en Colombia. Elaboración propia (2025).

4.4.2 Características Hidroclimatológicas

La red hídrica principal está articulada por el río Zulia, el cual recibe aportes de afluentes mayores como los ríos La Plata, Pamplonita, Salazar, Arboledas, Cucutilla y Sulasquilla, así como de las quebradas Ocarena, Cuperena y Seca. El régimen de precipitación en la zona exhibe una marcada variabilidad espacial, con valores medios anuales que oscilan entre los 1.035 mm en las zonas más

secas y los 3.106 mm en los sectores de mayor pluviosidad, registrando los máximos en los municipios de Salazar, Arboledas, Cucutilla y Puerto Santander (CORPONOR, 2018).

En concordancia con la altitud, el comportamiento térmico varía drásticamente. La temperatura media anual en la cuenca baja fluctúa entre 23.1 °C y 28.4 °C, favoreciendo el desarrollo de cultivos tropicales; mientras que en la cuenca alta, correspondiente a municipios como Mutiscua, Arboledas y Cucutilla, las temperaturas descienden al rango de 3.1 °C a 11 °C, características de ecosistemas de alta montaña y páramo.

4.4.3 Aspectos Socioeconómicos y Usos del Suelo

La vocación productiva de la cuenca ejerce una presión considerable y multisectorial sobre la oferta hídrica. Según el diagnóstico del POMCA (CORPONOR, 2018), aunque la actividad predominante en términos de extensión territorial es la ganadería extensiva, la dinámica de consumo se intensifica en la cuenca media y baja debido a dos grandes motores económicos. Por un lado, la agricultura intensiva, dominada por los cultivos de arroz y palma de aceite, demanda grandes volúmenes de agua para distritos de riego.

Por otro lado, el sector industrial juega un rol determinante en el municipio de San Cayetano, donde la operación de la central termoeléctrica Termotasajero ejerce una demanda significativa sobre el sistema hídrico para sus procesos de generación y enfriamiento. Esta extracción industrial compite espacial y temporalmente con los usos agropecuarios y el abastecimiento humano. Esta compleja configuración de usuarios competitivos (agrícola, energético y doméstico), sumada a las áreas de conservación estratégica en la parte alta, define la heterogeneidad del sistema que fue objeto de modelación y de balance en la presente investigación.

4.5 Estado del Arte

La investigación sobre la gestión integral del recurso hídrico bajo escenarios de cambio climático ha evolucionado significativamente en la última década. El enfoque científico ha transitado de la estimación estática de caudales medios hacia la implementación de modelos distribuidos y dinámicos que integran la variabilidad climática, los cambios en el uso del suelo y la competencia entre usuarios. A continuación, se presenta una revisión crítica de los avances científicos a nivel internacional, nacional y local, estableciendo la base teórica y metodológica que sustentó la presente investigación.

4.5.1 *Avances en Modelación y Escenarios Climáticos*

En el contexto global, la seguridad hídrica ha impulsado el desarrollo de herramientas de simulación avanzadas. En Europa, Francés & Bussi (2014) implementaron el modelo TETIS en la cuenca del río Ésera (España), integrando escenarios climáticos A2 y B2. Su investigación demostró que la disminución de las precipitaciones altera drásticamente la dinámica de sedimentos, hallazgo crucial para cuencas de alta montaña. Paralelamente, en Alemania, Ley et al. (2025) utilizaron modelos conceptuales en la cuenca Ems para evaluar proyecciones a largo plazo, concluyendo que las alteraciones hidrológicas son heterogéneas, validando la necesidad de herramientas de simulación que operen a escalas temporales diarias.

En Latinoamérica, la región andina ha sido un laboratorio para la aplicación de la suite HydroBID. El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha documentado casos exitosos como el de Muñoz-Castillo et al. (2018) en la cuenca del río Piura (Perú). En este estudio, se utilizó HydroBID para modelar eventos extremos bajo escenarios de cambio climático, logrando calibrar el modelo en una zona con alta variabilidad intraanual, metodología que sirvió de referente directo para cuencas binacionales con regímenes similares al Zulia.

En el Cono Sur, Villalobos (2020) evaluó la cuenca del río Maule en Chile bajo escenarios RCP 2.6 y 8.5, proyectando reducciones del 20% en la escorrentía superficial debido al aumento de la evapotranspiración. En contraste, Arbuét et al. (2021), al aplicar HydroBID en la cuenca del río Los Padres (Argentina) para el periodo 2080-2100, encontraron un posible aumento del 18% en la escorrentía anual debido a la intensificación de lluvias extremas. Esta divergencia de resultados subraya la importancia de realizar estudios localizados y no generalizar los efectos del cambio climático.

México también presenta antecedentes significativos con el trabajo de Vázquez-Ochoa et al. (2021) en la cuenca del río Soto la Marina. Al integrar variables de calidad y cantidad bajo RCP 4.5 y 8.5, identificaron que los escenarios intermedios pueden presentar efectos más adversos que los extremos en ciertas variables, lo que justificó la evaluación de todo el abanico de posibilidades (SSP) abordada en esta tesis.

4.5.2 La Modelación Hidrológica en Colombia

Colombia ha avanzado hacia la integración de nuevas narrativas climáticas en la planificación hídrica. El IDEAM (2022), en el Estudio Nacional del Agua, establece la línea base de amenaza hídrica, pero la escala nacional a menudo enmascara realidades locales, haciendo necesaria la modelación a escala de cuenca ejecutada en este estudio.

Un antecedente fundamental es el desarrollado por Arango Figueroa (2024) en la cuenca del río Coello (Tolima). Este estudio constituyó el referente metodológico más cercano a la presente tesis, al integrar exitosamente HydroBID y WaterALLOC bajo los nuevos escenarios SSP (2.6, 4.5 y 7.0). Sus resultados alertaron sobre un déficit de caudales superior al 100% en escenarios críticos, validando la capacidad de estas herramientas para cuantificar la demanda no satisfecha en distritos de riego.

Asimismo, Mena-Rentería et al. (2020) realizaron una investigación clave titulada "Modelación de los impactos de los escenarios de cambio climático en la cuenca del Río Pamplonita". Aunque la cuenca es vecina, el análisis metodológico es de relevancia nacional al aplicar HydroBID con modelos CORDEX. A diferencia de otros estudios, encontraron tendencias de aumento significativo en la precipitación para ciertos periodos, desafiando la narrativa de sequía generalizada y obligando a considerar escenarios de exceso hídrico en la gestión del riesgo, tal como se analizó en la cuenca del Zulia.

Complementariamente, investigaciones en cuencas andinas como la del río Lebrija, realizadas por Castillo (2018), han utilizado HydroBID para evaluar la incidencia del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca alta. Sus conclusiones resaltan la sensibilidad de los caudales base ante variaciones de temperatura, insumo que resultó vital al momento de calibrar los parámetros de recarga de aguas subterráneas en modelos distribuidos.

4.5.3 El Río Zulia y Norte de Santander

A escala regional, el departamento de Norte de Santander presenta una alta vulnerabilidad hidroclimática. El estudio de Díaz González & Suárez Rodríguez (2019) sobre el pronóstico de sequías en la cuenca del río Pamplonita es un antecedente local directo. Mediante la regionalización de parámetros en HydroBID, estimaron disminuciones de caudal entre el 6,10% y el 10,8%, proporcionando un rango de magnitudes esperadas para la región que permitió validar la coherencia de los resultados obtenidos en el Zulia.

Específicamente para la cuenca del río Zulia, el POMCA (CORPONOR, 2018) constituye el principal insumo de diagnóstico. Sin embargo, su balance hídrico se fundamentó en series históricas y metodologías que no incorporaban la dinámica diaria de los nuevos escenarios SSP. Recientemente, Fernández-Cañas & Duarte-Sánchez (2025) publicaron una evaluación de la oferta

hídrica del río Zulia ante escenarios de cambio climático. Si bien es un aporte valioso, su análisis utilizó modelos agregados y a paso mensual, dejando un vacío de conocimiento respecto a la simulación diaria distribuida que permite HydroBID para capturar eventos extremos.

En cuanto a los factores de degradación que afectan la modelación, Montenegro & Wilmer (2023) caracterizaron la deforestación y erosión en la cuenca, concluyendo que la pérdida de cobertura vegetal ha disminuido la capacidad de regulación hídrica. Estos datos fueron esenciales para ajustar los parámetros de uso del suelo (CN) en HydroBID. Finalmente, estudios sobre la calidad del agua y demanda agrícola, como los de Gélvez & Rolón (2018), evidencian la presión del sector arrocerero, lo que justifica la necesidad de haber implementado el modelo WaterALLOC para evaluar la asignación y el nivel de estrés del recurso.

La revisión evidenció que, aunque existían aplicaciones de HydroBID en los Andes y diagnósticos en el Zulia, persistía una brecha clara: no había una evaluación integrada que combinara la modelación hidrológica diaria (HydroBID) con un modelo de asignación (WaterALLOC) bajo los escenarios SSP para esta subzona. La mayoría de estudios locales eran estáticos o mensuales, perdiendo la capacidad de simular la gestión operativa. Esta tesis cubrió dicho vacío, proporcionando una herramienta de planificación actualizada al año 2060.

4.5.4 Análisis Comparativo de Herramientas de Modelación en la Literatura

A partir de la revisión bibliográfica, se evidenció una discusión académica vigente sobre la idoneidad de las diferentes herramientas de modelación para cuencas andinas tropicales. La literatura clasifica los enfoques en tres grandes grupos, cuyos hallazgos justificaron la selección metodológica de esta tesis.

4.5.4.1 Modelos Globales vs. Modelos Distribuidos.

Investigaciones como la de Krysanova et al. (2018) resaltan que los modelos globales a gran escala suelen subestimar los picos de caudal en cuencas de montaña debido a que suavizan la topografía.

En contraste, estudios aplicados con HydroBID en Perú y Colombia (Muñoz-Castillo et al., 2018; Mena-Rentería et al., 2020) demostraron que su base de datos, la Analytical Hydrography Dataset (AHD), permite una discretización de la cuenca en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) mucho más fina que modelos tradicionales como el HEC-HMS agregado. Para el río Zulia, esto implicó que HydroBID pudo capturar la respuesta hidrológica de microcuencas específicas donde se ubican las bocatomas de los distritos de riego, algo que los estudios previos a escala mensual no lograron.

4.5.4.2 HydroBID frente a SWAT y WEAP.

La literatura también ofrece comparativas directas. Moreda et al. (2014) y autores posteriores establecen que, si bien el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es excelente para la calidad del agua y los sedimentos, requiere una cantidad masiva de parámetros de suelo que no siempre están disponibles en regiones como Norte de Santander. Por otro lado, HydroBID utiliza una formulación lagrangiana para el tránsito de avenidas que es computacionalmente más eficiente y requiere menos parámetros de calibración sin perder precisión física, lo cual fue validado por Arango Figueroa (2024) en su aplicación en el Tolima.

Respecto a WEAP (Water Evaluation And Planning), utilizado ampliamente en la planificación (ej. Rodríguez & Thomas, 2019), los antecedentes indicaban que es una herramienta robusta para la gestión (demanda), pero simplifica el componente hidrológico (oferta). La innovación de esta tesis radicó en no elegir uno u otro, sino en utilizar la suite del BID que acopló la potencia hidrológica física de HydroBID con la capacidad de asignación de WaterALLOC, superando las limitaciones de usar WEAP de forma aislada.

4.5.4.3 El desafío de los nuevos escenarios SSP.

Finalmente, la revisión teórica del IPCC (2021) y su aplicación regional por Riahi et al. (2017) sugirieron que los antiguos escenarios RCP (Representative Concentration Pathways) se centraban

solamente en el forzamiento radiativo. La literatura reciente exige transitar hacia los SSP (Shared Socioeconomic Pathways), que integran narrativas socioeconómicas. La mayoría de los antecedentes locales en el Zulia (Fernández-Cañas, 2024) aún trabajaban con paradigmas de balance que no integraban dinámicamente estas narrativas. Por tanto, el aporte de esta investigación al estado del arte no fue solo aplicar un modelo, sino actualizar la base de proyección climática de la región a los estándares del AR6 (Sexto Informe de Evaluación).

4.5.5 Matriz de Sistematización de Antecedentes

Para sintetizar el estado del conocimiento y evidenciar la brecha que esta investigación cubrió, se presenta a continuación la matriz de antecedentes. Esta sistematización incluye 30 estudios relevantes, clasificados por ámbito, que detallan la herramienta utilizada y el aporte específico al presente proyecto.

Tabla 2
Estudios Relevantes sobre Modelación Hidrológica, Cambio Climático y Gestión Hídrica.

Autor / Año	Título / Ubicación	Herramientas / Metodología	Hallazgo Principal	Aporte a la Tesis
Arango Figueroa (2024)	<i>Evaluación de disponibilidad y demanda... Río Coello, Colombia.</i>	HydroBID + WaterALLOC. Escenarios SSP 2.6, 4.5, 7.0.	Déficit hídrico > 100% en escenarios críticos. Demuestra la utilidad de acoplar ambos modelos.	Referente Metodológico Principal. Guía para el acople de modelos y uso de SSP.
Mena-Rentería et al. (2020)	<i>Modelación impactos cambio climático... Río Pamplonita, Colombia.</i>	HydroBID. Modelos CORDEX.	Aumento de precipitación en ciertas épocas, contrario a la sequía esperada.	Valida parámetros regionales para Norte de Santander en HydroBID.
Díaz & Suárez (2019)	<i>Pronóstico de sequías... Río Pamplonita, Colombia.</i>	HydroBID. Índices de sequía.	Reducción de caudales entre 6-10% bajo escenarios RCP.	Provee rangos de comparación para resultados en la cuenca vecina.
Fernández-Cañas & Duarte (2024)	<i>Oferta hídrica del Río Zulia ante cambio climático.</i>	Balance hídrico mensual. Modelos agregados.	Identificación de meses críticos de déficit en la actualidad.	Línea base del problema local; justificó el paso a modelación diaria.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Autor / Año	Título / Ubicación	Herramientas / Metodología	Hallazgo Principal	Aporte a la Tesis
Muñoz-Castillo et al. (2018)	<i>Case Study: Río Piura, Perú.</i>	HydroBID. Eventos extremos.	Alta eficiencia en cuencas con fuerte variabilidad estacional y El Niño.	Metodología de calibración para zonas de alta pendiente andina.
Villalobos (2020)	<i>Evaluación uso potencial HydroBID... Río Maule, Chile.</i>	HydroBID. RCP 2.6 y 8.5.	Reducción del 20% en escorrentía por evapotranspiración.	Evidencia la sensibilidad térmica en modelos distribuidos.
Arbuet et al. (2021)	<i>Aplicación HydroBID... Río Los Padres, Argentina.</i>	HydroBID. Proyecciones 2080-2100.	Aumento de escorrentía (18%) por lluvias extremas.	Demostó la capacidad del modelo para simular excesos, no solo sequías.
Vázquez-Ochoa et al. (2021)	<i>Vulnerabilidad hídrica... Río Soto la Marina, México.</i>	Modelo hidrológico + Calidad.	Escenario intermedio (4.5) resultó más adverso que los extremos.	Justificó la evaluación de tres escenarios SSP, no solo el peor.
Ley et al. (2025)	<i>Proyecciones hidrológicas... Cuenca Ems, Alemania.</i>	Modelos LSTM (Inteligencia Artificial).	Respuesta no lineal de la cuenca ante el clima.	Argumento teórico sobre la complejidad del sistema y necesidad de modelos robustos.
Francés & Bussi (2014)	<i>Impacto cambio climático... Río Ésera, España.</i>	Modelo TETIS. Escenarios A2/B2.	Relación directa entre caída de precipitación y aumento de erosión.	Vinculó la hidrología con la degradación de suelos (tema del marco contextual).
Chávez & González (2015)	<i>Impacto recursos hídricos... Guadalquivir, España.</i>	Balance Oferta-Demanda.	La gestión de demanda es más efectiva que aumentar la oferta.	Fundamento teórico para las estrategias de gestión en WaterALLOC.
Sánchez-Quispe (2021)	<i>Disponibilidad hídrica futura... Río Quilca, Perú.</i>	HydroBID.	Validación estadística (Nash-Sutcliffe > 0.7).	Referencia para los criterios de bondad de ajuste en la calibración.
Castillo (2018)	<i>Incidencia cambio climático... Lebrija Alto, Colombia.</i>	HydroBID.	Sensibilidad de caudales base en zonas de páramo.	Relevante por la similitud con el Páramo de Santurbán (nacimiento del Zulia).
Gélvez & Rolón (2018)	<i>Calidad del agua y usos... Río Zulia, Colombia.</i>	Muestreo de campo y análisis estadístico.	Impacto del cultivo de arroz en la calidad y cantidad.	Datos clave para parametrizar la demanda agrícola en WaterALLOC.
Montenegro & Wilmer (2023)	<i>Problemática ambiental... Río Zulia, Colombia.</i>	Análisis multitemporal de coberturas.	Cuantificación de tasas de deforestación.	Insumo para justificar cambios en

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Autor / Año	Título / Ubicación	Herramientas / Metodología	Hallazgo Principal	Aporte a la Tesis
IDEAM (2022)	<i>Estudio Nacional del Agua (ENA).</i>	Balance Hídrico Nacional.	Mapas de amenaza hídrica a escala macro.	el número de curva (CN) del modelo. Contexto nacional y justificación de la vulnerabilidad de la zona.
Moreda et al. (2014)	<i>HydroBID: Sistema integrado de simulación.</i>	Documento Técnico BID.	Descripción de ecuaciones (Lagrangiana).	Base teórica del funcionamiento del modelo (para la defensa).
Riahi et al. (2017)	<i>The Shared Socioeconomic Pathways (SSPs).</i>	Revisión Teórica Global.	Definición de las narrativas SSP1, SSP2, SSP3.	Justificación de la elección de los escenarios climáticos del IPCC AR6.
Lord et al. (2024)	<i>Modelo gestión hídrica... Atacama y Patagonia.</i>	WaterALLOC.	Gestión de sequías mediante asignación prioritaria.	Ejemplo de aplicación de WaterALLOC en zonas de alto estrés hídrico.
Rodríguez & Thomas (2019)	<i>Competencia por agua... Río Magdalena, Colombia.</i>	WEAP.	Conflictos entre sector energético y agrícola.	Antecedente de modelación de asignación en Colombia (comparativa).
López (2022)	<i>Incertidumbre en modelación... Río Bogotá.</i>	Modelos Ensemble.	Necesidad de usar múltiples GCMs para reducir el sesgo.	Justificó el uso de proyecciones climáticas variadas.
García & Poveda (2018)	<i>Impacto de El Niño... Valle del Cauca.</i>	Análisis estadístico de series.	Vulnerabilidad de distritos de riego ante ENOS.	Contexto sobre la variabilidad climática tropical.
Krysanova et al. (2018)	<i>Evaluation of hydrological models.</i>	Revisión crítica (Paper).	Limitaciones de modelos agregados en montaña.	Justificación teórica para usar un modelo distribuido como HydroBID.
Pabón-Caicedo et al. (2020)	<i>Escenarios de cambio climático para Colombia.</i>	Downscaling estadístico.	Proyecciones de temperatura para los Andes.	Fuente de datos climáticos de entrada para Colombia.
Corponor (2018)	<i>POMCA Río Zulia.</i>	Diagnóstico biofísico.	Caudales medios históricos.	Fuente de datos observados para calibración.
Cunha et al. (2021)	<i>HydroBID application in Amazon Basin.</i>	HydroBID.	Aplicación en cuencas de gran escala.	Mostró la escalabilidad de la herramienta.
IPCC (2021)	<i>Sixth Assessment Report (AR6).</i>	Reporte Global.	Base física del cambio climático.	Marco global de referencia.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Autor / Año	Título / Ubicación	Herramientas / Metodología	Hallazgo Principal	Aporte a la Tesis
MinAmbiente (2010)	<i>Política Nacional GIRH.</i>	Marco de Política.	Lineamientos de gestión integral.	Marco normativo que guió los objetivos de gestión.
UNESCO WWAP (2019)	<i>Informe Mundial De Recursos Hídricos.</i>	Reporte Global.	Conceptos de "No dejar a nadie atrás" (Acceso).	Justificación social del proyecto.
RTI International (2023)	<i>WaterALLOC Technical Guide.</i>	Manual Técnico.	Algoritmos de optimización de redes de flujo.	Referencia técnica del software de asignación.

Nota. Elaboración propia a partir de la revisión bibliográfica (2025).

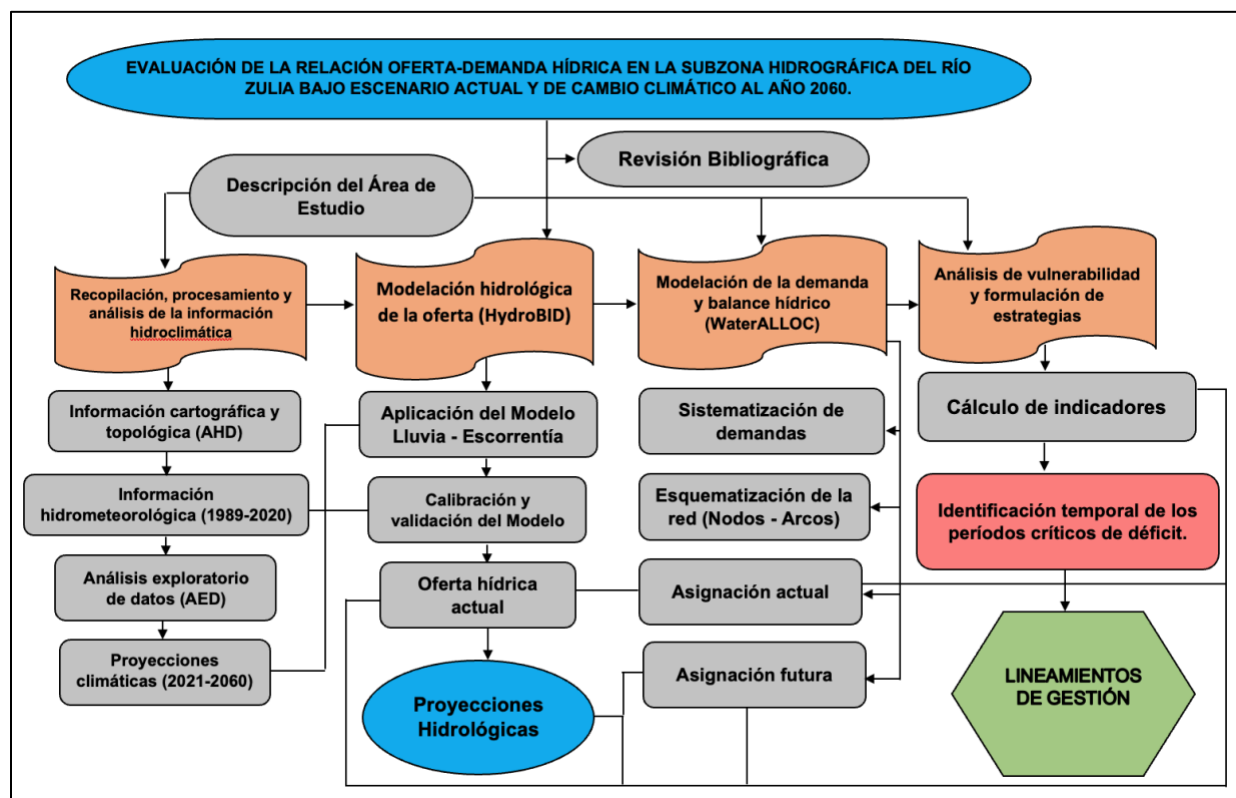
5 Metodología

5.1 Enfoque y Alcance

La presente investigación se enmarcó en un enfoque cuantitativo de tipo longitudinal y prospectivo, dado que analizó variables hidrometeorológicas a lo largo del tiempo para evaluar las trayectorias y alteraciones proyectadas en la disponibilidad hídrica bajo los diferentes escenarios climáticos modelados. El desarrollo metodológico se estructuró en cuatro fases secuenciales, cuyo flujo de trabajo se detalla a continuación.

Figura 3

Esquema Metodológico del Desarrollo de la Investigación.



Nota. Elaboración propia.

La investigación delimitó su ámbito de acción a la evaluación de la sostenibilidad hídrica en el exutorio de la Subzona Hidrográfica del río Zulia, código 1602, localizada en el departamento de Norte de Santander, la cual comprende una extensión aproximada de 3.484 km². El estudio se

fundamentó en la implementación de un esquema de modelación hidrológica distribuida mediante el acoplamiento de las herramientas HydroBID y WaterALLOC, alimentadas con información oficial del IDEAM y CORPONOR. Este enfoque permitió analizar de manera integrada la relación entre la oferta hídrica, la demanda sectorial y la seguridad hídrica de la cuenca bajo condiciones actuales y futuras.

5.1.1 Alcance Temporal y Escenarios de Simulación

El análisis hidrológico se desarrolló a partir de la respuesta integrada de la cuenca, evaluando el balance hídrico global en su punto de salida principal. Para ello, se consideraron dos horizontes temporales comparativos.

En primer lugar, se estableció un escenario de Línea Base o diagnóstico actual en el cual se modeló el comportamiento histórico de la cuenca para el periodo 1989-2020. Este escenario permitió caracterizar el régimen hidrológico, diagnosticar el estado actual de la relación oferta-demanda e identificar los periodos críticos de déficit, así como la frecuencia con la que se presentaron fallas en la satisfacción de la demanda para los distintos sectores usuarios, incluyendo el doméstico, el agrícola y otros usos relevantes.

En segundo lugar, se evaluaron escenarios de cambio climático con proyección al año 2060, incorporando las proyecciones de precipitación y temperatura de la Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático del IDEAM. El análisis consideró las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0, con el propósito de estimar posibles alteraciones en el régimen hidrológico y valorar la vulnerabilidad temporal futura de la oferta hídrica y de la demanda total del sistema.

5.1.2 Alcance Metodológico y de Gestión

Desde el punto de vista metodológico, el estudio se circunscribió a la simulación numérica con resolución temporal diaria. El componente de oferta hídrica fue abordado mediante la modelación lluvia-escorrentía en HydroBID, mientras que el componente de demanda se analizó a través de la optimización del flujo global en WaterALLOC.

El acoplamiento entre ambas herramientas permitió cuantificar indicadores asociados a la satisfacción de la demanda agregada, evaluar la disponibilidad hídrica en el exutorio de la cuenca y analizar la capacidad del sistema para responder ante condiciones de variabilidad climática y cambio climático.

Como resultado final, la investigación formuló lineamientos técnicos de gestión integral del recurso hídrico y adaptación climática, orientados a prevenir situaciones de desabastecimiento durante los periodos de mayor criticidad temporal, reducir la vulnerabilidad del sistema y fortalecer la seguridad hídrica de la cuenca. El producto final corresponde a un informe técnico que consolida el diagnóstico hidrológico, las proyecciones futuras, los resultados de la modelación y las estrategias de gestión propuestas.

5.2 Procesamiento de Información Hydroclimática

Esta primera etapa consistió en el alistamiento y depuración de los datos de entrada necesarios para el forzamiento de los esquemas de modelación. El procedimiento se dividió en tres componentes fundamentales:

5.2.1 Información Cartográfica y Topológica.

Se delimitó la Subzona Hidrográfica del río Zulia (Código 1602) utilizando el Sistema de Información Geográfica QGIS y la base de datos AHD (*Analytical Hydrography Dataset*) del BID, así como su respectiva red de drenaje. Posteriormente, se identificaron los centroides de las

subcuencas (*Catchments*) y se definieron las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), las cuales permitieron caracterizar y espacializar la heterogeneidad del uso del suelo y la cobertura vegetal de la cuenca.

5.2.2 Información Hidrometeorológica Histórica.

Se recopiló ante el IDEAM la información observada para el periodo de referencia (1989-2020), correspondiente a las variables de precipitación, temperatura y caudales. A estas series temporales se les aplicó un riguroso Análisis Exploratorio de Datos (AED), el cual incluyó:

- *Pruebas de Calidad:* Identificación de valores atípicos (*outliers*) y verificación de la consistencia física de los registros.
- *Relleno de Datos:* Estimación de datos faltantes mediante métodos estadísticos, paso indispensable para garantizar la continuidad temporal ininterrumpida requerida por los modelos de simulación diaria. Las estaciones que contenían datos faltantes de precipitación se rellenaron usando el método de Ponderación por el Inverso de la Distancia (*IDW – Inverse Distance Weighting*), para la variable temperatura se usó el método de Interpolación Lineal Temporal mientras que para las estaciones de caudal se usó el programa Xlstat con el método de Imputación Múltiple (MCM).
- *Pruebas de Homogeneidad:* Verificación de la consistencia estadística de las series para asegurar la ausencia de saltos o tendencias no asociadas a la variabilidad climática natural.

5.2.3 Proyecciones Climáticas (Escenarios SSP).

Se realizó la extracción de las series de precipitación y temperatura proyectadas por el IDEAM en el marco de la Cuarta Comunicación Nacional de Cambio Climático para el horizonte 2021-2060. Para ello, se seleccionaron los puntos de malla (celdas) correspondientes espacialmente a la cuenca

del río Zulia y se extrajeron las series de tiempo diarias para las trayectorias SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0, utilizando la información oficial regionalizada (*downscaling*) para el país.

5.3 Configuración y Calibración del Modelo de Oferta – HydroBID

En esta fase se implementó el modelo lluvia-escorrentía para cuantificar la disponibilidad hídrica neta en la subzona hidrográfica.

5.3.1 Parametrización.

Se implementó la base de datos AHD (*Analytical Hydrography Dataset*) correspondiente a la zona de estudio, la cual integra predefinidamente la parametrización geomorfológica, topológica y de cobertura del suelo requerida por el modelo. El proceso operativo se centró en la asociación espacial de las series de tiempo hidrometeorológicas observadas y las proyecciones climáticas (escenarios) a cada subcuenca (*Catchment*) de la AHD, generando los archivos de entrada que forzaron la simulación.

5.3.2 Calibración y validación.

Se ejecutó la calibración y validación para el periodo histórico (1989-2020). El proceso de calibración se realizó de manera iterativa, ajustando los parámetros de transferencia lagrangiana y la capacidad de almacenamiento del suelo. La bondad de ajuste del modelo se evaluó mediante funciones objetivo estadísticas, específicamente el Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el Coeficiente de Determinación (R^2) y el Sesgo Porcentual (PBIAS), con el propósito de alcanzar valores que clasificaran el modelo como "Satisfactorio" o "Bueno", de acuerdo con la literatura especializada (Moriasi et al., 2007).

5.3.3 *Simulación de Escenarios Futuros.*

Una vez validado el modelo, se forzó con las series proyectadas obtenidas en la primera fase, lo que permitió generar las series de tiempo de caudales diarios proyectados al año 2060, enfocando el análisis de resultados en el nodo principal (exutorio) del sistema.

5.4 Esquematización del Modelo de Demanda – WaterALLOC

Esta fase integró la oferta simulada con los requerimientos consuntivos para evaluar la asignación del recurso.

5.4.1 *Sistematización de Demandas.*

Se procesó la base de datos de concesiones otorgadas por CORPONOR, georreferenciando los puntos de captación y clasificándolos por sector usuario (agrícola, doméstico y otros). Es fundamental precisar que, como supuesto de modelación para esta investigación, la demanda hídrica se ingresó como una serie continua equivalente a la asignación legal máxima (caudal concesionado) y no como el consumo real medido en campo. Este enfoque metodológico se adoptó para evaluar un escenario de máxima presión regulatoria y requerimientos multisectoriales sobre la cuenca.

5.4.2 *Esquematización de la Red (Topología).*

En el entorno de WaterALLOC, se construyó el esquema de red de flujo (*Node-Link Network*), en el cual los nodos representaron las fuentes (salidas de HydroBID) y los usuarios, conectados por arcos que simularon la conducción del agua. Asimismo, se asignaron prioridades de abastecimiento siguiendo la jerarquía normativa vigente, otorgando máxima prioridad al consumo humano.

5.4.3 Simulación del Balance.

Se ejecutó el modelo de optimización de asignación para los escenarios actuales y futuros. El modelo calculó el balance de masas en cada paso temporal, determinando los volúmenes entregados y los déficits hídricos.

Nota de Delimitación Analítica: Si bien la esquematización de la red en WaterALLOC se desarrolló integrando la topología de la cuenca para garantizar la precisión física del tránsito de caudales y el balance de masas acumulado, el análisis de los índices de desempeño se concentró en el exutorio. Esta decisión metodológica permitió evaluar la resiliencia macroscópica del sistema y formular lineamientos de gestión regional, optimizando la interpretación temporal de las series diarias.

5.5 Cálculo de Índices de Desempeño y Lineamientos de Gestión.

A partir de las salidas numéricas obtenidas en la simulación del balance hídrico, se procedió a la fase de análisis estratégico y evaluación de la gestión del sistema.

5.5.1 Cálculo de Índices de Desempeño Hídrico.

Se estimaron los indicadores macroscópicos de presión y resiliencia del sistema, lo que permitió cuantificar la dinámica de la relación oferta-demanda bajo las siguientes métricas:

- *Índice de Uso del Agua (IUA):* Determinación de la relación porcentual entre la demanda hídrica consuntiva y la oferta hídrica disponible, clasificando el grado de presión del sistema según las categorías normativas (Bajo, Moderado, Alto y Crítico).
- *Confiabilidad Volumétrica y Satisfacción de Demanda:* Cuantificación del porcentaje de tiempo y del volumen en el cual las concesiones y requerimientos legales otorgados por la autoridad ambiental fueron satisfechos de manera óptima por el modelo de asignación.

- *Índice de Vulnerabilidad y Severidad:* Evaluación de la magnitud (caudal faltante) y la duración temporal de los eventos de falla o déficit hídrico, identificando los umbrales críticos de estrés del sistema ante eventos extremos.

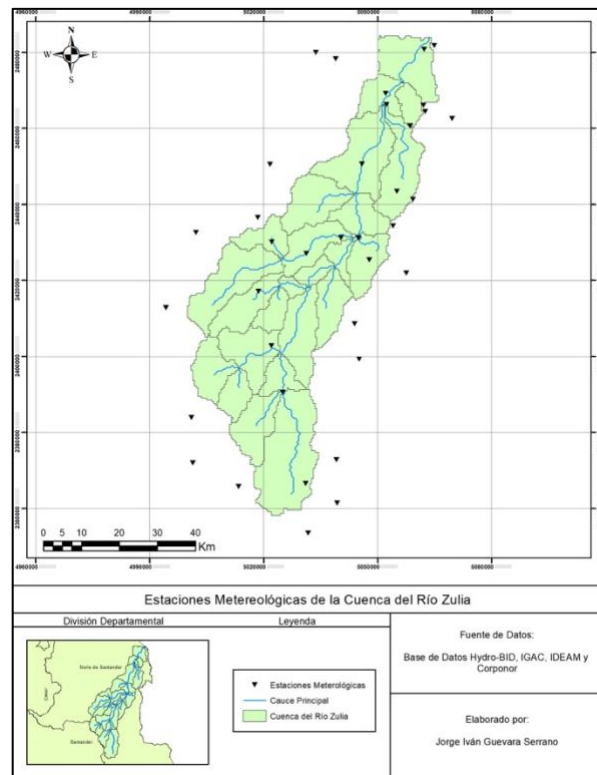
5.5.2 *Formulación de Lineamientos de Gestión.*

Con base en la identificación temporal de los periodos críticos de desabastecimiento proyectados bajo los diferentes escenarios (Línea Base y SSP), se formularon lineamientos técnicos y estrategias de adaptación. Estas propuestas se estructuraron en estricta alineación con los instrumentos de planificación vigentes, en especial la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, con el objetivo de establecer medidas operativas y de planificación territorial orientadas a mitigar la vulnerabilidad hídrica y reducir la brecha de escasez proyectada para la cuenca.

6 Resultados

6.1 Información Hidroclimática de la Cuenca

La representación del régimen climático de la cuenca, paso previo y fundamental para la simulación de lluvia-escorrentía, se construyó a partir del procesamiento de una red de monitoreo compuesta por 35 estaciones pluviométricas, de las cuales 7 realizaron el aporte termométrico (Figura 4). La selección de este ensamble de estaciones no fue arbitraria, sino que obedeció a estrictos criterios de rigor metodológico: (i) estado operativo, garantizando la selección exclusiva de estaciones activas; (ii) representatividad espacial, la cual no solo aseguró la cobertura de los marcados gradientes altitudinales de la cuenca andina, sino que garantizó el cálculo robusto y la interpolación de precipitaciones en zonas carentes de monitoreo directo, especialmente hacia los límites divisorios de la cuenca hidrográfica; (iii) continuidad de los registros históricos; y (iv) proximidad al área de drenaje. Asimismo, la elección del periodo base (01/01/1989 hasta el 31/12/2020) se justificó por abarcar un ciclo hidrológico de 32 años —superando el estándar de 30 años recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM)—, lo que aseguró una captura robusta de la variabilidad climática interanual, mitigando así la incertidumbre estadística en la generación de la línea base.

Figura 4.*Distribución espacial de la red de monitoreo hidrometeorológico en la cuenca**Nota.* Elaboración propia.

La distribución espacial de estas estaciones permitió capturar la heterogeneidad altitudinal del territorio, constituyendo las series históricas que sirvieron como línea base del forzamiento meteorológico para alimentar el modelo HydroBID.

6.1.1 Comportamiento Histórico de la Precipitación

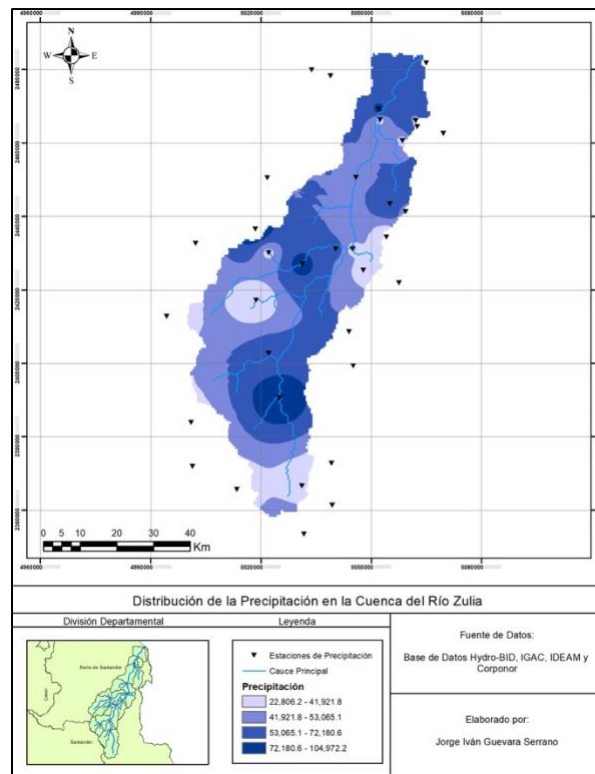
La distribución espacial de la precipitación en la cuenca del río Zulia presenta una marcada heterogeneidad, concentrando los mayores volúmenes pluviales en dos zonas contrastantes: la cuenca alta (entre las cotas 3.800 y 4.200 m s.n.m.) y la zona de descarga o exutorio (entre los 50 y 400 m s.n.m.), tal como se detalla en la figura 5. Esta variabilidad espacial obedece al fuerte control orográfico propio de la topografía andina de la región.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Por su parte, desde una perspectiva temporal, la cuenca exhibe un régimen pluviométrico marcadamente bimodal. Esta dinámica estacional se caracteriza por dos periodos húmedos de máxima precipitación, los cuales ocurren durante los trimestres de marzo a mayo y de septiembre a noviembre.

Figura 5.

Distribución de la precipitación en la cuenca del río Zulia.



Nota. Elaboración propia.

6.1.2 Comportamiento Histórico de la Temperatura

El comportamiento espacial de la temperatura en la cuenca evidencia una clara dependencia orográfica, registrando los valores térmicos más altos en la zona de descarga (bajas altitudes), tal como se ilustra en la figura 6. Esta dinámica confirma la relación inversamente proporcional entre la elevación y el calor sensible, conocida hidroclimatológicamente como gradiente térmico

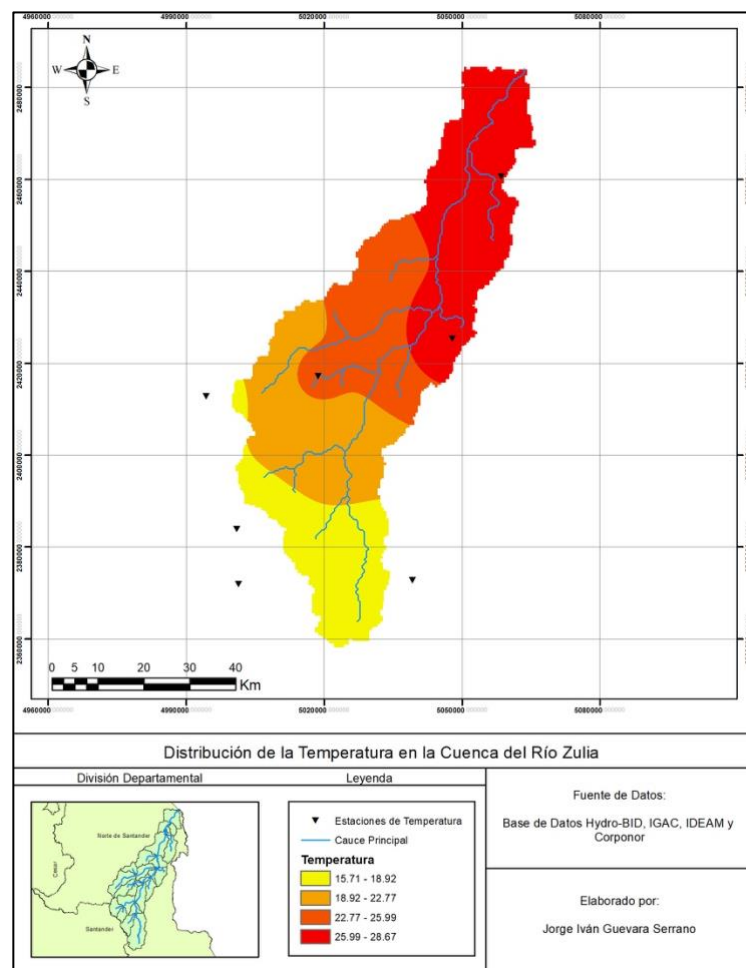
EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

altitudinal; una variable que actúa como factor determinante para la zonificación agrícola y productiva del territorio.

Por su parte, desde una perspectiva temporal, la cuenca exhibe una marcada estabilidad a lo largo del año. Este régimen se caracteriza por una baja amplitud térmica intraanual, carente de picos estacionales abruptos y representativo de las latitudes tropicales, lo que contrasta con la alta variabilidad observada en la precipitación.

Figura 6.

Distribución de la temperatura en la cuenca del río Zulia.



Nota. Elaboración propia.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

No obstante, esta relativa estabilidad histórica es susceptible a alteraciones. Las condiciones hidroclimáticas de la región no solo obedecen a factores topográficos estáticos, sino que están estrechamente ligadas a las dinámicas de transformación territorial y a las perturbaciones proyectadas bajo los nuevos escenarios de cambio climático, lo que hace inminente una alteración progresiva de su régimen térmico y pluviométrico de línea base.

El hallazgo más revelador respecto a estas variables climáticas de entrada se evidenció al contrastar el comportamiento histórico con los escenarios proyectados al año 2060. A escala departamental, los reportes macroscópicos del IDEAM para Norte de Santander sugieren una tendencia hacia la aridez, proyectando incrementos térmicos de entre 1,8 °C y 2,4 °C, acompañados de reducciones globales en la precipitación que oscilan entre el 15% y el 20% (IDEAM, 2025).

Sin embargo, al focalizar el procesamiento de las celdas climáticas (escenarios SSP) exclusivamente sobre el dominio espacial de la Subzona Hidrográfica del río Zulia, se identificó una dinámica hidroclimática mucho más compleja. La tendencia proyectada de la precipitación no obedece a una disminución lineal y constante a lo largo del año, sino a una severa intensificación de la variabilidad estacional.

Las variables de forzamiento indican que los periodos de invierno concentrarán mayores volúmenes de lluvia en menor tiempo, lo que inminentemente se traducirá en picos de escorrentía más altos. Por el contrario, los meses de estiaje experimentarán una acentuación de las condiciones secas. Esta exacerbación de los extremos climáticos constituye el escenario real al que estará sometida la cuenca, determinando la disponibilidad hídrica futura y la frecuencia de fallas en el sistema de asignación.

6.2 Modelación Hidrológica de la Oferta – HydroBID

Para cuantificar la disponibilidad hídrica natural en la cuenca del río Zulia, se implementó el modelo hidrológico semidistribuido HydroBID. A continuación, se detallan los resultados obtenidos durante esta fase de modelación de la oferta, abarcando desde la esquematización física del territorio y el ajuste estadístico de sus parámetros (calibración y validación), hasta la simulación continua de los caudales diarios para el periodo histórico de línea base y su respectiva proyección bajo los nuevos escenarios de cambio climático (SSP) al año 2060.

6.2.1 Configuración de la red hidrográfica (AHD) y definición de las HRU

La parametrización física del modelo se inició con la delimitación y esquematización topológica de la cuenca del río Zulia. Este proceso se desarrolló en el entorno del Sistema de Información Geográfica QGIS, utilizando como insumo cartográfico principal la base de datos hidrológica *Analytical Hydrography Dataset* (AHD) provista por la suite HydroBID.

Mediante este geoprocésamiento, se discretizó el dominio espacial en 25 subcuencas (identificadas topológicamente mediante sus respectivos códigos COMID), las cuales abarcan un área de drenaje total de 3.339,81 km².

El análisis morfométrico de esta red hidrográfica determinó que la extensión acumulada de los cauces principales alcanza los 340,07 km. Esta relación entre la longitud de la red y el área de la cuenca sugiere una baja densidad de drenaje. Desde el punto de vista hidrológico, esta característica indica una respuesta lenta de la cuenca ante los eventos de precipitación directa, asociada a la predominancia de relieves suaves y suelos con alta permeabilidad. Esta dinámica de retención y tránsito lento del flujo superficial se traduce, de manera favorable, en niveles bajos de erosión hídrica a escala de cuenca.

Respecto a la definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés), el proceso de modelación se benefició significativamente de la arquitectura preconfigurada de la base de datos AHD. A diferencia de otros modelos semidistribuidos que exigen un procesamiento espacial intensivo para cruzar mapas vectoriales de forma manual, la suite de HydroBID integra por defecto la parametrización de las HRU para cada subcuenca. De acuerdo con los manuales técnicos de la herramienta (Moreda et al., 2014), esta estructura cartográfica contiene la caracterización espacial preprocesada a partir de fuentes globales estandarizadas, integrando los mapas de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) para los grupos hidrológicos de suelos y productos satelitales globales para las coberturas vegetales.

Al cruzar estas bases de datos internamente, la AHD sintetiza de antemano estos factores físicos en valores representativos del Número de Curva (CN, *Curve Number*) para toda América Latina y el Caribe. Esta versatilidad metodológica redujo la incertidumbre en la estimación de las abstracciones hidrológicas iniciales y garantizó que el esquema de tránsito de caudales estuviera fielmente acoplado a las condiciones geomorfológicas reales del territorio.

6.2.2 Calibración del modelo: ajuste de parámetros y métricas de bondad

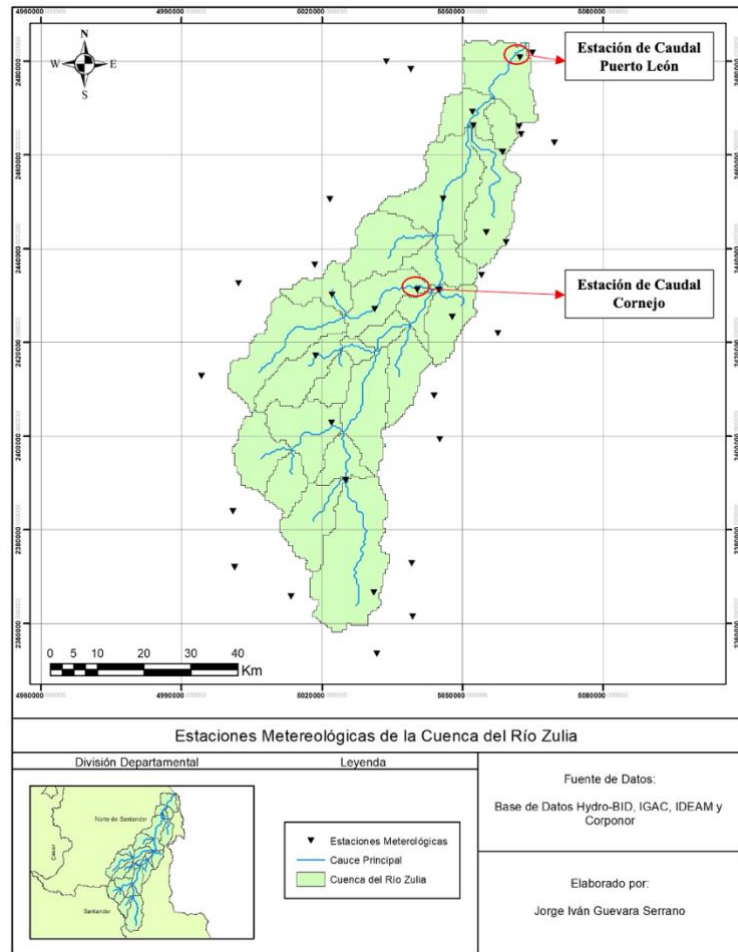
La calibración es la fase más crítica del proceso de modelación, ya que garantiza la representatividad física del esquema matemático. Siguiendo el esquema de calibración espacial en cascada (*Step-wise calibration*), la elección de las estaciones de control se fundamentó en su representatividad topológica: la estación Cornejo (COMID 300562500) se eligió para capturar la dinámica de respuesta rápida de la cuenca alta-media, mientras que la estación Puerto León (COMID 300468700) permitió validar el cierre del balance de masas acumulado en el exutorio de la subzona. El periodo de calibración (1990-2010) se seleccionó por ofrecer una ventana de 21

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

años altamente contrastante, la cual representa el 68% de los datos históricos disponibles, "entrenando" al modelo bajo la variabilidad extrema de las fases de El Niño y La Niña.

Figura 7.

Ubicación espacial de las estaciones de calibración



Nota. Elaboración propia.

La parametrización final se ejecutó mediante optimización manual iterativa. Para alcanzar la estabilidad del sistema, se requirieron 131 iteraciones manuales en la estación Cornejo y 82 iteraciones en la estación Puerto León. Durante este proceso, se evaluó exhaustivamente la sensibilidad del modelo, identificando que la magnitud de los picos de esorrentía y el sostenimiento del flujo base son parámetros altamente sensibles a las variaciones del Número de

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Curva (CN) y la Capacidad de Agua Disponible (AWC). Reconociendo esta sensibilidad, se priorizó el principio de parsimonia, aplicando ajustes físicos conservadores para evitar el sobreajuste (*overfitting*) y minimizar la propagación de incertidumbre paramétrica en las proyecciones a largo plazo. Los multiplicadores definitivos se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3.

Parámetros Físicos finales de Calibración en HydroBID.

Parámetro / Multiplicador	Estación Cornejo 300562500, Cuenca Media	Estación Puerto León 300468700, Cuenca Baja
Número de Curva (CN)	0.83	0.80
Capacidad de Agua Disponible (AWC)	1.18	0.10
Coefficiente de Rugosidad (R coeff)	0.011	0.02
Tasa de Filtración (Seepage)	0.0001	0.002
Evapotranspiración (Grow / Dormant ET)	0.58	0.38
Fracción de Cobertura Impermeable	1.0	1.0
Umbral de Temperatura y Factor Deterrimiento	0.8	0.8

Nota. Elaboración propia.

La configuración seleccionada destaca por su profunda coherencia física. En la cuenca aportante a Cornejo, el multiplicador *CN* (0.83) y el *AWC* (1.18) configuran un sistema con alta infiltración inicial y liberación de flujo base moderadamente rápida. Esta dinámica es característica de cuencas de cabecera con pendientes pronunciadas. Asimismo, la filtración profunda (*Seepage*) nula indica que la estación de aforo en la parte alta captura la totalidad del rendimiento hídrico.

En contraste, la parametrización de la cuenca baja (Puerto León) refleja una agrología dominada por zonas planas y cultivos transitorios (*AWC* de 0.10). El hallazgo más relevante en esta zona es

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

la necesidad de incorporar una tasa de filtración (*Seepage* de 0.002) para representar la curva de recesión, evidenciando que el exutorio presenta pérdidas asociadas a la interacción acuífero-río y dinámicas de infiltración de riego.

Una vez estabilizados los parámetros, se procedió a la evaluación objetiva del modelo frente a los criterios de bondad de ajuste estándar (Moriasi et al., 2007; 2015).

Tabla 4.

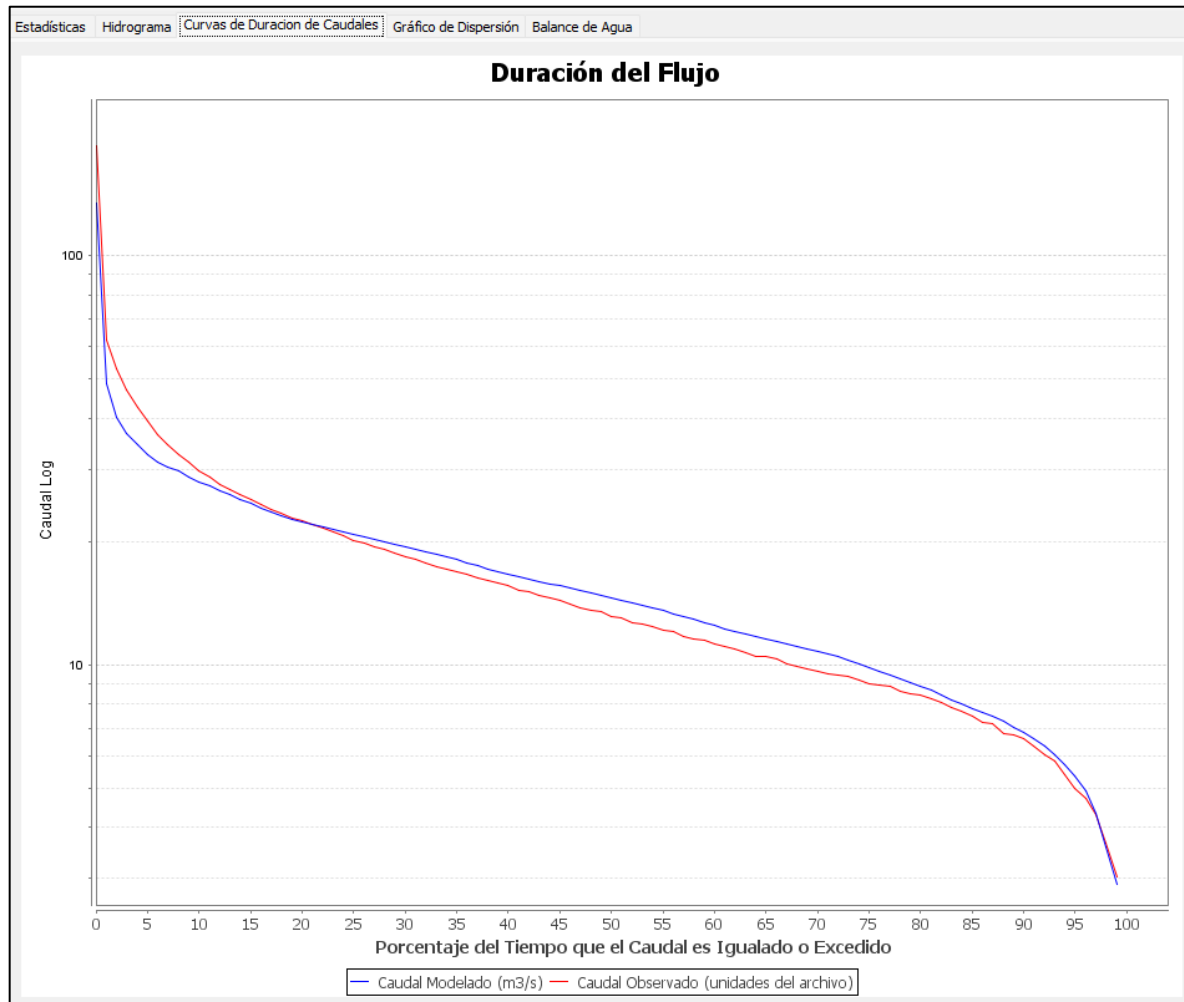
Métricas estadísticas de bondad de ajuste (Calibración 1990 - 2010).

Métrica de Desempeño	Escala	Estación Cornejo	Estación Puerto León
Error de Volumen	Diario	0.13 %	-0.15 %
Observado (<i>OVE</i>)	Mensual	-0.08 %	-0.33 %
Coefficiente Nash-	Diario	0.21	0.13
Sutcliffe (<i>NSE</i>)	Mensual	0.37	0.31
Correlación de	Diario	0.53	0.51
Pearson (<i>r</i>)	Mensual	0.67	0.70
Coefficiente R_{mod}	Diario	0.42	0.45
	Mensual	0.63	0.62

Nota. Elaboración propia.

Figura 8.

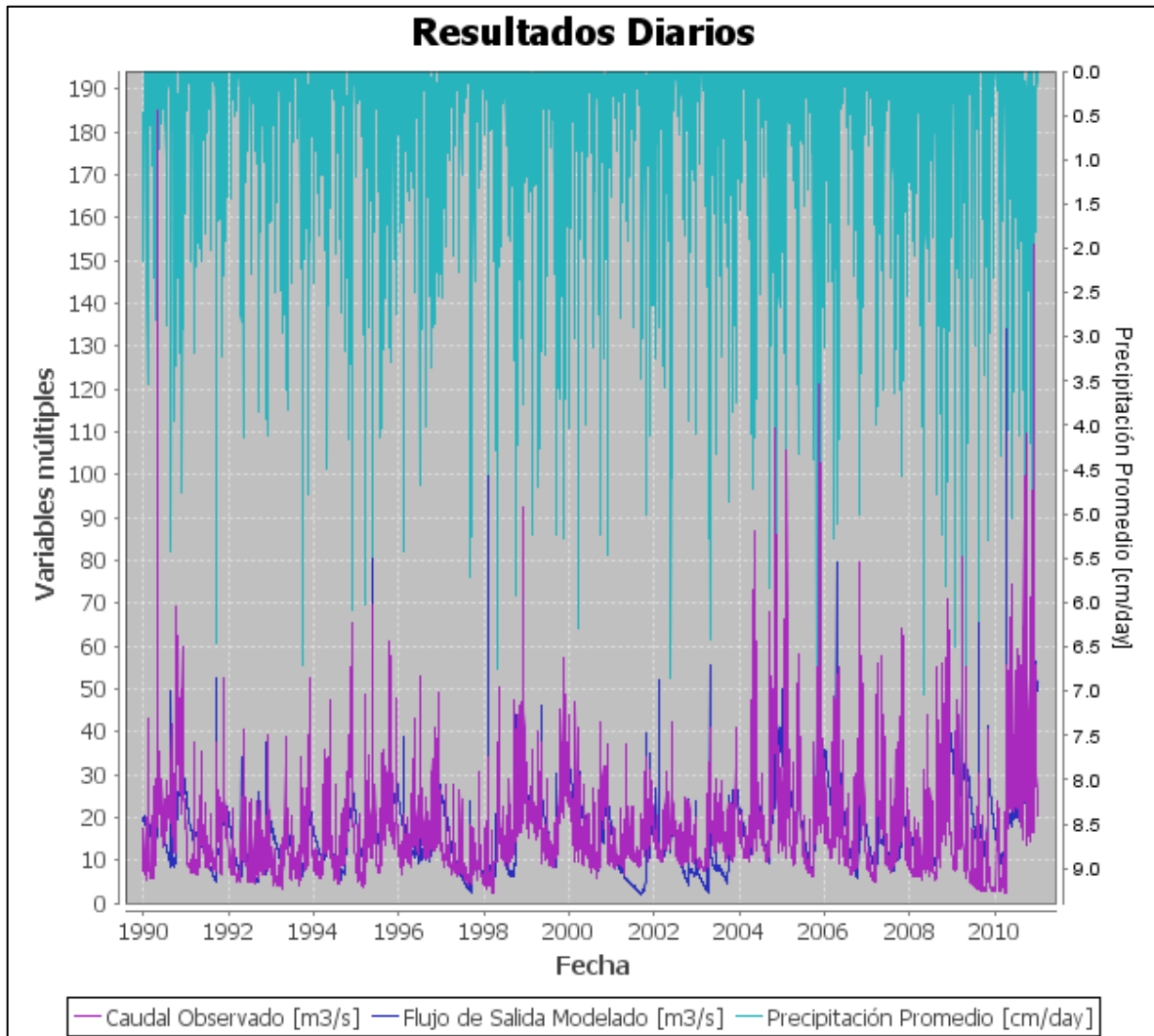
Curva de Duración de Caudales Cornejo.



Nota. Extraído del software HydroBID.

Figura 9.

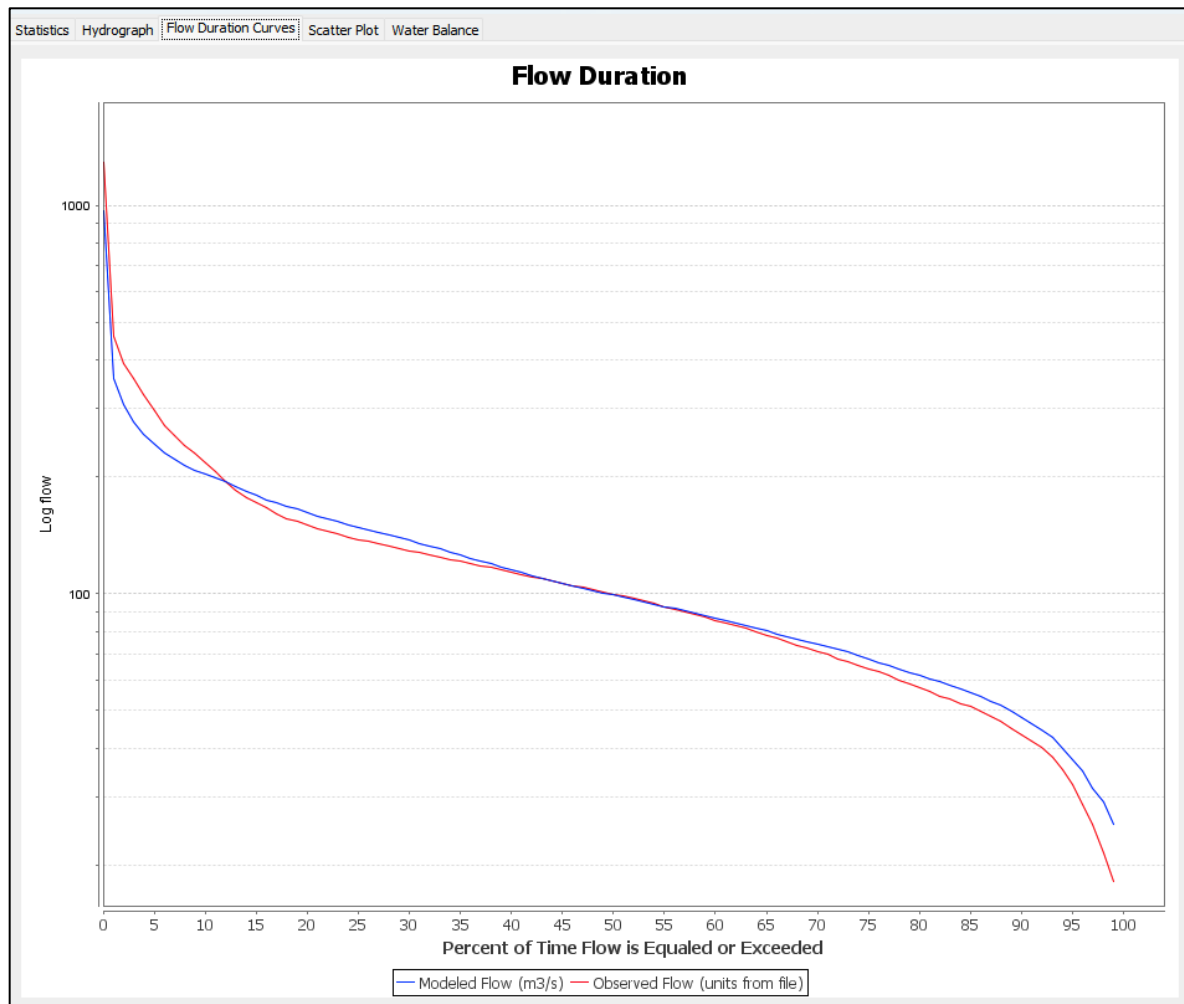
Hidrograma de la estación de caudal Cornejo.



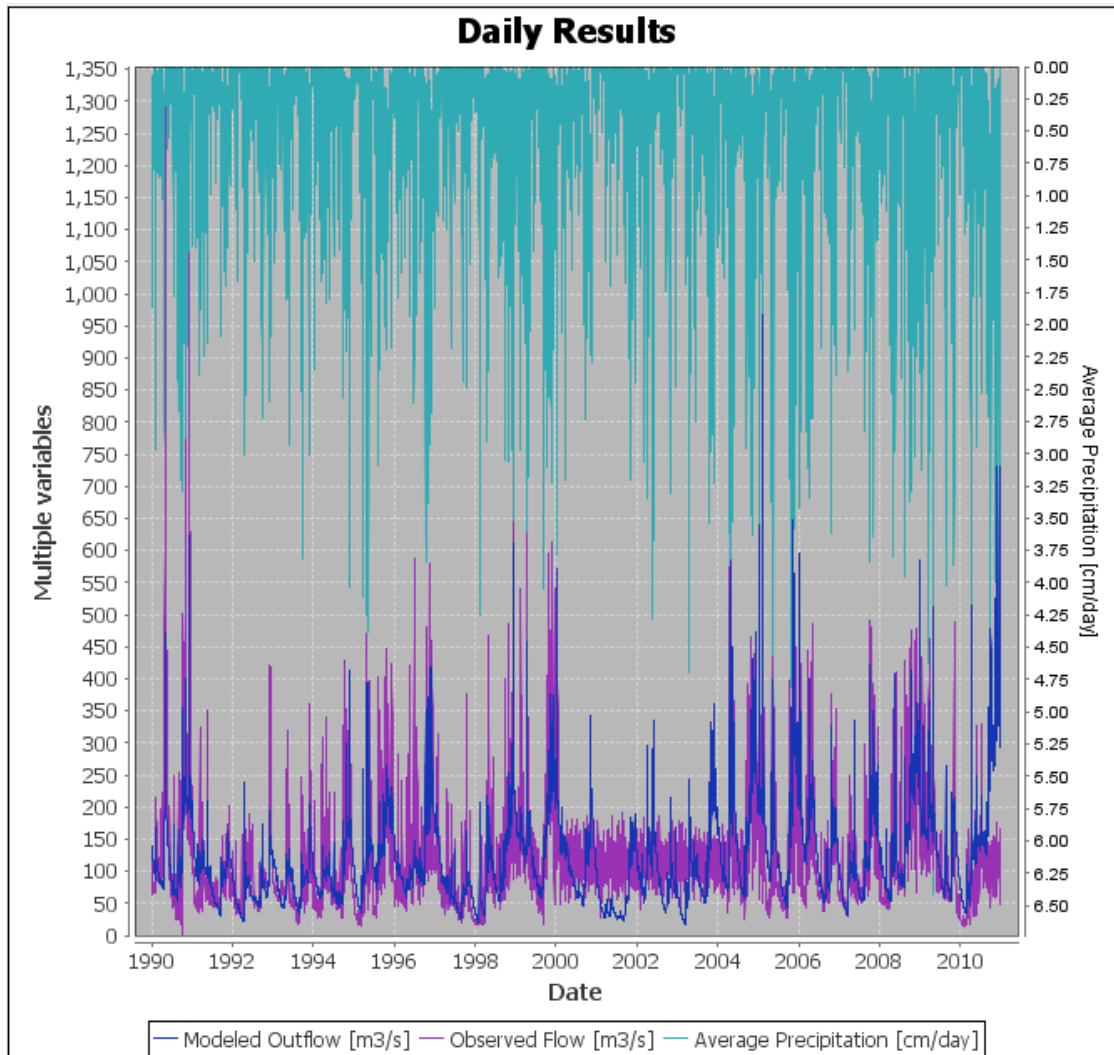
Nota. Extraído del software HydroBID.

Figura 10.

Curva de Duración de Caudales Puerto León.



Nota. Extraído del software HydroBID.

Figura 11.*Hidrograma de la estación Puerto León.*

Nota. Extraído del software HydroBID.

Como se observa en la Tabla 4, el modelo arroja errores volumétricos virtualmente nulos (inferiores al $\pm 0.2\%$), garantizando un cierre de balance de masas excepcionalmente preciso.

Por su parte, la eficiencia dinámica (NSE) presenta valores discretos (0.21 y 0.13) frente a los picos instantáneos de crecida. Las implicaciones técnicas de este desacople temporal, su justificación frente a la regulación antrópica del Distrito de Riego Asozulia y la validación de la

utilidad del modelo para el análisis de escasez a largo plazo, se abordarán a profundidad en el capítulo de Discusión de Resultados.

6.2.3 Validación del modelo y bondad de ajuste.

Una vez definidos los parámetros físicos óptimos en la fase de calibración, se procedió a la validación temporal del modelo. Este paso es fundamental para verificar la robustez del algoritmo, evaluando su capacidad para simular un periodo hidrológico independiente sin modificar los multiplicadores previamente establecidos. Para este propósito, se utilizó la década comprendida entre el 01 de enero de 2011 y el 31 de diciembre de 2020.

Al someter el modelo a esta nueva ventana temporal, caracterizada por la ocurrencia de fenómenos macroclimáticos extremos (ENSO), se obtuvieron las métricas de bondad de ajuste presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5.

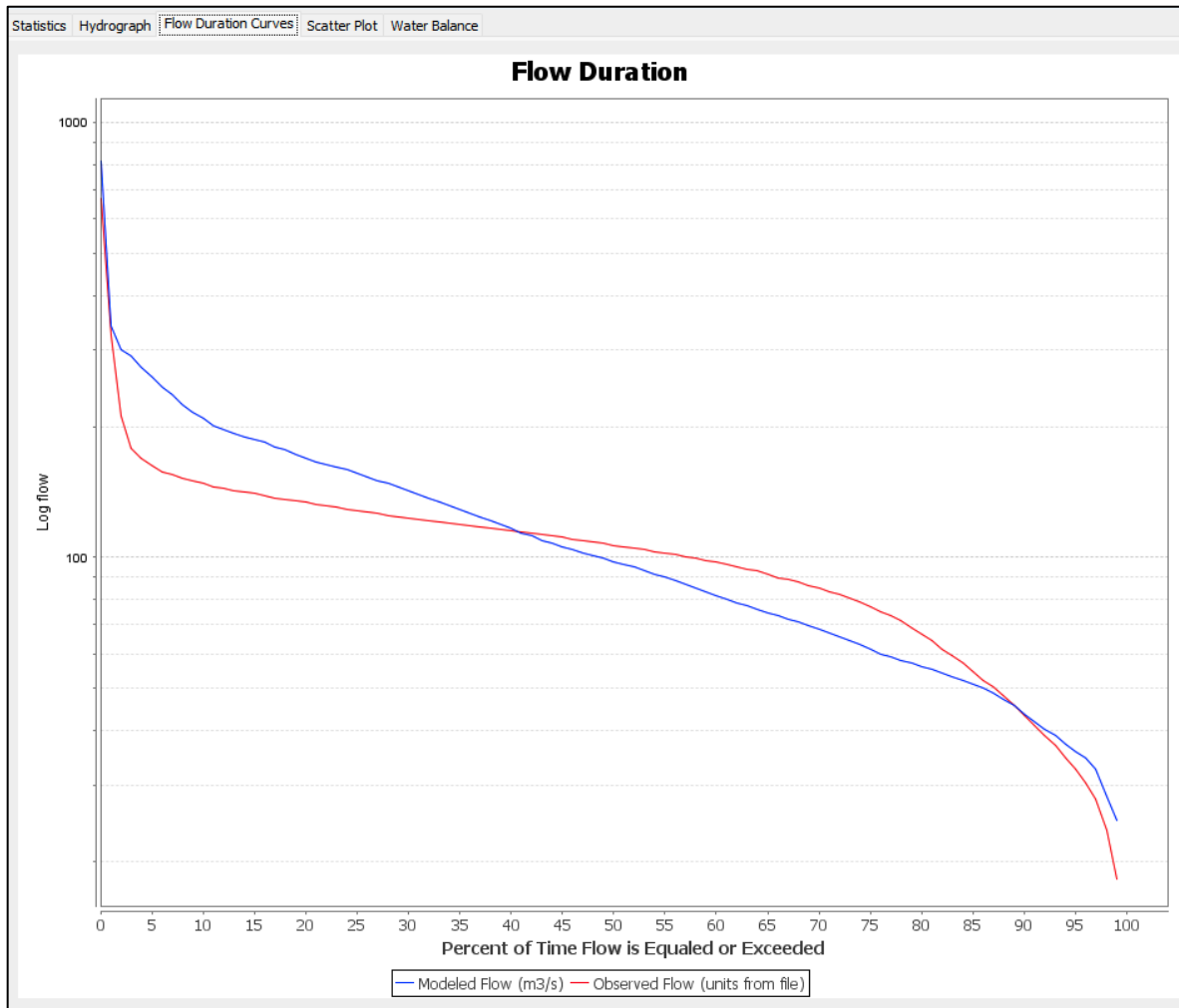
Estadísticas globales de bondad de ajuste para el periodo de validación (2011 - 2020) exutorio de la cuenca.

Métrica de Desempeño	Valor Diario	Valor Mensual
Error de Volumen Observado <i>(OVE)</i>	1.79%	0.90%
Coefficiente Nash – Sutcliffe <i>(NSE)</i>	-0.65	-0.86
Correlación de Pearson (<i>r</i>)	0.32	0.42
Coefficiente R_{mod}	0.27	0.29

Nota. Elaboración propia.

Figura 12.

Curva de duración de caudales para el periodo de Validación (2011 - 2020).



Nota. Extraído del software HydroBID.

El análisis del balance de masas a largo plazo arroja un cierre volumétrico sobresaliente. El modelo reportó un Error Volumétrico (OVE) de apenas 0.90% a escala mensual, clasificándose como "Muy Bueno" de acuerdo con las directrices de Moriasi et al. (2015). Esta alta precisión ratifica que la parametrización de la cuenca no sufrió de sobreajuste (*overfitting*) durante la calibración, siendo altamente confiable para la estimación de la oferta hídrica disponible a largo plazo.

Por otro lado, la eficiencia dinámica (NSE) presentó valores negativos (-0.65 diario). Al observar la curva de duración de caudales (Figura 12), se identifica un cruce en las curvas cerca del 40% de excedencia, lo que demuestra un comportamiento no lineal entre los caudales modelados y observados. En el rango de excedencia del 5% al 40% (altas y medias aguas), el modelo sobreestima los caudales, mientras que entre el 40% y el 90% (aguas medias a bajas), se observa una subestimación del caudal modelado respecto al observado. Este patrón de divergencia indica que la respuesta hidrológica natural que proyecta el modelo no logra replicar la firma del régimen de flujo alterado registrado en la estación, el cual se encuentra condicionado por la operación antrópica del sistema (extracción para riego y vertimientos), cuyas reglas operativas no fueron integradas como una variable forzante en esta fase de validación. Las implicaciones de este fenómeno, asociadas a las dinámicas de extracción de la demanda durante esta década, serán abordadas a profundidad en el capítulo de Discusiones y Conclusiones.

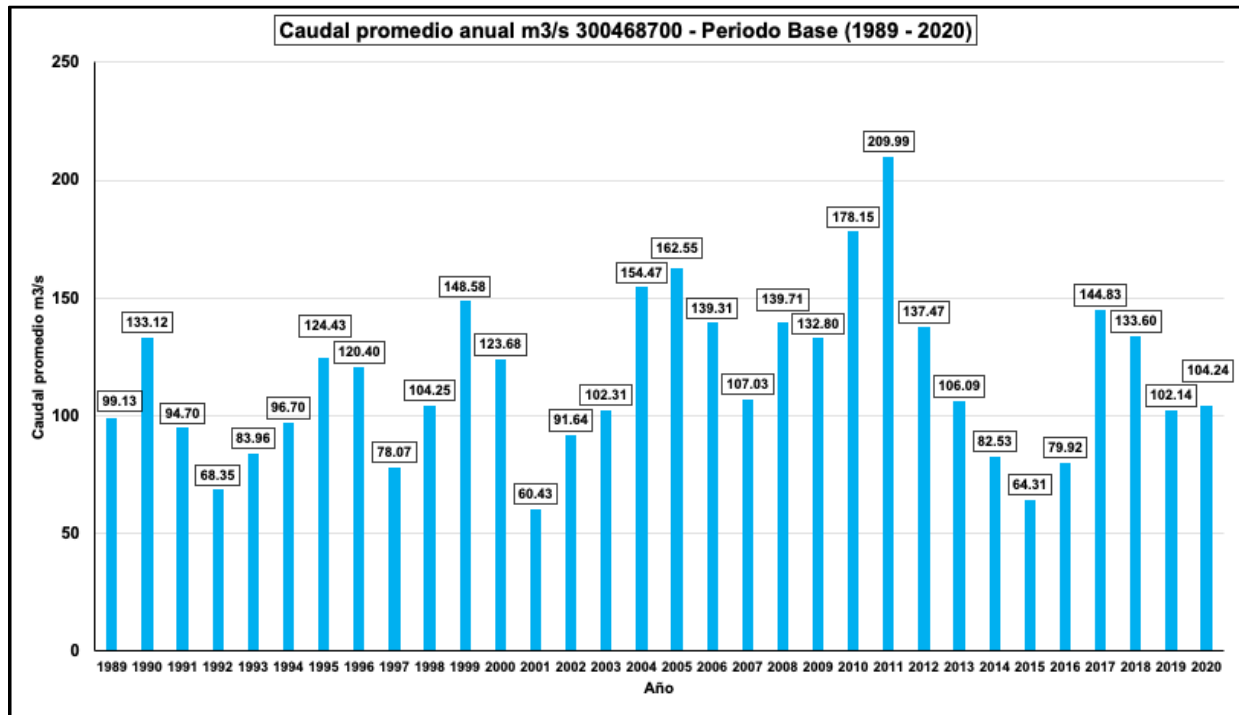
6.2.4 Oferta hídrica bajo condición histórica (línea base 1989 – 2020).

Habiendo garantizado la representatividad física del modelo mediante los procesos de calibración y validación, se procedió a la simulación continua del periodo histórico o de línea base. Esta fase generó la serie de caudales diarios naturales en el exutorio principal (estación Puerto León) para la totalidad del periodo de registro. El análisis de estos 32 años continuos (1989-2020) permite caracterizar el rendimiento hídrico histórico de la cuenca, estableciendo la línea base de diagnóstico contra la cual se compararán las alteraciones proyectadas por las series regionalizadas de los escenarios futuros de cambio climático.

El análisis a escala anual revela un sistema hidrológico con una marcada fluctuación interanual, fuertemente acoplado a las anomalías del forzamiento macroclimático, específicamente las fases del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO).

Figura 13.

Caudal promedio anual simulado en el exutorio de la cuenca del río Zulia.



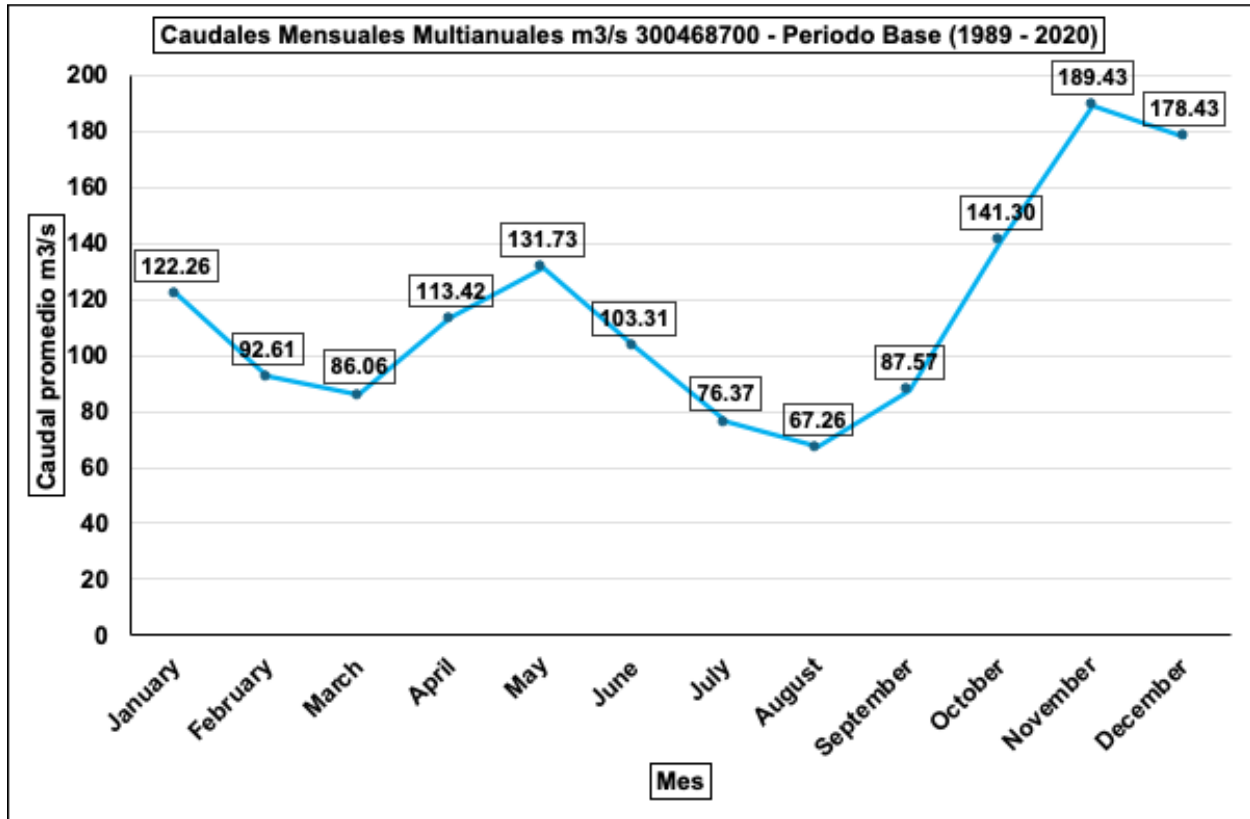
Nota. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 13, la oferta hídrica anual presenta un comportamiento oscilatorio extremo. El caudal medio multianual se ve drásticamente superado durante los años influenciados por el fenómeno de La Niña, alcanzando 178,15 m³/s en 2010 y un máximo histórico de 209,99 m³/s en el año 2011. En marcado contraste, los eventos correspondientes a la fase cálida (El Niño) reducen el rendimiento hídrico de la cuenca a niveles críticos, registrando los mínimos de oferta en los años 2001 (60,43 m³/s) y 2015 (64,31 m³/s). Esta amplitud de rango (una variación superior al 300% entre el año más seco y el más húmedo) evidencia la alta vulnerabilidad interanual del sistema y advierte sobre los riesgos de planificar la demanda hídrica basándose únicamente en promedios multianuales estáticos. Al descender a la escala estacional, la traslación del forzamiento

pluviométrico (lluvia) hacia la esorrentía (caudal) confirma un régimen hidrológico estrictamente bimodal, coherente con la dinámica hidroclimática descrita en el apartado 7.1.

Figura 14.

Régimen de caudales medios mensuales multianuales para el periodo base.



Nota. Elaboración propia.

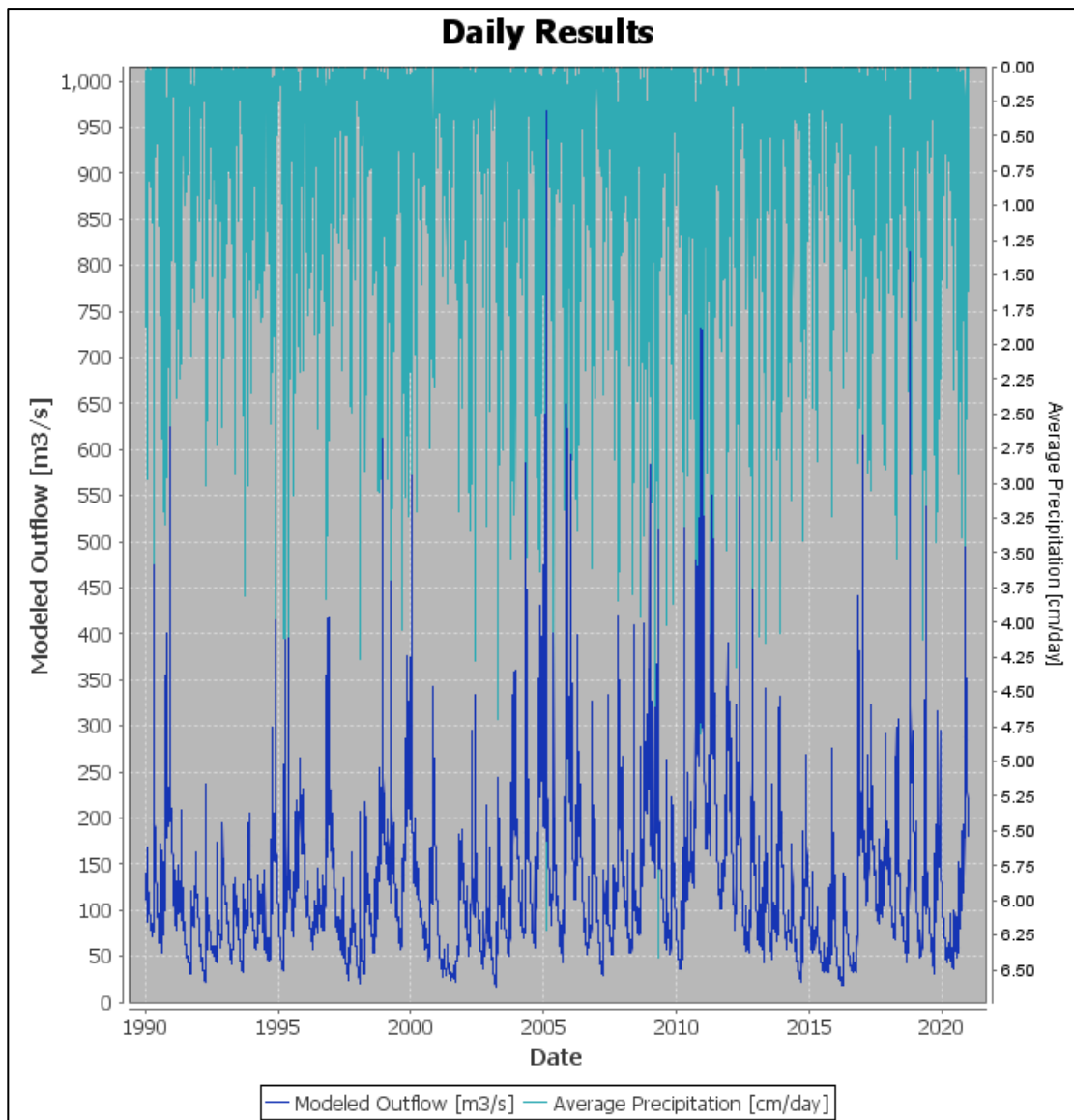
La Figura 14 ilustra la huella estacional del río Zulia. El sistema experimenta dos periodos de estiaje severo: el principal ocurre a mitad de año, alcanzando su punto más crítico en el mes de agosto con 67,26 m³/s, seguido por una fuerte recesión en marzo (86,06 m³/s). Por su parte, la recarga del sistema está dominada por dos picos unimodales estacionales: el primero en mayo (131,73 m³/s) y el máximo absoluto en noviembre (189,43 m³/s). Esta asimetría intraanual indica que la capacidad de regulación natural del suelo (AWC) y los acuíferos conectados en la cuenca

no son suficientes para sostener los caudales altos durante la época seca, lo que desencadena una rápida transición hacia los periodos de déficit.

Finalmente, el análisis a paso diario permite observar la verdadera resiliencia del sistema frente a eventos instantáneos.

Figura 15.

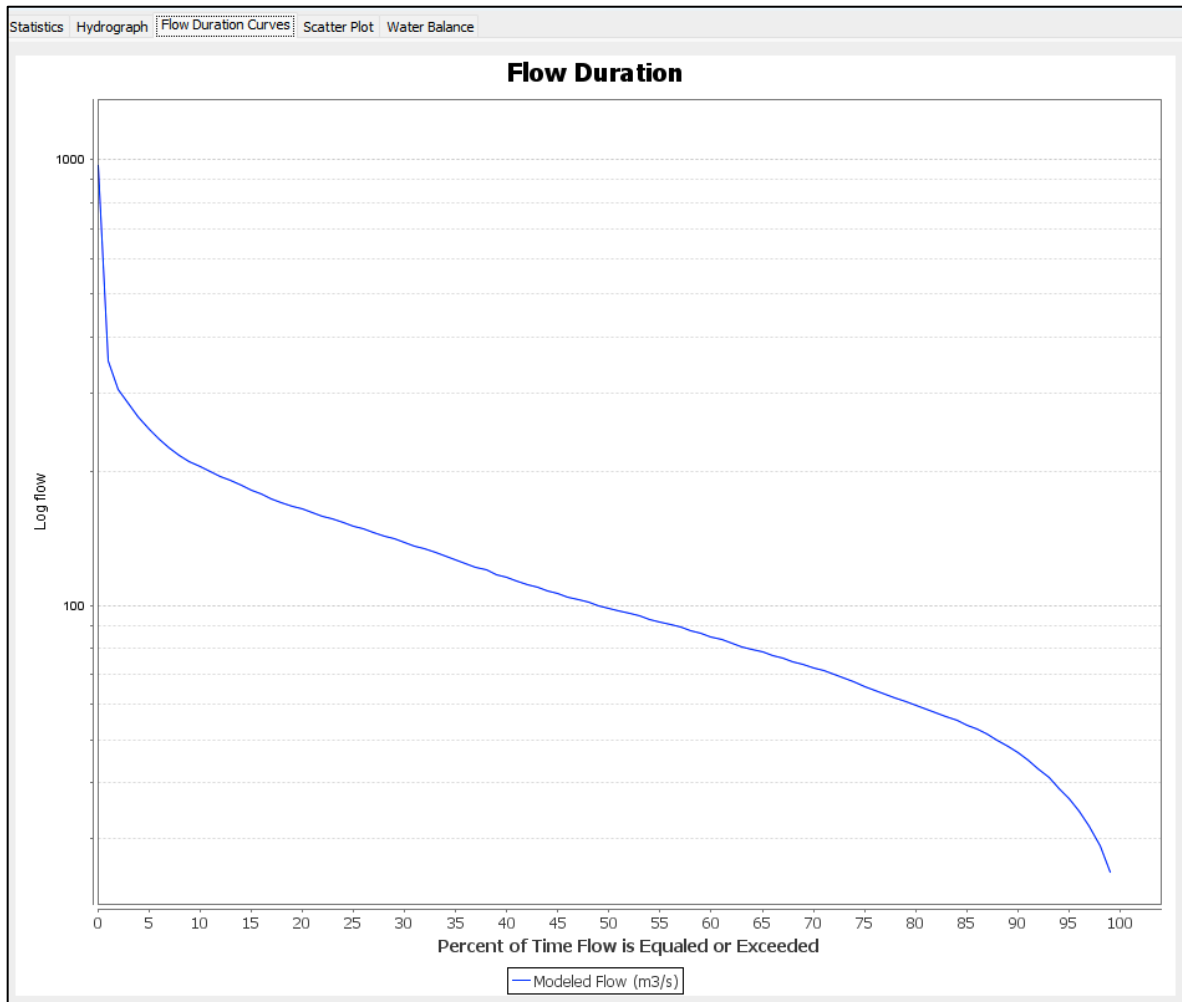
Hidrograma periodo base 1989 - 2020.



Nota. Elaboración propia.

Figura 16.

Curva de duración de caudales de oferta del periodo base 1989-2020.



Nota. Elaboración propia.

El hidrograma diario refleja una respuesta del tipo *flashy* (picos pronunciados y recesiones rápidas), en donde las tormentas intensas de la cuenca alta generan caudales instantáneos que superan los 700 m³/s, pero que drenan con rapidez.

La síntesis probabilística de este comportamiento se resume magistralmente en la Curva de Duración de Caudales en escala logarítmica, considerada la "firma hidrológica" de la cuenca. La curva presenta tres zonas claramente diferenciadas:

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

La zona de altos caudales (0% al 10% de excedencia) exhibe una pendiente muy pronunciada, confirmando que los caudales de crecida son producto de la escorrentía superficial directa y rápida, con bajo tiempo de retención.

La zona de caudales medios (del 10% al 70% de excedencia) muestra una pendiente moderada a suave. Este tramo representa el flujo base aportado por la lenta liberación del almacenamiento subsuperficial y la interacción acuífero-río, evidenciando el rol vital que cumplen las coberturas vegetales (CN) y los parámetros de infiltración (Seepage) calibrados previamente para sostener el río la mayor parte del año.

La zona de bajos caudales (> 85% de excedencia) y la caída abrupta en la cola de la curva son una señal de alerta técnica. Indica que, durante las sequías prolongadas, los almacenamientos naturales se agotan rápidamente, dejando a la cuenca expuesta a caudales extremadamente bajos, poniendo en riesgo tanto la integridad del caudal ambiental como el suministro continuo de los distritos de riego y acueductos.

6.2.5 Determinación del caudal ambiental y capacidad de regulación

La estimación de la oferta hídrica disponible exige descontar el volumen de agua necesario para el sostenimiento de los ecosistemas acuáticos y los procesos ecológicos del río. En la presente investigación, la determinación de este caudal ambiental se fundamentó en los lineamientos normativos del Estudio Nacional del Agua (ENA 2024) elaborados por el IDEAM.

La metodología del ENA establece que el caudal de restricción ambiental no debe ser un valor estático arbitrario, sino que debe estar condicionado por la capacidad intrínseca de la cuenca para amortiguar los extremos hidrológicos. Para cuantificar esta capacidad, se calculó el Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH), el cual se define como la relación entre el volumen

almacenado temporalmente en la cuenca y el volumen total escurrido, evaluados a partir de la Curva de Duración de Caudales (CDC) simulada en el periodo base.

El cálculo del índice se rige por la siguiente expresión matemática (IDEAM, 2024):

Ecuación 8.

Índice de Regulación Hídrica (IRH).

$$IRH = \frac{V_p}{V_t}$$

Donde V_t es el volumen total equivalente al área bajo la curva de duración de caudales medios diarios, calculado como:

Ecuación 9.

Volumen total del área bajo la CDC

$$V_t = \Delta P_{exc} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{(Q_i + Q_{i+1})}{2}$$

Y V_p es el volumen parcial equivalente al área bajo la línea de caudal medio Q_{medio} en la misma curva de duración.

De acuerdo con las directrices del ENA (2024), la asignación del percentil de protección ambiental no obedece a una conveniencia antrópica, sino a la necesidad de respetar las condiciones históricas de estiaje bajo las cuales han subsistido las comunidades biológicas. Por ello, se aplica el siguiente umbral basado en el IRH:

- **Subzonas con alta regulación (IRH > 0.70):** Al poseer una fuerte capacidad natural de retención, estos sistemas mantienen un flujo base sostenido. Los ecosistemas acuáticos están adaptados a esta abundancia constante, por lo que la norma exige preservar esta dinámica ecológica histórica asignando el percentil Q75 de la CDC, lo que garantiza un mayor volumen de agua remanente en el cauce.

- **Subzonas con regulación moderada a baja ($IRH < 0.70$):** Estas cuencas experimentan de forma natural un agotamiento severo durante los periodos secos. La biota acuática ha evolucionado para sobrevivir bajo estas condiciones críticas. Por ende, la norma asigna al percentil Q85 un valor de caudal menor, para replicar fielmente el régimen de estiaje histórico del río, evitando imponer un umbral artificialmente alto que alteraría el balance ecológico natural del sistema.

Al procesar la serie de caudales diarios simulados (1989-2020) en el exutorio de la cuenca (Puerto León), el análisis matemático arrojó un Índice de Retención y Regulación Hídrica (IRH) de 0.77, ubicando a la cuenca en la categoría de regulación Alta.

Este resultado es físicamente revelador. Si bien la cuenca superficial presenta respuestas rápidas (*flashy*) ante eventos de precipitación extrema, el valor del IRH demuestra que el sistema subsuperficial (suelos y acuíferos conectados en la cuenca alta) posee una excelente capacidad de retención y liberación lenta. Esta *regulación natural* es la responsable de mantener el río Zulia vivo durante los periodos de estiaje. Sin embargo, esta alta regulación natural no exime al sistema de sufrir estrés hídrico si la demanda antrópica supera este flujo base y no se cuenta con infraestructura de regulación artificial.

Dando estricto cumplimiento a la metodología del ENA (2024) para cuencas con $IRH > 0.70$, se estableció como caudal ambiental el percentil Q75 de la serie histórica. Al proyectar este percentil sobre la curva de duración de caudales naturales, el requerimiento ecológico mínimo para el exutorio del río Zulia (COMID 300468700) se fijó en 65,59 m³/s.

Este caudal de 65.59 m³/s se establece como el umbral normativo y de referencia diagnóstico para la cuenca. Si bien en las fases posteriores los algoritmos de optimización de *WaterALLOC* gestionarán internamente el balance de masas y el tránsito de flujos de acuerdo

con su propia arquitectura de red, este valor calculado operará como el estándar teórico fundamental. Permitirá contrastar y discutir si los escenarios de escasez simulados y las futuras asignaciones de demandas consuntivas llegan a vulnerar la franja de sostenibilidad ecosistémica del río Zulia.

6.2.6 Proyecciones hidrológicas al año 2060 por escenario SSP.

Para cuantificar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad hídrica futura, se forzó el modelo HydroBID utilizando las series regionalizadas de precipitación y temperatura correspondientes a las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0) suministradas por el IDEAM. La simulación continua abarcó el horizonte de proyección 2021-2060, subdividido en dos periodos de análisis (2021-2040 y 2041-2060) para evaluar la tendencia temporal.

El análisis se centró en extraer el caudal medio multianual proyectado en el exutorio principal (Estación Puerto León) y contrastarlo con el rendimiento de la línea base histórica (115.90 m³/s).

Tabla 6.

Variación porcentual de la oferta hídrica multianual proyectada frente a la línea base.

Escenario	Horizonte Temporal	Oferta Proyectada (m ³ /s)	Variación Absoluta (m ³ /s)	Variación Porcentual (%)
Periodo Base de 1989 al 2020 con una oferta hídrica de 115.90 m³/s				
SSP1-2.6	2021 – 2040	128,14	12,24	10,56
	2041 - 2060	136,69	20,79	17,94
SSP2-4.5	2021 – 2040	126,07	10,17	8,77
	2041 - 2060	125,22	9,32	8,04
SSP3-7.0	2021 – 2040	125,03	9,13	7,88
	2041 - 2060	117,99	2,09	1,80

Nota. Elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla, la respuesta hidrológica del modelo desafía la noción de una desecación volumétrica progresiva. Matemáticamente, todos los escenarios proyectan un

incremento en el rendimiento hídrico medio anual de la cuenca, fluctuando desde un moderado +1.80% en el escenario más crítico a largo plazo (SSP3-7.0), hasta un +17.94% bajo el escenario optimista (SSP1-2.6).

Si bien desde una perspectiva aritmética anual el sistema experimentará una inyección de excedentes hídricos, el análisis a escala mensual revela una profunda desconfiguración del régimen bimodal histórico (ver matriz de deltas mensuales en el Anexo 1). El cambio climático no distribuirá esta agua extra de forma uniforme, sino que agudizará los extremos temporales de escasez y abundancia.

Por un lado, el primer periodo de estiaje del año sufrirá una severa intensificación. Bajo el escenario SSP3-7.0 (2041-2060), los caudales medios de febrero y marzo experimentarán reducciones críticas del -29% y -27% respectivamente frente a su línea base. Esta acentuación de la sequía a principios de año someterá al sistema a su mayor nivel de estrés hídrico histórico.

Por otro lado, la cuenca experimentará incrementos significativos de caudal durante los periodos de recarga (ej. mayo con aumentos de hasta +35%). El hallazgo más inusual se presenta en el estiaje de mitad de año (junio a agosto), el cual históricamente presentaba bajos rendimientos, pero que bajo las proyecciones climáticas registrará incrementos anómalos de entre el +16% y el +50%.

En conclusión, el aumento en la media multianual proyectada no se traduce en una mayor seguridad hídrica. Dado que la cuenca carece de infraestructura de regulación artificial, los excedentes volumétricos transitarán rápidamente en forma de esorrentía durante meses atípicos, dejando al sistema altamente vulnerable durante la recesión crítica del primer trimestre.

6.3 Balance Hídrico y Análisis de Escasez – WaterALLOC

Tomando como insumo continuo los caudales diarios simulados previamente en la herramienta HydroBID, se ejecutó el modelo de asignación WaterALLOC. Esta fase permitió realizar la

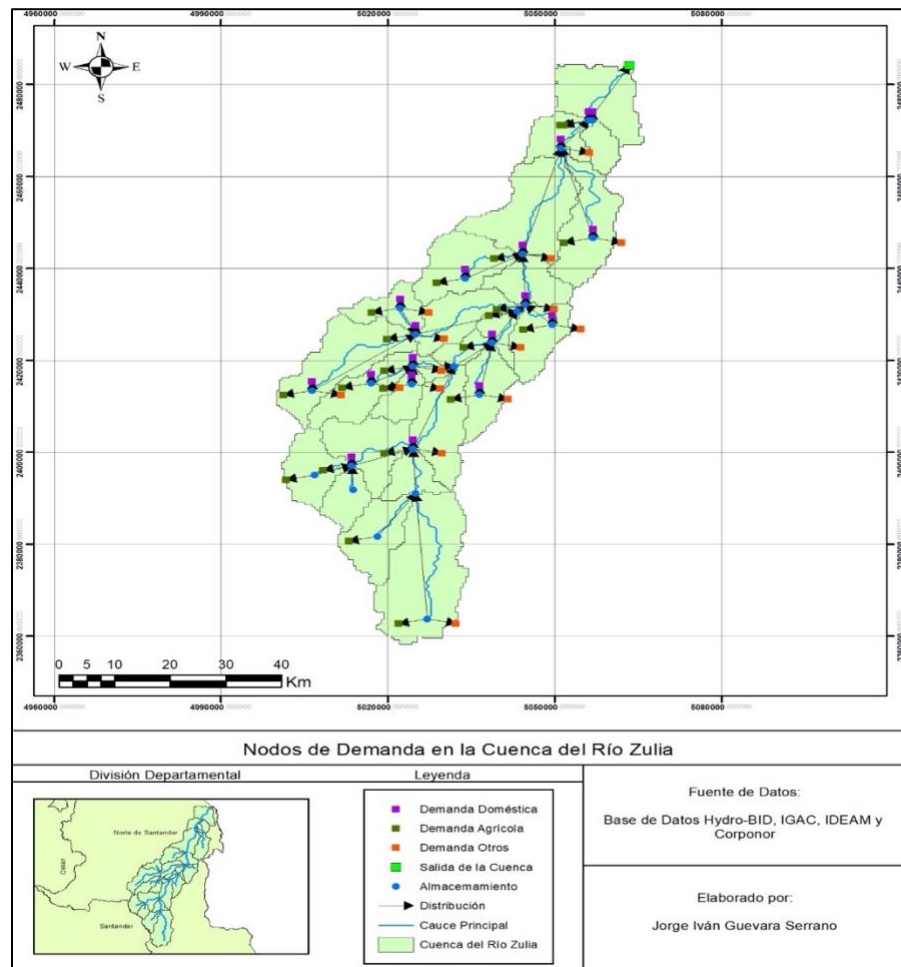
EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

integración del balance de masas, proyectando la relación oferta-demanda bajo las condiciones históricas observadas (línea base) y contrastándola con el comportamiento proyectado bajo la influencia de los tres escenarios climáticos SSP al año 2060.

6.3.1 Esquema de red de flujo: nodos, arcos y prioridades de asignación

Figura 17.

Nodos de demanda en la cuenca del río Zulia.



Nota. Elaboración propia.

La Figura 17 presenta la topología espacial de la red de flujo y la ubicación de los nodos de demanda dentro de la cuenca del río Zulia. La representación geográfica permite identificar las

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

subcuencas donde existe al menos una concesión (ver figura 18) reglamentada por CORPONOR.

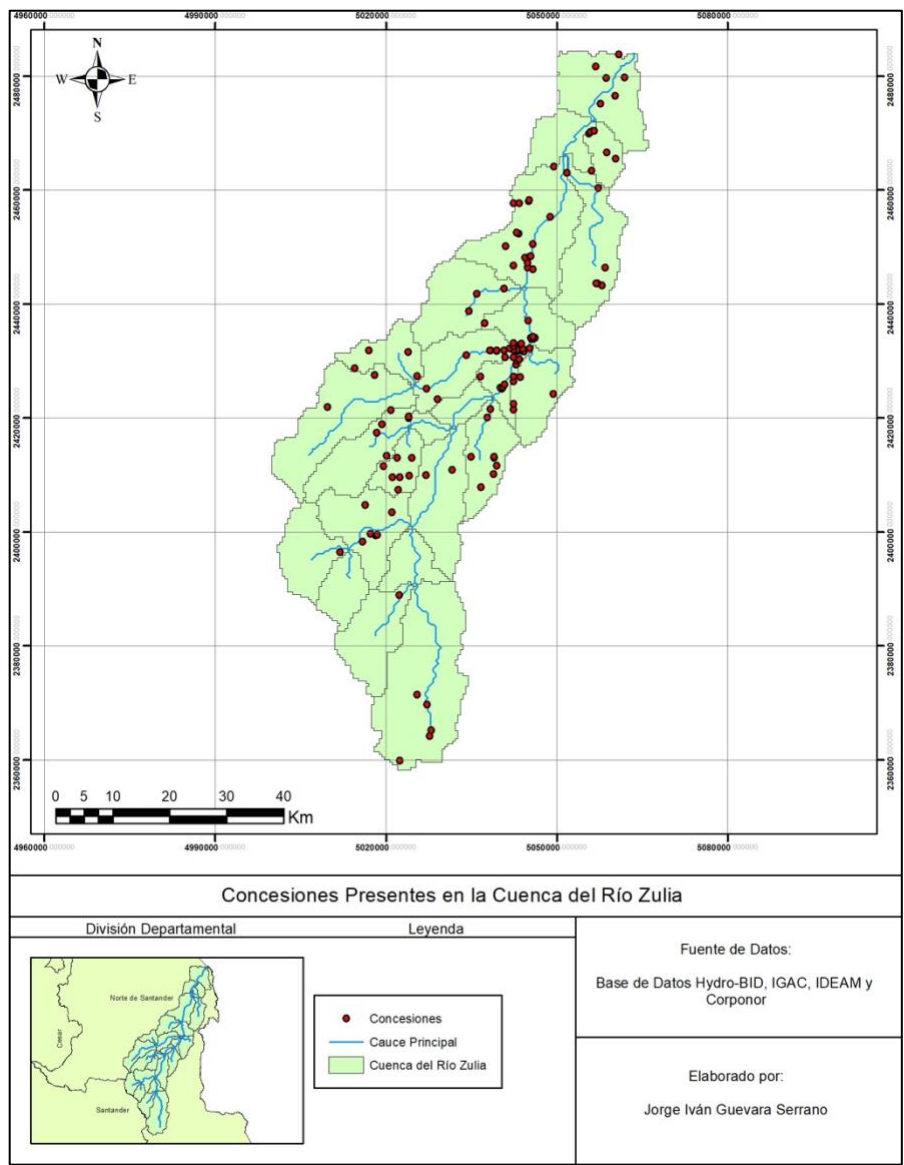
La red de extracción fue estructurada y agrupada en tres categorías principales de demanda:

- **Nodo de demanda "Agrícola":** Agrupa el consumo destinado exclusivamente para actividades agropecuarias y distritos de riego.
- **Nodo de demanda "Doméstico":** Contiene las concesiones de uso exclusivo para el consumo humano, incluyendo las captaciones destinadas a los acueductos urbanos y sistemas veredales. A este nodo se le asignó la máxima prioridad de abastecimiento en el algoritmo, en cumplimiento de la normativa hídrica nacional.
- **Nodo de demanda "Otros":** Corresponde a las actividades industriales, comerciales, de servicios, de recreación y toda aquella demanda consuntiva que no responde a la agricultura ni al uso doméstico.

Sobre esta base espacial, los arcos lineales con flechas direccionales indican las rutas de "Distribución", estableciendo la conectividad y el tránsito del flujo de agua desde las fuentes naturales o nodos de oferta hacia las áreas de demanda, mientras que el nodo sumidero en el extremo superior derecho del esquema representa el exutorio o "Salida de la Cuenca".

Figura 18.

Concesiones Cuenca río Zulia.



Nota. Elaboración propia.

6.3.2 Balance oferta – demanda bajo escenario histórico (línea base)

Los resultados de déficit volumétrico arrojados por el modelo de asignación para el periodo histórico continuo (1989-2020) se sintetizan en la Tabla 7.

Tabla 7.*Déficit - Periodo Base.*

Déficit - Periodo Base (miles de m³/día)			
Mes	Agrícola	Domestico	Otros
Enero	1.047	0.432	0.630
Febrero	5.373	1.705	1.863
Marzo	0.286	0.025	0.562
Abril	0.936	0.261	0.416
Mayo	0.000	0.000	0.000
Junio	0.930	0.260	0.234
Julio	0.000	0.000	0.015
Agosto	0.058	0.000	0.466
Septiembre	1.305	0.260	0.771
Octubre	0.000	0.000	0.000
Noviembre	0.930	0.260	0.234
Diciembre	0.000	0.000	0.000
Promedio	0.905	0.267	0.433

Nota. Elaboración propia.

A partir de estos registros, se identificó la magnitud y la distribución temporal de las fallas del sistema. El análisis evidencia que el nodo de demanda agrícola es el usuario más vulnerable, absorbiendo la mayor carga del déficit volumétrico promedio. Este comportamiento es consecuente con la caracterización socioeconómica de la cuenca, ya que la agricultura representa, por amplio margen, la demanda dominante y de mayor requerimiento hídrico en el territorio. Le sigue en nivel de afectación volumétrica el nodo de demanda "Otros", mientras que el nodo de demanda "Doméstico" presenta los déficits mejor controlados gracias a su prioridad de asignación en el sistema.

En términos de estacionalidad, el sistema experimenta un estrés hídrico severo durante el primer cuatrimestre del año. El pico máximo de escasez se concentra en el mes de febrero, registrando valores que superan a cualquier otro periodo. Esta marcada concentración indica que el flujo base de las fuentes hídricas superficiales está sometido a su mayor presión durante el inicio del año, revelando una deficiencia estructural de la cuenca para almacenar artificialmente (regulación

mediante infraestructura) los excedentes de agua durante los meses húmedos para su posterior distribución en el estiaje.

Por otra parte, se debe considerar como crítico el comportamiento proyectado para el nodo de demanda "Otros". Si bien su magnitud volumétrica es menor que la agrícola, este sector es el que se ve golpeado con mayor frecuencia, operando bajo condiciones de déficit en 9 de los 12 meses del año. Dado que esta categoría agrupa actividades productivas esenciales como la industria y el comercio, esta recurrencia crónica en las fallas constituye una limitante directa para el desarrollo económico continuo de la región, incrementando los costos operativos por racionamiento y afectando la rentabilidad sectorial.

Por el contrario, los meses de mayo, octubre y diciembre representan los únicos periodos de resiliencia total del sistema. Durante estos ciclos, influenciados por los picos del régimen bimodal de precipitaciones y los altos rendimientos hidrológicos, la oferta natural de la cuenca logra suplir el 100% de la demanda concesionada, garantizando la seguridad hídrica sin generar ningún tipo de racionamiento para los usuarios.

6.3.3 Balance oferta – demanda bajo escenarios SSP al año 2060

Los tres escenarios de cambio climático evaluados (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0) muestran un patrón estacional consistente respecto a la ocurrencia del déficit hídrico, el cual se concentra fuertemente en los meses de enero a abril para los tres nodos de demanda.

En cuanto a la magnitud de la falla, el nodo de demanda Agrícola se mantiene como el sector que presenta los valores de déficit más altos y consistentes entre los distintos escenarios (con promedios que oscilan entre 0.985 y 1.019 miles de m³/día), lo que ratifica que seguirá siendo el uso más vulnerable frente al desabasto hídrico independientemente del forzamiento climático. Por su parte, el nodo de demanda Doméstico muestra su mayor déficit promedio bajo el escenario

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

pesimista SSP3-7.0 (0.267 miles de m³/día), lo que alerta sobre una mayor presión futura sobre los sistemas de abastecimiento humano. El nodo de demanda Otros mantiene una magnitud de falla relativamente estable en las tres proyecciones.

Tabla 8.

Déficit - Periodo SSP 1.

Déficit - Periodo SSP 1 (miles de m³/día)			
Mes	Agrícola	Doméstico	Otros
Enero	1.65	0.390	0.412
Febrero	6.44	1.547	1.867
Marzo	0.41	0.014	0.273
Abril	0.94	0.241	0.235
Mayo	0.00	0.000	0.000
Junio	0.93	0.237	0.234
Julio	0.00	0.000	0.000
Agosto	0.00	0.000	0.000
Septiembre	0.93	0.237	0.234
Octubre	0.00	0.000	0.000
Noviembre	0.93	0.237	0.234
Diciembre	0.00	0.000	0.000
Promedio	1.019	0.242	0.291

Nota. Elaboración propia.

El déficit para el periodo proyectado bajo el escenario SSP1-2.6 se concentra principalmente en enero y febrero, siendo febrero el mes más crítico para los tres nodos de demanda. Marzo y abril presentan déficits moderados. Los meses de mayo, julio, agosto, octubre y diciembre no registran déficit de acuerdo con la modelación, indicando que en esos periodos la demanda fue cubierta satisfactoriamente.

Tabla 9.*Déficit - Periodos SSP 2.*

Déficit - Periodo SSP 2 (<i>miles de m³/día</i>)			
Mes	Agrícola	Doméstico	Otros
Enero	1.40	0.191	0.415
Febrero	6.55	1.513	1.526
Marzo	0.28	0.013	0.052
Abril	0.94	0.243	0.233
Mayo	0.00	0.000	0.000
Junio	0.93	0.237	0.232
Julio	0.00	0.000	0.000
Agosto	0.00	0.000	0.000
Septiembre	0.93	0.237	0.232
Octubre	0.00	0.000	0.000
Noviembre	0.93	0.237	0.232
Diciembre	0.00	0.000	0.000
Promedio	0.997	0.223	0.244

Nota. Elaboración propia.

El escenario intermedio SSP2-4.5 presenta un comportamiento temporal análogo: el déficit más alto ocurre en el mes de febrero, seguido de fallas menores en enero, marzo y abril. Los meses de recarga (mayo, julio, agosto, octubre y diciembre) no presentan déficit, mientras que junio, septiembre y noviembre vuelven a mostrar un déficit leve pero constante en los tres sectores de demanda.

Tabla 10.*Déficit - Periodo SSP 3.*

Déficit - Periodo SSP 3 (miles de m³/día)			
Mes	Agrícola	Doméstico	Otros
Enero	1.64	0.432	0.370
Febrero	6.38	1.705	1.673
Marzo	0.09	0.025	0.095
Abril	0.93	0.261	0.209
Mayo	0.00	0.000	0.000
Junio	0.93	0.260	0.209
Julio	0.00	0.000	0.000
Agosto	0.00	0.000	0.000
Septiembre	0.93	0.260	0.209
Octubre	0.00	0.000	0.000
Noviembre	0.93	0.260	0.209
Diciembre	0.00	0.000	0.000
Promedio	0.985	0.267	0.248

Nota. Elaboración propia.

Para el escenario pesimista a largo plazo (SSP3-7.0), el modelo también concentra su mayor falla en febrero (6.38 miles de m³/día en el nodo Agrícola; 1.705 miles de m³/día en Doméstico, siendo el más alto de los tres escenarios; y 1.673 miles de m³/día en Otros), manteniendo déficits menores en enero, marzo y abril. Al igual que en las demás trayectorias, junio, septiembre y noviembre presentan escasez leve y recurrente.

A partir de la modelación integrada, se concluye que la cuenca mantendrá un déficit hídrico estructural concentrado en el cuatrimestre de enero a abril. Mientras el sector agrícola seguirá enfrentando los mayores volúmenes desabastecidos, la demanda doméstica tenderá a agravarse bajo el escenario SSP3-7.0, factor que debe considerarse prioritario en la planificación de estrategias de adaptación hídrica.

Finalmente, es pertinente destacar una aparente paradoja revelada por la modelación: aunque el escenario SSP1-2.6 proyecta la mayor oferta hídrica anual (un incremento del +17.94% según el apartado 7.2.6), es precisamente el escenario que presenta el déficit agrícola promedio más alto

(1.019 miles de m³/día). Por el contrario, el SSP3-7.0, siendo el más seco en su oferta global (+1.80%), reporta un déficit agrícola ligeramente menor (0.985 miles de m³/día). Esta dinámica obedece a que la "abundancia" volumétrica del SSP1 se concentra en eventos de lluvia extrema durante los meses que no presentan fallas (mayo, octubre), generando excedentes que transitan rápidamente fuera de la cuenca debido a la carencia de infraestructura de regulación artificial. Esto demuestra contundentemente que, bajo las narrativas de cambio climático, un mayor rendimiento hídrico anual no equivale a mayor seguridad hídrica, pues la vulnerabilidad del sistema radica en la asimetría temporal del recurso.

6.3.4 *Índice del Uso del Agua (IUA).*

Para evaluar el grado de presión que ejerce la demanda socioeconómica sobre el sistema, se calcularon los valores del Índice de Uso del Agua (IUA) siguiendo la formulación matemática descrita en el apartado metodológico (IDEAM, 2024). Es imperativo precisar que la Oferta Hídrica Disponible Superficial empleada para este cálculo no correspondió al caudal total natural del río, sino al caudal remanente tras haber descontado el requerimiento ambiental estricto Q75 de 65.59 m³/s, definido en el apartado 7.2.5. Esto garantizó que el índice reflejara el estrés real sobre el agua verdaderamente "aprovechable" por los usuarios, sin comprometer la sostenibilidad del ecosistema acuático.

Para el periodo histórico, la cuenca del río Zulia registró un IUA multianual promedio de 46.32%. De acuerdo con la categorización oficial del ENA (IDEAM, 2024), este valor sitúa a la cuenca en un nivel de presión "Alto" (rango entre el 20% y el 50%). Esta clasificación advierte que el sistema hídrico superficial se encuentra operando cerca de su límite natural de resiliencia para satisfacer los requerimientos productivos.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

Sin embargo, el análisis temporal detallado reveló que este promedio anual enmascara una realidad intraanual mucho más severa. Al desagregar el índice estático a escala mensual multianual, se identificó que durante los periodos de recesión hídrica (específicamente en los meses de febrero, marzo, julio, agosto y septiembre), el IUA se dispara hacia la categoría "Crítica" (valores > 100%). El sistema experimentó su mayor estrés durante el mes de agosto, evidenciando que durante los picos del estiaje la demanda supera con creces la oferta hídrica disponible, desencadenando los racionamientos sectoriales descritos en los balances de *WaterALLOC*.

Por otro lado, al forzar el indicador con los resultados de las proyecciones climáticas, se obtuvieron las variaciones porcentuales expuestas en la Tabla 11.

Tabla 11.

Proyección del Índice del Uso del Agua (IUA) multianual y su variación respecto al periodo base.

Escenario	Horizonte Temporal	Valor IUA (%)	Nivel de Presión (ENA 2024)	Variación Porcentual (%)
Periodo Base de 1989 al 2020		46.32		Alto
SSP1-2.6	2021 – 2040	37.26	Alto	-19.52
	2041 - 2060	32.78	Alto	-29.23
SSP2-4.5	2021 – 2040	38.53	Alto	-16.82
	2041 - 2060	39.09	Alto	-15.61
SSP3-7.0	2021 – 2040	39.21	Alto	-15.35
	2041 - 2060	44.48	Alto	-3.97

Nota. Elaboración propia.

Los resultados de la tabla revelan una aparente paradoja: *bajo todos los escenarios de cambio climático, el IUA multianual promedio proyectado es menor que el de la línea base histórica*. Por ejemplo, bajo el escenario SSP1-2.6 a largo plazo, el IUA se reduce matemáticamente en un - 29.23%.

Una lectura superficial o netamente aritmética de este índice podría llevar a la conclusión errónea de que el cambio climático aliviará la presión hídrica de la cuenca. Sin embargo, a partir de la

integración dinámica realizada en esta investigación, se demuestra que esta reducción del IUA constituye un "falso positivo de resiliencia".

Esta distorsión matemática ocurre porque la fórmula del IUA opera con promedios totales agregados. Como se demostró en el apartado hidrológico (7.2.6), las proyecciones SSP indican que el cambio climático no reducirá el volumen global anual de precipitación, sino que lo concentrará en eventos extremos durante las épocas húmedas. Estas fuertes inyecciones de caudal incrementan significativamente el volumen del denominador en la ecuación, diluyendo el promedio multianual.

De hecho, al evaluar la escala intraanual de estos escenarios futuros, se comprobó que los meses de estiaje continuarán presentando picos de IUA estrepitosos y superiores al 100%, análogos a los de la línea base. No obstante, como la cuenca carece de capacidad de regulación artificial para almacenar los excedentes hídricos invernales, esta escasez severa en el verano seguirá siendo crítica. En conclusión, los índices de agregación estática anual como el IUA resultan insuficientes para la planificación de la adaptación al cambio climático.

A este análisis debe sumarse una consideración ecológica y metodológica fundamental respecto al factor de reducción ambiental. En la presente investigación, el caudal ambiental estricto, Q_{75} , se mantuvo como una restricción estática frente a las proyecciones futuras, asumiendo la necesidad de preservar el flujo base histórico bajo el cual han evolucionado las comunidades acuáticas de la cuenca. No obstante, a medida que el cambio climático altere progresivamente el régimen natural del río Zulia hacia el año 2060, este factor no será inmutable en la realidad. La gestión futura del recurso hídrico exigirá actualizar dinámicamente este caudal ambiental para responder a los nuevos umbrales de supervivencia y adaptación evolutiva de los ecosistemas frente a los estiajes extremos proyectados.

6.3.5 Índices de Desempeño del Sistema: Confiabilidad y Vulnerabilidad.

Para evaluar la resiliencia global de la cuenca desde la perspectiva de la gestión del recurso, se calcularon los índices de desempeño del sistema a nivel de exutorio. En este apartado se analizan de manera conjunta dos métricas complementarias que operan como "índices hermanos": la Confiabilidad Volumétrica R_v , que mide el porcentaje del volumen total demandado que fue exitosamente suministrado, y la Vulnerabilidad, que cuantifica la severidad o magnitud promedio del déficit (en m^3/s) exclusivamente durante los eventos de falla. A esto se suma la Frecuencia de falla, expresada como el porcentaje de días en los que el sistema no logró satisfacer el 100% de los requerimientos.

Los resultados macroscópicos para el periodo histórico y los escenarios proyectados al 2060 se consolidan en la tabla 12.

Tabla 12.

Índices globales de desempeño hídrico del sistema para el exutorio de la cuenca.

Periodo	Confiabilidad Vol.(R_v)%	Vulnerabilidad (m^3/s)	Frecuencia de Falla (%)
Línea base (1989–2020)	98.59	0.79	41.69
SSP1-2.6 (2021-2060)	98.56	0.82	41.02
SSP2-4.5 (2021-2060)	98.63	0.78	41.02
SSP3-7.0 (2021-2060)	98.60	0.79	41.02

Nota. Elaboración propia.

Los resultados de la tabla revelan una dinámica operativa que, a simple vista, parece contradictoria, pero que describe a la perfección la realidad hidrológica de la cuenca del río Zulia.

Por un lado, el índice de Confiabilidad Volumétrica R_v presenta valores notablemente altos y estables, promediando un 98.6% tanto en el pasado como en las proyecciones futuras. Desde una

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

perspectiva puramente volumétrica a largo plazo, la cuenca tiene la capacidad de entregar casi la totalidad del agua que el sistema socioeconómico demanda.

Sin embargo, este alto porcentaje constituye un agregado matemático que enmascara la distribución temporal del recurso. Al observar la Frecuencia de Falla, la realidad operativa es diametralmente distinta. Durante el periodo base (11.687 días simulados efectivamente), el sistema falló en suministrar la demanda total durante 4.872 días, lo que equivale a un 41.69% del tiempo. Esta proporción de racionamiento se mantiene casi inmutable frente a los escenarios de cambio climático, donde el modelo reporta fallas en 5.992 días (41.02% del tiempo) para el horizonte de 40 años proyectado.

La conjunción de estos índices demuestra que la cuenca no adolece de una falta absoluta de agua a nivel anual, sino de una severa asimetría temporal. Los inmensos volúmenes de agua que transitan por el río durante las temporadas de lluvia elevan la confiabilidad matemática al 98%, pero como la cuenca no posee la infraestructura de regulación artificial necesaria para almacenar esa abundancia, el sistema colapsa operativamente durante el estiaje (especialmente entre enero y abril).

Cuando estas fallas estacionales ocurren, el Índice de Vulnerabilidad cuantifica la severidad volumétrica de dicho desabastecimiento. Este valor promedio —que para el periodo base fue de $0.79 \text{ m}^3/\text{s}$ — representa la brecha exacta entre el volumen teórico exigido por la ley y lo que la cuenca físicamente pudo entregar de forma simultánea. En la realidad territorial, esta brecha matemática se traduce en un conflicto socioambiental directo: para evitar la pérdida de sus cosechas durante el estiaje, el sector agrícola tiende a extraer la totalidad de sus requerimientos hídricos independientemente de la escasez. En consecuencia, este déficit recae forzosamente sobre

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

los usuarios de aguas abajo y, de manera más crítica, sobre el ecosistema acuático, vulnerando silenciosamente el caudal base del río Zulia durante el 41% del tiempo evaluado.

7 Lineamientos de Gestión Integral del Recurso Hídrico

Los resultados obtenidos mediante la simulación hidrológica distribuida y la evaluación de la asignación del recurso evidencian que el sistema hídrico natural de la cuenca del río Zulia históricamente no ha tenido ni tendrá la capacidad de satisfacer la totalidad de la demanda durante los periodos de estiaje, una vulnerabilidad estructural que persistirá bajo las proyecciones de cambio climático. Como se debatió en el análisis de resultados, la aparente resiliencia operativa que se percibe obedece a una falla en la gobernanza que materializa una profunda injusticia hídrica: el déficit volumétrico no se asume socioeconómicamente, sino que es arrebatado directamente al ecosistema y a los usuarios menores. Asimismo, se demostró que la dependencia institucional de agregados nacionales macroscópicos (como el ENA) o de diagnósticos hidrológicos estáticos y desactualizados (POMCA) resulta insuficiente, revelando crisis estacionales y realidades locales que suelen quedar ocultas. Ante esta vulnerabilidad, se hace imperativo transitar de una gestión puramente administrativa hacia un modelo de adaptación basado en evidencia técnica, cuyos lineamientos deben servir como insumo para las autoridades ambientales y territoriales.

Ante este panorama, los lineamientos que se presentan a continuación se estructuran como un instrumento de adaptación técnica que articula los objetivos de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH), orientados a garantizar la sostenibilidad hídrica, entendida bajo los preceptos de la reciente Política Nacional del Agua 2026 (Minambiente). Estos lineamientos asumen el agua como un bien común y buscan consolidar el Ordenamiento del Territorio Alrededor del Agua (OTAA), mediante la optimización de la oferta, la eficiencia en la demanda y el fortalecimiento de la capacidad de respuesta institucional.

En este sentido, la primera línea de intervención debe orientarse a la regulación física de la oferta hídrica. Dado que las proyecciones climáticas indican un aumento de la precipitación concentrado

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

en eventos extremos, el desafío de la cuenca no es la carencia absoluta de agua, sino la incapacidad temporal para retenerla. Para mitigar esta asimetría, se recomienda la estructuración de proyectos de infraestructura de regulación artificial, como reservorios multipropósito o "bancos de agua" en zonas estratégicas de la cuenca media y baja.

De manera paralela, bajo un esquema de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) y Pagos por Servicios Ambientales (PSA), se debe priorizar la reforestación de las zonas de recarga hídrica en la cuenca alta y el cerramiento preventivo de los ecosistemas lénticos. El aumento de la cobertura vegetal mejorará la infiltración profunda, permitiendo que los suelos actúen como un embalse natural de liberación lenta durante los periodos de sequía.

De manera complementaria, es apremiante la optimización y el control estricto de la demanda hídrica, erradicando el paradigma de la extracción ineficiente e ilimitada. Para lograrlo, se propone a la autoridad ambiental migrar del modelo tradicional de concesiones fijas hacia un esquema normativo de concesiones dinámicas y reglas ajustables por variabilidad climática. Bajo este marco, los volúmenes permitidos de extracción deberán ajustarse temporalmente en función de la disponibilidad hídrica real, estableciendo topes rigurosos de captación durante los meses críticos. Asimismo, para evitar la pérdida de capacidad de dilución y asimilación del río durante el estiaje, la Corporación no debe imponer restricciones irreales a los vertimientos que terminen fomentando la ilegalidad o la clandestinidad. Por el contrario, debe exigir y vigilar la optimización operativa de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y el cumplimiento estricto de sus mantenimientos rutinarios. Ante las limitantes financieras de algunos entes territoriales o pequeñas industrias, se debe garantizar, como mínimo, la implementación de tratamientos primarios eficientes e incentivar progresivamente el reúso y la recirculación de aguas residuales tratadas como fuentes alternas. Para lograrlo, la autoridad ambiental debe trascender su rol netamente

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

sancionatorio y asumir plenamente su vocación de entidad técnico-científica, brindando asesoría y acompañamiento constante en la ejecución de estas mejoras.

Esta transición exige una modernización tecnológica inmediata: la autoridad debe condicionar el otorgamiento de concesiones a grandes usuarios agroindustriales a la instalación de medidores de caudal con transmisión de datos (telemetría satelital) en tiempo real. Esta automatización —articulada con el fomento del monitoreo comunitario—eliminará la dependencia operativa de las inspecciones manuales en campo, a la par que se exige a los acueductos municipales la formulación de programas rigurosos de reducción de Agua No Contabilizada (ANC). Las naturales tensiones sectoriales derivadas de estos controles deben ser gestionadas mediante Acuerdos de Corresponsabilidad del Agua, fortaleciendo el Consejo de Cuenca como máxima mesa de gobernanza y resolución de conflictos.

Finalmente, el propósito transversal de estas intervenciones requiere un fortalecimiento institucional profundo orientado a la protección irrestricta del ecosistema acuático. La realidad actual evidencia un vacío jurídico y técnico, pues no existe una declaración oficial y específica del caudal ambiental para esta fuente hídrica. Para corregir este fallo, es perentorio que CORPONOR formalice esta asignación mediante una resolución específica, cuya metodología no se limite a fórmulas empíricas o aforos volumétricos aleatorios en campo que carecen de contexto histórico. Se exige que el cálculo del caudal ambiental se fundamente en la historia evolutiva y los umbrales de adaptación de especies clave, requiriendo para su modelación un periodo de datos continuo de al menos 30 años, con actualizaciones obligatorias cada cuatro años. Para garantizar este rigor, la Corporación debe conformar una unidad técnica de investigación hidrológica exclusiva, liberando a sus profesionales de la carga administrativa, procedimental y de atención a recursos jurídicos

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

rutinarios, permitiéndoles dedicarse a la modelación continua de la cuenca para la toma de decisiones asertivas frente al cambio climático.

8 Discusión y Conclusiones.

Al evaluar el conjunto de resultados de la modelación, la interpretación de las métricas de bondad exigió contextualizar la naturaleza antrópica de la cuenca y el objetivo central de la simulación: la alimentación del modelo de asignación *WaterALLOC*. Según las directrices internacionales de Moriasi et al. (2007, 2015), cualquier desviación de volumen inferior al $\pm 10\%$ se clasifica como "Muy Buena". En este sentido, el modelo arrojó errores virtualmente nulos en calibración (0.13% en Cornejo y -0.15% en Puerto León). Aún más destacable resultó el periodo de validación (2011-2020), donde el modelo enfrentó una década climáticamente contrastante y mantuvo un error volumétrico mensual de apenas 0.90%. Esto demostró que los parámetros geomorfológicos (AWC de 0.10) y de pérdidas (Seepage de 0.002) no fueron producto de un sobreajuste matemático a un año específico, sino que representaron fielmente la física a largo plazo de la cuenca. El modelo garantizó un cierre de balance de masas excepcional, validándose como una herramienta robusta para eliminar la incertidumbre por sesgo en las proyecciones futuras de la oferta hídrica al año 2060.

Los valores de la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) presentaron magnitudes discretas en calibración (0.13) y cayeron a valores negativos en la validación (-0.65). Sin embargo, en el contexto de esta investigación, un NSE negativo no indicó un fallo matemático del algoritmo, sino que pasó a ser un indicador directo del grado de alteración antrópica. La curva de duración de caudales en validación fue la radiografía perfecta de esta intervención: el modelo simuló más agua de la que el río realmente llevó en los días de caudal medio alto (entre el 5% y el 40% de excedencia) y subestimó en el rango de excedencia del 40% y 90%. La cuenca media baja está fuertemente intervenida por la extracción masiva no solo del Distrito de Riego Asozulia sino de grandes usuarios. Durante la década de 2011-2020, al no disponer de series dinámicas diarias de

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

la operación de compuertas para forzar al modelo como una salida del sistema, *HydroBID* asumió el tránsito natural del agua por el cauce, mientras que en la realidad esos volúmenes fueron desviados hacia los cultivos. El modelo predijo exitosamente la respuesta hidrológica natural; la estación limnimétrica mostró la respuesta alterada por el hombre. La dificultad para replicar picos instantáneos obedeció también a la incertidumbre espacial de la precipitación convectiva, propia del trópico. Intentar forzar el NSE a valores "satisfactorios" (ej. >0.50) habría requerido alterar los parámetros a valores físicamente irreales (como una evapotranspiración de 1.0), lo cual habría derivado en una inconsistencia paramétrica (*overfitting*), alejando al modelo de su realidad física. Esta decisión metodológica concordó y superó las limitaciones advertidas por estudios previos en la región, como los de Díaz González & Suárez Rodríguez (2019), quienes señalaron la alta complejidad de modelar regímenes andinos fuertemente intervenidos. En conclusión, se priorizó un modelo físicamente coherente que, si bien reconoció sus limitaciones para la predicción de hidrogramas diarios alterados por la gestión humana y no resultó apto para el diseño de obras contra inundaciones, representó la mejor aproximación volumétrica posible a la realidad de la cuenca, proporcionando una base sólida, exacta y conservadora para la evaluación de escasez.

Al forzar este modelo hidrológico calibrado con los escenarios de cambio climático al año 2060, los datos arrojaron hallazgos que contrastan con la narrativa tradicional de desecación lineal. Partiendo de una oferta hídrica natural de línea base de $115.90 \text{ m}^3/\text{s}$, todos los escenarios evaluados proyectaron matemáticamente un incremento multianual, alcanzando su máximo bajo el escenario SSP1-2.6 con una oferta proyectada de $136.69 \text{ m}^3/\text{s}$ (+17.94%). Este superávit volumétrico anual concordó con las proyecciones de Arbuét et al. (2021) en modelos análogos y validó contundentemente los hallazgos de Mena-Rentería et al. (2025) para la cuenca vecina del río Pamplonita, demostrando que el forzamiento climático en esta zona de los Andes tropicales

inducirá tendencias de aumento significativo en la precipitación global. Sin embargo, el aporte crítico de esta investigación radicó en demostrar que más agua anual no equivale a seguridad hídrica, evidenciando un cambio de régimen climático bimodal hacia la agudización de extremos. La abundancia proyectada se concentrará en eventos de invierno intenso, mientras que los meses de estiaje experimentarán caídas estrepitosas; bajo el escenario SSP3-7.0 a largo plazo, los caudales medios de febrero y marzo presentarán disminuciones concluyentes del -29% y -27% respecto a la línea base.

La integración de esta oferta temporalmente asimétrica en el modelo de asignación *WaterALLOC* permitió desenmascarar la verdadera vulnerabilidad del sistema socioeconómico. Desde una perspectiva puramente matemática, la cuenca ostentó una Confiabilidad Volumétrica R_v superior al 98.5%. No obstante, a escala diaria, el sistema registró un déficit operativo severo: durante el periodo histórico, la oferta física no logró cubrir la demanda en 4.872 días (41.69% del tiempo), generando una vulnerabilidad promedio de 0.79 m³/s de caudal faltante. La revelación de este estrés diario constante demostró la superioridad de la modelación distribuida frente a diagnósticos recientes de agregación mensual en el río Zulia, como los presentados por Fernández-Cañas & Duarte-Sánchez (2024), o las métricas estáticas del Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2022). Dichas metodologías nacionales tendieron a promediar matemáticamente los excedentes de 400 m³/s del invierno con las carencias del verano, ocultando que el sistema colapsó operativamente durante casi la mitad del año.

Para interpretar rigurosamente este déficit promedio de 0.79 m³/s y atender a los límites epistemológicos de la simulación, es fundamental trazar una línea divisoria clara entre el resultado matemático arrojado por el modelo y la inferencia territorial. Desde la evidencia estrictamente computacional, el algoritmo de *WaterALLOC* opera bajo la premisa de evaluar la cuenca frente a

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

un escenario de máximo estrés regulatorio. Al forzar el modelo con una demanda teórica equivalente a la asignación legal máxima (sin imponer una restricción excluyente de caudal ambiental), el balance de masas resulta deficitario. En este entorno virtual, el software agota la oferta simulada y registra un faltante; es decir, el modelo demuestra matemáticamente que el sistema legal de concesiones es insostenible si se ejerce al 100% de su capacidad.

Sin embargo, la traslación de este colapso matemático al mundo real exige una interpretación territorial cuidadosa. La observación empírica en campo evidencia que el cauce principal del río Zulia mantiene un flujo visual continuo durante el estiaje. Esta discrepancia entre el agotamiento virtual y la persistencia del flujo real obedece a que la modelación representa una imagen prospectiva de riesgo, la cual difiere de la dinámica operativa actual por tres factores fundamentales: (i) en la realidad, los usuarios rara vez extraen simultáneamente la totalidad de su derecho concesionado legal; (ii) las infraestructuras físicas de captación no poseen la eficiencia hidráulica para retener el 100% de la escorrentía; y (iii) el cauce recibe flujos de retorno (escorrentía agrícola y vertimientos) que reponen parcialmente el volumen aguas abajo.

En consecuencia, a partir de la evidencia modelada, no resulta adecuado afirmar categóricamente que la cuenca carece actualmente de la capacidad física absoluta para sostener el río. En su lugar, se infiere que los resultados ilustran un escenario de vulnerabilidad prospectiva: reflejan el nivel de estrés crítico al que colapsará ineludiblemente el sistema territorial si se continúan otorgando concesiones bajo esquemas estáticos, si ocurre una sequía extrema que obligue a los usuarios a exigir el máximo de su derecho legal, y si no se toman acciones tempranas de adaptación. Bajo este escenario de inacción, la escasez proyectada obligará a racionar el recurso productivo y comprometerá severamente los caudales de dilución necesarios para la resiliencia del ecosistema acuático.

Finalmente, fue precisamente en esta dinámica extractiva extrema donde se consolidó la conclusión ecológica de mayor impacto del estudio. Al absorber casi la totalidad de la oferta limpia disponible, el sistema sacrificó silenciosamente al ecosistema acuático. El agua remanente que se observó en el cauce durante el estiaje dejó de ser un flujo natural sano y pasó a estar dominada por los retornos de riego y las descargas residuales. Al perder el volumen necesario de agua natural, el río perdió su capacidad de dilución, resiliencia y autodepuración, reduciendo drásticamente el oxígeno disuelto, comprometiendo la biota acuática. Esta asfixia ecosistémica, que ya ha provocado mortandad de peces cerca del municipio de El Zulia y la quebrada Tonchalá, amenaza con agravarse bajo las disminuciones del -29% proyectadas para los estiajes futuros.

Se concluyó de manera definitiva que la cuenca del río Zulia no adoleció de una carencia absoluta de recursos hídricos en términos de volumen anual, sino de una profunda asimetría temporal agravada por una gobernanza permisiva y una falta de infraestructura de retención. El sistema actual operó superando sus umbrales históricos de sostenibilidad durante las épocas de recesión pluvial. Esta realidad territorial confirmó que las metodologías estáticas de gestión son insuficientes, validando de manera concluyente la urgencia de adoptar los lineamientos formulados en este estudio para transitar hacia una regulación física del recurso, garantizando así la adaptabilidad y seguridad hídrica frente a los inminentes extremos del cambio climático al año 2060.

8.1 Incertidumbre y Limitaciones de la Modelación.

El valor de esta investigación radica en la transición de una evaluación estática a un esquema dinámico mediante el acoplamiento de HydroBID y WaterALLOC; no obstante, los resultados cuantitativos aquí expuestos no deben interpretarse de manera determinística, sino como

proyecciones sujetas a fuentes de incertidumbre inherentes al proceso de modelación, las cuales se desglosan a continuación:

Dimensión Climática: Los resultados proyectados asumen las trayectorias de los escenarios SSP (Cuarta Comunicación Nacional). La incertidumbre radica en los procesos de *downscaling* y en la alta complejidad para simular con exactitud la precipitación convectiva propia del trópico andino. Por lo tanto, los valores futuros representan tendencias proyectadas bajo los escenarios modelados y no relaciones de causalidad absolutas atribuibles linealmente al cambio climático.

Dimensión Hidrológica y Paramétrica: La simplificación de los procesos físicos en la cuenca implica un grado de incertidumbre paramétrica. Se priorizó un modelo hidrológico conservador, justificando la elección de parámetros geomorfológicos y estaciones (Cornejo y Puerto León) para garantizar un cierre de balance de masas óptimo a largo plazo, asumiendo limitaciones en la réplica exacta de picos de caudal instantáneos.

Dimensión de la Demanda y Operación: Como se precisó en el diseño metodológico, la demanda hídrica se asumió como una serie continua basada en el caudal legal concesionado (máxima presión) y no en el consumo real medido. Asimismo, el modelo no integró series dinámicas reales de operación de compuertas (ej. Distrito de Riego Asozulia), lo que representa una fuente de incertidumbre respecto a las prácticas humanas de extracción diaria en el territorio.

Dimensión del Modelo (WaterALLOC): Los algoritmos de asignación optimizan el flujo bajo reglas de prioridad lógica y penalizaciones matemáticas. La inferencia territorial debe separar estrictamente lo que es una falla volumétrica en la red del modelo, de lo que ocurre físicamente en el cauce (flujos de retorno no monitoreados), evitando afirmaciones categóricas sobre el agotamiento total del recurso en campo.

9 Recomendaciones

A partir de los hallazgos, las limitantes metodológicas y los vacíos de información identificados durante el desarrollo de la presente investigación, se formulan las siguientes recomendaciones dirigidas a futuros investigadores, maestrands y entidades académicas que deseen profundizar en la modelación y gestión de la cuenca del río Zulia:

Transición hacia un análisis espacial a escala de subcuenca: Dado que la presente investigación evaluó la resiliencia hídrica macroscópica a nivel del exutorio (con un fuerte enfoque en la asimetría temporal), se recomienda a futuros investigadores aprovechar la topología de red construida para ejecutar el esquema de modelación de manera espacialmente distribuida. Calcular la oferta hídrica natural, estimar los caudales ambientales y evaluar los índices de desempeño (IUA, Confiabilidad y Vulnerabilidad) de forma individual para las 25 subcuencas, permitirá consolidar un diagnóstico no solo temporal, sino profundamente espacial. Esta resolución detallada identificará con exactitud cuáles Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) concentran la mayor severidad del déficit, facilitando a las autoridades ambientales la focalización territorial de sus esfuerzos de conservación, el control estricto de concesiones y la ubicación estratégica de nueva infraestructura de regulación.

Transición hacia una modelación de demanda dinámica (Pulsos de Riego): Se recomienda superar el enfoque de demanda concesionada estática y constante a paso diario. En la realidad territorial, los distritos de riego no extraen agua de manera continua, sino mediante pulsos sujetos al estado fenológico del cultivo y la precipitación antecedente. Futuros estudios deberían acoplar módulos agrológicos (evaluando coeficientes de cultivo K_c y evapotranspiración real) para simular patrones de extracción agrícola más fieles a la realidad operativa.

Cuantificación de la demanda "oculta" o extraoficial: La presente investigación operó bajo la base de datos oficial de concesiones otorgadas por CORPONOR. Sin embargo, la realidad de la cuenca

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

evidencia la existencia de un volumen significativo de extracciones no legalizadas. Se sugiere a futuros investigadores desarrollar metodologías de estimación (ya sea mediante teledetección de áreas irrigadas vs. áreas concesionadas o análisis estocásticos) para cuantificar esta demanda extraoficial, la cual agudiza el déficit hídrico de la cuenca más allá de lo que los modelos normativos pueden predecir.

Acoplamiento de modelos de calidad de agua: Habiendo demostrado mediante el balance volumétrico que el río Zulia pierde su capacidad de dilución y asimilación durante los periodos de estiaje severo (lo cual ya ha desencadenado episodios de mortandad de peces), es imperativo que las próximas investigaciones integren módulos de calidad del agua (ej. QUAL2K o herramientas afines). Esto permitirá cuantificar la concentración de cargas contaminantes (DBO, SST, nutrientes) bajo los escenarios de escasez proyectados por el cambio climático.

Incorporación de reglas de operación de infraestructura: Para resolver el desacople temporal de la eficiencia dinámica (NSE) evidenciado en las simulaciones históricas, se recomienda que futuros esfuerzos de modelación exijan a los operadores de los distritos de riego (ej. Asozulia) y la Termotasajero el suministro de series diarias de operación de compuertas. Forzar el modelo hidrológico con estas reglas de operación humana reales permitirá calibrar hidrogramas mucho más exactos para la cuenca baja.

10 Referencias

- Arango Figueroa, V. (2024). *Análisis de la Relación Oferta – Demanda Hídrica, Enfocado en la Gestión Integral del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Coello, Mediante la Aplicación de la Herramienta Computacional WATERALLOC* [Tesis de Maestría]. Universidad Santo Tomás. <http://hdl.handle.net/11634/58081>
- Arbuet, A., Pusineri, G., Mazzón, R., Bianchi, H. H., Scioli, C., Paris, M., Corrales, J., & Nalesso, M. (2021). Implementación del modelo HydroBID en la Cuenca Los Padres-Santa Fe, Argentina. *Aqua-LAC*, 13(1), 81–96. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2021-v13-1-06>
- Cabrera, J. (2012). *Modelos Hidrológicos*. Universidad Nacional de Colombia.
- Castañeda Morales, Y. (2016). *Modelación del efecto del cambio de uso del suelo en la cuenca del río Coello, bajo escenario de cambio climático, a través de la aplicación del modelo hidrológico SWAT* [Tesis de Maestría]. Universidad Católica de Manizales. <http://hdl.handle.net/11349/5089>
- Castillo, Y. (2018). *Evaluación de la incidencia del cambio climático en la oferta hídrica de la cuenca Lebrija Alto aplicando el modelo HydroBID* [Trabajo de Grado]. Unidades Tecnológicas de Santander.
- Catacolí, R., Schütz, T., & Avarado, N. (2023, 17 de marzo). *HydroBID: herramientas digitales para la evaluación del impacto ambiental sobre los servicios ecosistémicos*. Blog Sostenibilidad BID. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/hydrobid-herramientas-digitales-para-la-evaluacion-del-impacto-ambiental/>
- Chávez-Jiménez, A., & González-Zeas, D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *Ribagua*, 2(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

- Congreso de la República de Colombia. (1993). *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*. Diario Oficial No. 41.146.
- Congreso de la República de Colombia. (1997). *Ley 373 de 1997: Por la cual se establece el programa para el uso eficiente y ahorro del agua*. Diario Oficial No. 43.058.
- Congreso de la República de Colombia. (2018). *Ley 1931 de 2018: Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático*. Diario Oficial No. 50.667.
- CORPONOR. (2018). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica (POMCA) del Río Zulia: Fase de Diagnóstico*. Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental.
- CORPONOR. (2025). *Plan de Contingencia para la Atención del Desabastecimiento del Recurso Hídrico en la Cuenca del Río Zulia*.
- Díaz González, P. V., & Suárez Rodríguez, A. M. (2019). *Modelación hidrológica para el pronóstico de sequías en la cuenca del río Pamplonita bajo escenarios de cambio climático* [Tesis de Pregrado]. Universidad Santo Tomás.
<http://hdl.handle.net/11634/15306>
- Díaz, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227-240.
- Fernández, P. (2017). El desarrollo de la modelación matemática en hidrología. *Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 59, 99–109.
- Fernández-Cañas, R. D., & Duarte-Sánchez, L. F. (2024). La oferta hídrica del río Zulia en Colombia ante dos escenarios del cambio climático. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(1), 6124-6143.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

- Francés, F., & Bussi, G. (2014). Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. *Ribagua*, 1(1), 14–25. [https://doi.org/10.1016/S2386-3781\(15\)30004-9](https://doi.org/10.1016/S2386-3781(15)30004-9)
- Gélvez, J., & Rolón, M. (2018). *Análisis de la calidad del agua del río Zulia y su relación con los usos del suelo*. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Gupta, H. V., Beven, K. J., & Wagener, T. (2005). Model Calibration and Uncertainty Estimation. En M. G. Anderson (Ed.), *Encyclopedia of Hydrological Sciences*. John Wiley & Sons.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., & Loucks, D. P. (1982). Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), 14–20. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00014>
- Hernández, L., & Salamanca, J. (2019). *Análisis multitemporal del cambio de cobertura vegetal y su influencia en la generación de caudales pico de la cuenca del Río Sardinata* [Tesis de Especialización]. Universidad Católica de Colombia.
- IDEAM. (s.f.). *Demanda de agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Recuperado el 4 de octubre de 2025, de <http://www.ideam.gov.co/web/siac/demandaagua>
- IDEAM. (2018). *Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2022). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM, PNUD, MADS, & Cancillería. (2024). *Escenarios de cambio climático de la Cuarta Comunicación Nacional de Colombia*. Tercera Entrega.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

- IDEAM. (2025). *Nuevos escenarios de cambio climático a escala departamental para Colombia (Modelación CMIP6 / horizontes de tiempo 2021 – 2100)*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Ley, A., Bormann, H., & Casper, M. (2025). Climate change impact assessment on a German lowland river using long short-term memory and conceptual hydrological models. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102426.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102426>
- López, J. (2021). *Modelación hidrológica utilizando el software RS MINERVE en la subcuenca del río Villalobos enfocado a la gestión de riesgo* [Tesis de Licenciatura]. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lord, B., Corrales, J., Triana, E., Srivastava, A., Moreda, F., Basani, M., Carscasci, G., Lee, J., & Muñoz Castillo, R. (2024). *Piloting Drought Management Participatory Modeling-Based Approaches in Chile*. Banco Interamericano de Desarrollo.
<https://doi.org/10.18235/0005500>
- Loucks, D. P., & van Beek, E. (2017). *Water Resource Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models, and Applications*. Springer.
- Mena-Rentería, D., Peña-Guzmán, C., Sierra, R., & Rodriguez, M. (2025). Impact of climate change on the hydrological regime in a small watershed of the tropical Andean Plateau. *Sustainable Water Resources Management*, 11(2), 23. <https://doi.org/10.1007/s40899-024-01186-0>

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

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

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente). (2026). *Política Nacional del Agua para la Justicia Ambiental e Hídrica*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente). (2015). *Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible*.

Montenegro, J. J., & Wilmer, J. C. H. (2023). *Análisis a la problemática ambiental de la cuenca del rio Zulia con utilización de Sistemas de Información Geográfica SIG* [Tesis de Especialización]. Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

<https://repository.unad.edu.co/handle/10596/59317>

Moreda, F., Muñoz Castillo, R., & Miralles-Wilhelm, F. (2014). *Hydro-BID: An Integrated System for Modeling Impacts of Climate Change on Water Resources*. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0010604>

Muñoz-Castillo, R., Feng, L., & Moreda, F. (2018). *Hydro-BID Case Study: Rio Piura, Peru*. Banco Interamericano de Desarrollo.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Objetivos de Desarrollo Sostenible: Agua y saneamiento*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

Orozco, I., Ramírez, A. I., & Francés, F. (2018). Modelación de los impactos del Cambio Climático sobre los flujos y almacenamientos en una cuenca de alta montaña. *Ingeniería del Agua*, 22(3), 125. <https://doi.org/10.4995/ia.2018.8931>

Pabón, J. D., Rodríguez, N., Bernal, N. R., Castiblanco, M. A., & Sánchez, Y. V. (2013).

Modelamiento del efecto del cambio en el uso del suelo en el clima local-regional sobre

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

- los Andes colombianos. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 37(144), 379–391.
- Peñaloza, R., González, J., Guerra, F., & Gómez, H. (2008). La deforestación en la cuenca del río Zulia, Barinas, Venezuela. Análisis preliminar utilizando SIG. *Geoenseñanza*, 13(1), 71–82.
- Riahi, K., et al. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- Salinas, E. (2013). Reflexiones acerca del papel del ordenamiento territorial en la planificación y gestión ambiental. *Perspectiva Geográfica*, 18, 141–156.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menes, M., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5), 141–156.
<https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Vázquez-Ochoa, L. A., Correa-Sandoval, A., Vargas-Castilleja, R. D. C., Vázquez-Sauceda, M., & Rodríguez-Castro, J. H. (2021). Modelo hidrológico, calidad del agua y cambio climático: soporte para la gestión hídrica de la cuenca del río Soto la Marina. *CienciaUAT*, 16(1), 20–41. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v16i1.1498>
- Villalobos, A. (2020). *Calibración y uso del modelo Hydro-Bid para el análisis de disponibilidad futura de recursos hídricos en cuencas pluviales de la Región del Maule* [Tesis de Maestría]. Universidad de Talca.

EVALUACIÓN OFERTA – DEMANDA CUENCA RÍO ZULIA

11 Anexos

Anexo 1.

Variación porcentual de la oferta hídrica proyectada frente a la línea base.

Mes	Oferta Línea Base m3/s	Oferta SSP1 - 2.6		Oferta SSP2 - 4.5		Oferta SSP3 - 7.0		Variación SSP1 (%)		Variación SSP2 (%)		Variación SSP3 (%)	
	1989 - 2020	2021- 2040	2041 - 2060	2021- 2040	2041 - 2060	2021- 2040	2041 - 2060	2021- 2040	2041 - 2060	2021- 2040	2041 - 2060	2021- 2040	2041 - 2060
Enero	122.26	118.34	127.74	115.88	115.88	112.85	103.60	-3	4	-5	-5	-8	-15
Febrero	92.61	83.24	86.62	81.15	76.18	79.38	65.72	-10	-6	-12	-18	-14	-29
Marzo	86.06	76.32	84.11	77.38	69.82	73.62	62.58	-11	-2	-10	-19	-14	-27
Abril	113.42	117.02	137.88	118.82	117.35	114.53	112.44	3	22	5	3	1	-1
Mayo	131.73	159.11	177.97	159.24	160.45	156.65	151.94	21	35	21	22	19	15
Junio	103.31	143.17	154.48	141.14	143.95	140.77	135.20	39	50	37	39	36	31
Julio	76.37	101.29	107.55	98.82	101.10	98.27	94.02	33	41	29	32	29	23
Agosto	67.26	86.43	87.51	84.01	82.36	80.89	77.85	28	30	25	22	20	16
Septiembre	87.57	104.44	103.61	102.37	96.52	100.15	96.49	19	18	17	10	14	10
Octubre	141.30	153.19	163.03	150.18	155.08	155.74	148.46	8	15	6	10	10	5
Noviembre	189.43	205.55	214.79	199.40	205.50	204.85	199.20	9	13	5	8	8	5
Diciembre	178.43	187.46	192.66	182.35	176.06	180.51	166.04	5	8	2	-1	1	-7
OFERTA	115.90	128.14	136.69	126.07	125.22	125.03	117.99	11	18	9	8	8	2
Q50	98.59	120.49	130.3	119.50	119.33	117.65	110.31	22	32	21	21	19	12
IRH	0.77												

Caudal Ambiental Q75 65.59

Nota. Elaboración propia.

Anexo 2. Trazabilidad de la Información, Software y Fuentes de Datos.

Con el propósito de garantizar el rigor ético, la transparencia metodológica y la trazabilidad de la presente investigación, se declaran oficialmente las fuentes de adquisición de datos y la arquitectura de software empleada para el desarrollo de la modelación hidrológica y de asignación:

Origen y Tratamiento de la Información Base.

Información Hidrometeorológica y Climática (IDEAM):

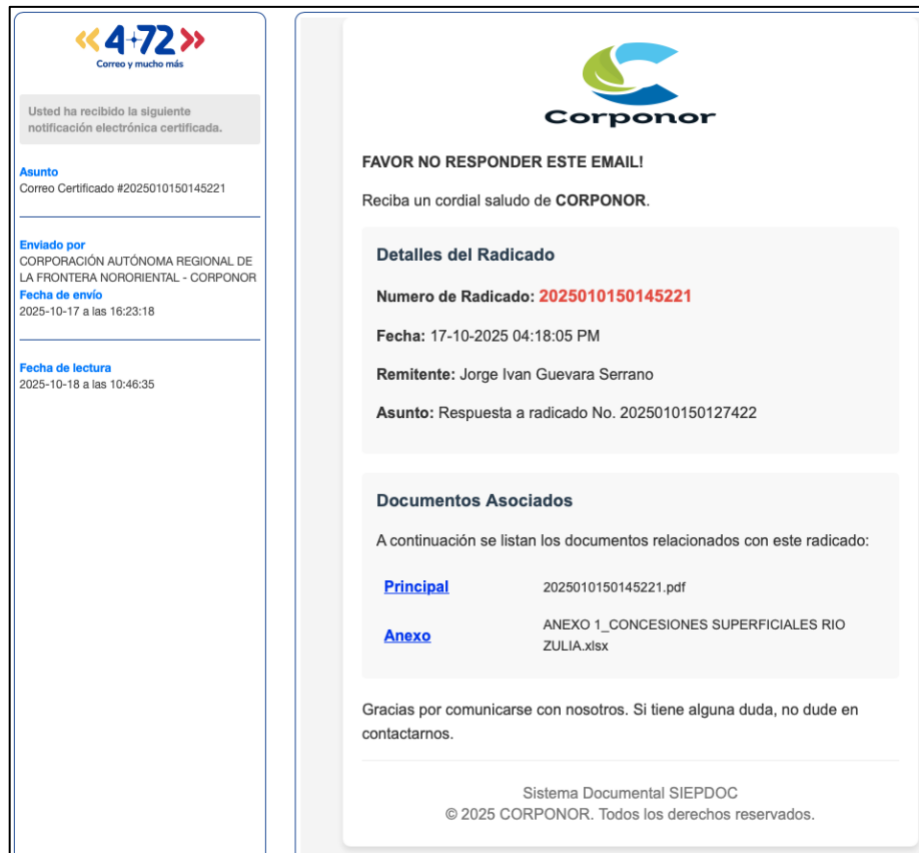
La totalidad de las series de tiempo observadas (precipitación y temperatura) correspondientes a la red de monitoreo oficial, así como las proyecciones climáticas regionalizadas (Escenarios SSP de la Cuarta Comunicación Nacional), fueron extraídas del dominio público a través de los portales web oficiales dispuestos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

Demanda Hídrica y Concesiones (CORPONOR):

Se aclara que la base de datos de las concesiones proviene del registro oficial de concesiones de aguas superficiales otorgadas por la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). Esta base de datos fue solicitada formalmente por el investigador a través de los canales institucionales (plataforma PQRS web de la entidad) y remitida oficialmente al correo institucional universitario, mediante correo certificado #2025010150145221 con fecha del 17-10-2025 a las 4:18:05 PM, junto con las resoluciones pertinentes. Constituyéndose como un supuesto de demanda bajo el escenario de asignación legal máxima.

Figura 19.

Constancia entrega información oficial de CORPONOR.



Nota: Tomado del correo institucional del investigador.

Arquitectura de Software y Herramientas de Simulación

El procesamiento de la información, la configuración topológica y la ejecución de los algoritmos matemáticos se soportaron en las siguientes herramientas especializadas, cuyas versiones se documentan para garantizar la reproducibilidad del modelo:

HydroBID WAM (versión 3.0): Sistema integrado de modelación de recursos hídricos promovido por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), soportado operativamente sobre una base de datos relacional local en formato **SQLite**.

HydroBID ALLOC/WaterALLOC (versiones 2.4.1.5 y 3.0.0.1): Herramienta de optimización de redes de flujo y asignación de recursos hídricos, desarrollada en colaboración con RTI International.

QGIS (versión 2.18 "Las Palmas"): Entorno de Sistemas de Información Geográfica empleado específicamente por su compatibilidad nativa con el complemento paramétrico **AHDTTool / LAC-AHD** (Analytical Hydrography Dataset), fundamental para el geoprocesamiento inicial y la configuración de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

QGIS (versión 3.44 "Solothurn"): Entorno SIG de reciente lanzamiento empleado para las fases de análisis espacial avanzado, validación cartográfica, procesamiento de simbología y generación de las salidas gráficas definitivas (mapas temáticos).

Es importante destacar que, con el fin de garantizar la absoluta transparencia metodológica y permitir la reproducibilidad de la simulación hidrológica, los multiplicadores y parámetros físicos definitivos (tales como el Número de Curva, Capacidad de Agua Disponible, Coeficiente de Rugosidad, entre otros) resultantes del proceso de calibración espacial en HydroBID, se encuentran explícitamente declarados y documentados en el **Capítulo 6 (Resultados), apartado 6.2.2, correspondientes a la Tabla 3** del presente documento.