

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

VALERIA ARANGO FIGUEROA

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C
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

VALERIA ARANGO FIGUEROA

TRABAJO DE GRADO

DIRECTORES

DARWIN MENA RENTERÍA
Ingeniero Ambiental y Sanitario
MSc en Recursos Hídricos

ANTONIO PREZIOSI RIBERO
Ingeniero Civil
MSc en Planeación y Evaluación Ambiental
Doctor en Ingeniería

CAMILO ANDRÉS ROJAS CRUZ
Ingeniero Civil
MSc en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C

2024

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVOS	11
1. ANTECEDENTES	12
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	12
1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA	14
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO	16
2.2. CAMBIO CLIMÁTICO	17
2.2.1. Modelo de circulación global (GCM)	20
2.3. MODELACIÓN HIDROLÓGICA	21
2.3.1. Metodología de las proporciones para llenado de datos	22
2.3.2. Análisis de consistencia	22
2.3.3. HydroBID	23
2.3.4. WaterALLOC	29
3. METODOLOGÍA	30
3.1. ESTIMACIÓN DE LA OFERTA	31
3.1.1. Definición y procesamiento de la cuenca	31
3.1.2. Obtención y tratamiento de los datos de entrada	32
3.1.3. Calibración y validación del modelo de HydroBID	33
3.1.4. Topología del sistema de modelación	35
3.1.5. Oferta hídrica	36
3.1.6. Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático	37
3.2. OBTENCIÓN DE LA DEMANDA	38
3.2.1. Obtención de la demanda actual y futura	38
3.2.2. Creación de escenarios para incorporación de demandas	39
3.2.3. Estimación de la demanda insatisfecha por escenario de cambio climático	42
3.3. PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE EMBALSE PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA INSATISFECHA	42
4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	44

4.1.	ESTIMACIÓN DE LA OFERTA	44
4.1.1.	Tratamiento de los datos de entrada	44
4.1.2.	Calibración y validación del modelo de HydroBID	48
4.1.3.	Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático	50
4.2.	OBTENCIÓN DE LA DEMANDA.....	54
4.2.1.	Obtención de la demanda insatisfecha por escenario.....	55
4.3.	PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE EMBALSE PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA INSATISFECHA	61
5.	IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO DEL PROYECTO.....	64
6.	CONCLUSIONES.....	65
7.	RECOMENDACIONES.....	66
8.	REFERENCIAS	67
	ANEXOS.....	71
	ANEXO A.....	71
	ANEXO B.....	75
	ANEXO C.....	80
	ANEXO D	82
	ANEXO E	84
	ANEXO F	86

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Área de municipios en la cuenca del Río Coello	13
Tabla 2 Área de subcuencas en la cuenca del Río Coello	13
Tabla 3 Características físicas y morfométricas de la cuenca del Río Coello	14
Tabla 4 Escenarios de cambio climático SSP	19
Tabla 5 Proyecciones de oferta hídrica.....	20
Tabla 6 Parámetros de calibración de HydroBID	28
Tabla 7 Métricas de desempeño para la calibración de HydroBID	29
Tabla 8 Estaciones limnimétricas y climatológicas en la cuenca del Río Coello....	32
Tabla 9 Demandas por COMID.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 10 Precipitación Promedio Acumulada.....	44
Tabla 11 Parámetros de calibración inicial.....	49
Tabla 12 Parámetros Estadísticos resultantes de la modelación inicial.....	49
Tabla 13 Parámetros de calibración inicial.....	50
Tabla 14 Parámetros Estadísticos resultantes de la modelación inicial.....	50
Tabla 15 Relación oferta/demanda sin embalse vs con embalse en COMID 301550100.....	62

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Precipitación promedio acumulada VS promedio acumulado de cada estación	45
Gráfica 2 Estación patrón	45
Gráfica 3 análisis de cada estación con respecto a la Estación Patrón.....	46
Gráfica 4 aplicación de factor de corrección	47
Gráfica 5 Hidrograma flujo enrutado a COMID 301550100.....	51
Gráfica 6 déficit de escenario actual vs SSP1.....	57
Gráfica 7 déficit de escenario actual vs SSP2.....	59
Gráfica 8 déficit de escenario actual vs SSP2.....	60
Gráfica 9 Relación oferta/demanda agrícola sin embalse vs con embalse en COMID 301550100	62

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Ubicación Geográfica de la Cuenca del Río Coello	12
Ilustración 2 Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos	34
Ilustración 3 Esquema metodológico	31
Ilustración 4 Delimitación cuenca Río Coello	32
Ilustración 5 Red de flujo superficial de MODSIM para la cuenca de estudio.....	36
Ilustración 6 Importación de caudales a la red de MODSIM.....	37
Ilustración 7 Esquema de demanda en WaterALLOC	39
Ilustración 8 Creación de escenario para demandas	40
Ilustración 9 Configuración de escenario para demandas.....	41
Ilustración 10 Visualización nodos de demanda	41
Ilustración 11 Creación de escenario de infraestructura	42
Ilustración 12 Creación nodo de embalse	43
Ilustración 13 Configuración de propiedades del embalse	43
Ilustración 14 Base de Datos Climática Interpolada.....	48
Ilustración 15 Estaciones en la cuenca del río Coello	49
Ilustración 16 Flujo enrutado de escenario actual vs SSP1.....	52
Ilustración 17 Flujo enrutado de escenario actual vs SSP2.....	53
Ilustración 18 Flujo enrutado de escenario actual vs SSP3.....	54
Ilustración 19 Exploración de las demandas importadas	55
Ilustración 20 Serie temporal de demandas en COMID 301550100.....	56
Ilustración 21 déficit de escenario actual vs SSP1.....	57
Ilustración 22 déficit de escenario actual vs SSP2.....	58
Ilustración 23 déficit de escenario actual vs SSP3.....	60
Ilustración 24 Creación nodo de embalse	61

RESUMEN

Esta investigación presenta una modelación hidrológica de la cuenca del río Coello, Tolima, para analizar la relación oferta-demanda de agua y la demanda no satisfecha utilizando la herramienta computacional WaterALLOC. Se simuló caudales para el clima actual y futuros bajo los escenarios climáticos SSP1 2.6, SSP2 4.5 y SSP3 7.0. Los resultados indican que bajo el escenario SSP1 2.6, el déficit se incrementa significativamente en un 126.4% en comparación con el escenario actual. En el escenario SSP2, el déficit se incrementa drásticamente en un 170.6%. Bajo el escenario SSP3, el déficit de agua aumenta en un 8.88%.

Para mitigar la demanda no satisfecha, se simuló la construcción de un embalse con capacidad de 40 millones de m³. La implementación del embalse mostró una reducción en el déficit medio (99.79%). Estos resultados demuestran la efectividad del embalse para mejorar la gestión del recurso hídrico y reducir significativamente los problemas de déficit de agua en la cuenca del río Coello. La utilización de las herramientas WaterALLOC e HydroBID permitió evaluar integralmente la disponibilidad y demanda de agua en la cuenca del río Coello. Y la construcción del embalse se presenta como una solución viable y eficaz para enfrentar los desafíos del cambio climático, asegurando una adecuada disponibilidad de agua en la región y mejorando la gestión sostenible de los recursos hídricos.

Palabras clave: HydroBID, WaterALLOC, MODSIM, modelación hidrológica, cambio climático.

ABSTRACT

This research presents a hydrological modeling of the Coello river basin, Tolima, to analyze the water supply-demand relationship and unmet demand using the WaterALLOC computational tool. Flows were simulated for the current and future climate under the climate scenarios SSP1 2.6, SSP2 4.5 and SSP3 7.0. The results indicate that under the SSP1 2.6 scenario, the deficit increases significantly by 126.4% compared to the current scenario. Under the SSP2 scenario, the deficit increases dramatically by 170.6%. Under the SSP3 scenario, the water deficit increases by 8.88%.

To mitigate the unmet demand, the construction of a reservoir with a capacity of 40 million m³ was simulated. The implementation of the reservoir showed a reduction in the average deficit (99.79%). These results demonstrate the effectiveness of the reservoir in improving water resource management and significantly reducing water deficit problems in the Coello river basin. The use of the WaterALLOC and HydroBID tools allowed a comprehensive assessment of water availability and demand in the Coello river basin. And the construction of the reservoir is presented as a viable and effective solution to face the challenges of climate change, ensuring adequate water availability in the region and improving the sustainable management of water resources.

Key words: HydroBID, WaterALLOC, MODSIM, hydrological modeling, climate change.

INTRODUCCIÓN

En el contexto global actual, marcado por una creciente demanda de agua y la necesidad urgente de gestionar los recursos hídricos de manera más eficiente, la cuenca del río Coello emerge como un microcosmos representativo de los desafíos que enfrenta la humanidad. En este sentido, es crucial profundizar en el análisis de la relación entre la oferta y la demanda de agua en esta cuenca específica. En este escenario, la herramienta computacional WaterALLOC se posiciona como una aliada esencial en la toma de decisiones para la gestión de sistemas hídricos.

La gestión integral del recurso hídrico se alza como un objetivo fundamental en este proyecto. No solo busca abordar los problemas actuales, sino también garantizar un uso eficiente del agua y preservar este recurso vital para las generaciones venideras. El incremento demográfico y las presiones económicas agudizan aún más esta necesidad, exacerbando la demanda de agua en regiones donde su disponibilidad es limitada.

La literatura sustenta la importancia de abordar esta problemática de manera holística. Las extracciones excesivas de agua, si exceden ciertos límites, pueden convertirse en un obstáculo para el desarrollo económico y afectar adversamente a todos los sectores. Es por ello que proyectos de investigación orientados al manejo del agua, valiéndose de herramientas computacionales como WaterALLOC, cobran una relevancia cada vez mayor en este contexto.

La justificación de este enfoque se halla en la urgencia de hacer frente a los desafíos planteados por el cambio climático. La actividad humana, en su influencia sobre el recurso hídrico, constituye una de las principales causas de este fenómeno, lo que se traduce en una disminución de los suministros de agua y una creciente demanda de este recurso esencial. El aumento en el uso del agua, a raíz del crecimiento poblacional y el desarrollo económico, junto con la disminución de su disponibilidad, ha generado escasez de agua en numerosas regiones.

Ante esta realidad, se requiere una base científica sólida respaldada por herramientas computacionales para informar la toma de decisiones en la gestión del agua. Este enfoque no solo beneficiará a las autoridades encargadas del manejo y administración del recurso hídrico, sino también a los usuarios finales, asegurando una gestión integrada del agua y minimizando los déficits de suministros frente a las crecientes demandas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación oferta – demanda de agua en la cuenca del río Coello, mediante la aplicación de la herramienta computacional WaterALLOC, como soporte en la toma de decisiones con respecto a la gestión de sistemas de recursos hídricos.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

Evaluar la disponibilidad de agua actual y futura de la cuenca del río Coello, mediante modelación hidrológica.

Estimar la demanda actual y futura de agua en la cuenca del río Coello para los diferentes sectores económicos.

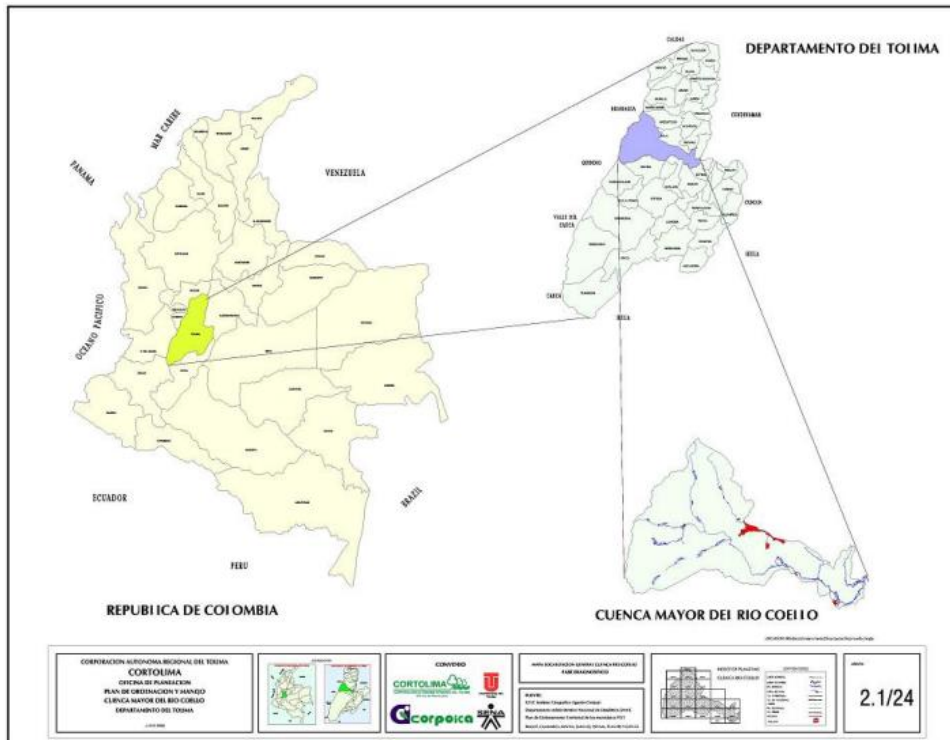
Estimar la demanda de agua no satisfecha en la cuenca del río Coello.

1. ANTECEDENTES

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El Río Coello nace en el cono del Nevado del Tolima en la Cordillera Central con el nombre del Río Toche y al llegar al corregimiento del mismo nombre, recibe las aguas del Río Tohecito, que sirve de límite entre los Municipios de Ibagué y Cajamarca. El Río Toche desciende desde los 3.600 m.s.n.m hasta 2.150 m.s.n.m recorriendo 9.8Km aproximadamente con una pendiente media de 18%, donde empieza a ser denominado Río Coello y continúa su recorrido descendiendo hasta los 1.400 m.s.n.m con una longitud aproximada de 17.9 Km y una pendiente media del cauce de 5.4%, en límite con Ibagué recibe las aguas del Río Bermellón y sigue su recorrido hasta llegar al Río Magdalena (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2019).

Ilustración 1 Ubicación Geográfica de la Cuenca del Río Coello



Fuente: (CORTOLIMA, 2019)

Respecto a la división político administrativa, el 97.5% del área total de la cuenca se encuentra en el departamento del Tolima, en los municipios de Anzoátegui, Cajamarca, Coello, Espinal, Flandes, Ibagué, Piedras, Rovira y San Luis. El 2.2%

del área total de la cuenca de encuentra en Salento, Quindío y el 0.3% en Girardot, Cundinamarca. El área de cada municipio dentro en la cuenca se encuentra en la tabla 1. La cuenca se encuentra conformada por 15 subcuencas principales como se evidencia en la tabla 2.

Tabla 1 Área de municipios en la cuenca del Río Coello

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	Área del municipio en la cuenca (Ha)	Porcentaje del municipio en la cuenca
Tolima	Anzoátegui	8007.769034	4.575737284
Tolima	Cajamarca	40725.90254	23.27127941
Tolima	Coello	9693.326688	5.538885568
Tolima	Espinal	410.5301834	0.234581974
Tolima	Flandes	920.5468271	0.526011729
Cundinamarca	Girardot	557.1783798	0.318378549
Tolima	Ibague	92576.02973	52.89907701
Tolima	Piedras	8.0207424	0.00458315
Tolima	Rovira	17514.78831	10.00816452
Quindío	Salento	3862.111299	2.206857689
Tolima	San Luis	813.3118118	0.464736329

Fuente: elaboración propia

Tabla 2 Área de subcuencas en la cuenca del Río Coello

DEPARTAMENTO	Área del municipio en la cuenca (Ha)	Porcentaje del municipio en la cuenca
301527100	10207.9	5.832919059
301527200	8694.5	4.968143767
301495200	5796.1	3.311962515
301483600	4943.5	2.824776435
301488200	4645.2	2.654324162
301496500	7351.6	4.200794263
301505900	16643.4	9.510242564
301523100	22163	12.66420959
301478900	9886.6	5.649324305
301514500	29422.9	16.81260535
301451600	8650	4.942715922
301550100	8546.5	4.883574755
301513100	13617.8	7.781377675
301451700	13932.2	7.961029685
301482100	10504	6.002114225

Fuente: elaboración propia

La base económica de la cuenca se sustenta en la agricultura y ganadería, destacándose la producción de hortalizas, arracacha, soya, caña de azúcar, arroz, sorgo, frijol, plátano, café y frutas como los principales productos agrícolas. Además, existen actividades comerciales e industriales y se lleva a cabo la explotación de algunos minerales (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2019).

En el ámbito productivo, la principal limitación se debe al deficiente manejo tecnológico de los cultivos, ocasionado por el inadecuado uso del suelo mediante quemadas, la carencia de programas de capacitación y transferencia de tecnología, la insuficiente asistencia técnica y la escasa utilización de semillas de calidad. Como resultado, se presentan problemas relacionados con la erosión del suelo, la contaminación ambiental debido al excesivo uso de agroquímicos, la alta incidencia de plagas y enfermedades, los costos de producción elevados, los bajos rendimientos y los ingresos reducidos para el productor, además del agotamiento del recurso hídrico (Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2020).

1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CUENCA

Para determinar el comportamiento general de la cuenca del río Coello, se realizan los cálculos de los parámetros físicos y morfométricos. Esto permite identificar las principales características de la cuenca y comprender cómo influyen en su comportamiento y respuesta ante eventos extremos. Los resultados de estos cálculos se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 Características físicas y morfométricas de la cuenca del Río Coello

Características físicas y morfométricas	
Área (Ha)	175005
Perímetro (km)	311.744
Longitud de cauce (km)	109.74
Pendiente del cauce principal (%)	1.28
Factor de forma	0.12
Índice de compacidad	2.03
Densidad de drenaje	3.71
Índice de sinuosidad	1.29

Fuente: elaboración propia y (Aguilar, 2020)

Con un valor de 0.12, el factor de forma de Horton indica que la cuenca del río Coello es alargada y menos propensa a lluvias torrenciales y crecidas súbitas, ya que el agua tarda más en concentrarse y llegar al cauce principal. El índice de compacidad de 2.03 sugiere que la cuenca tiene una forma irregular y menos

compacta en comparación con un círculo perfecto, lo que implica que la distancia entre los puntos de la cuenca es mayor, influyendo en el tiempo de concentración del agua. La densidad de drenaje de 3.71 km/km^2 , un valor relativamente alto, indica una gran cantidad de arroyos y riachuelos por unidad de área, facilitando una rápida evacuación del agua de lluvia hacia el cauce principal y aumentando la respuesta de la cuenca a las precipitaciones. El índice de sinuosidad de 1.29 sugiere que el río Coello sigue un curso moderadamente sinuoso, lo que puede influir en la velocidad del flujo y la capacidad de almacenamiento temporal de agua debido a la presencia de meandros.

De acuerdo con los parámetros mencionados, la cuenca presenta una forma alargada, lo cual sugiere que tendrá tiempos de respuesta más cortos frente a lluvias con picos de crecientes relativamente moderados. Además, la alta densidad de drenaje indica que el flujo tiende a concentrarse más en el cauce principal que en las laderas, resultando en un tiempo reducido para alcanzar el pico de crecienta (Rubios, 2011).

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO

La oferta de agua disponible limita la cantidad de agua que puede ser utilizada, mientras que la demanda de agua de los usuarios define cuánta agua se necesita para satisfacer sus necesidades. Si la demanda de agua excede la oferta disponible, se produce un déficit de agua y puede haber conflictos entre los diferentes usuarios que compiten por el uso del recurso. Por otro lado, si la oferta de agua supera la demanda de los usuarios, se produce un excedente de agua que puede ser almacenado para uso futuro o destinado a otros usos.

Por lo tanto, es importante gestionar la oferta y la demanda de agua de manera equilibrada para asegurar la disponibilidad sostenible del recurso a largo plazo y evitar conflictos por su uso. Esto implica la implementación de medidas de conservación y gestión del agua, así como la promoción de prácticas sostenibles en los diferentes sectores que utilizan el agua, como la agricultura, la industria y la población urbana.

En una microcuenca tropical andina llamada Chaquilcay, se llevó a cabo una simulación hidrológica para comprender su comportamiento. Se desarrollaron hidrogramas para determinar los caudales y obtener información base, y se utilizaron curvas de intensidad-duración-frecuencia (IDF) para construir hietogramas, ya que no se habían realizado estudios previos en la zona. Esta información se ingresó en la herramienta HEC-HMS (versión 4.1) y en el programa ArcMap 10.1 para identificar las características morfológicas de la cuenca. Los resultados incluyeron los caudales de desagüe para períodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Hallazgos esenciales para una gestión integral del recurso hídrico, ya que permiten una distribución adecuada de la oferta de agua entre los diferentes usuarios (Paola Duque-Sarango, 2019).

Otra investigación llevada a cabo en San Joaquín, California, se enfoca en la evaluación de las prácticas de gestión del agua, en particular el riego y la extracción de agua subterránea, para abordar los problemas de sequía en algunas áreas de la región. La sequía se ha agravado debido a la extracción excesiva de agua subterránea utilizada para actividades agrícolas y para el suministro de agua a la población (Thatch, 2020). La importancia de este estudio radica en que se analiza la gestión deficiente del recurso hídrico, y se propone un modelo de simulación que contribuya a la solución de la sequía en un plazo razonable que no perjudique la vida y la economía de los habitantes de la región.

Por último, en Colombia, en el año 2020 se llevó a cabo un estudio que se centró en la gobernanza y gobernabilidad en la gestión del agua, con el objetivo de analizar la presencia de elementos de gobernanza en el contexto colombiano y determinar si se ha logrado la transición efectiva de la gobernabilidad a la

gobernanza. Este estudio es relevante ya que aborda aspectos clave como la transparencia, la rendición de cuentas y la capacidad de respuesta en la definición e implementación de políticas públicas para la gestión del agua en un marco multinivel que implica mecanismos e instituciones democráticas que promueven los intereses sociales, políticos, económicos y administrativos para la gestión de los recursos hídricos y la provisión de servicios de agua en distintos niveles de la sociedad (Rodríguez, 2020).

2.2. CAMBIO CLIMÁTICO

En Colombia, la Gestión de Cambio Climático es una prioridad liderada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), a través de la Dirección de Cambio Climático y Gestión del Riesgo. Para regular esta gestión, el gobierno colombiano dispone de un marco normativo que incluye el Sistema Nacional de Cambio Climático (SISCLIMA), la Política Nacional de 2016, la Ley 1931 de 2018, la Ley 1844 de 2017 de Aprobación del Acuerdo de París y el Plan Nacional de Adaptación, entre otros. Estas normativas tienen como objetivo orientar las políticas e iniciativas del país en cuanto al cambio climático (INGENIAR Risk Intelligence Ltda, 2021).

El análisis climático de una cuenca ofrece una visión preliminar de sus características generales, ya que las condiciones climáticas son factores que influyen en aspectos biofísicos, socioeconómicos y culturales (Cortolima, 2019). La comprensión de cómo se distribuyen las lluvias en el espacio es esencial para entender los patrones de precipitación y poder clasificar áreas de acuerdo a la similitud entre las estaciones pluviométricas vecinas. Esta clasificación puede ser considerada como una primera aproximación para dividir el territorio en áreas con características agroecológicas similares (Cortolima, 2019)

Un estudio realizado por estudiantes de la Universidad Pontificia Javeriana en 2008, examina la oferta y la demanda de agua en Colombia, así como la relación entre ambas, que se utiliza como indicador de la presión sobre el recurso hídrico. El estudio busca caracterizar los años normales y la gravedad de los períodos de sequía. Los resultados del estudio destacan la concentración poblacional y de los sectores productivos en áreas de baja oferta de agua, lo que lleva a conflictos por el uso del territorio. Además, se señala que la falta de infraestructura adecuada para gestionar un recurso escaso y altamente presionado es un factor clave para evitar una crisis latente en la gestión de los recursos hídricos. Este estudio es importante porque proporciona información valiosa para la planificación y gestión del recurso hídrico en Colombia y en otros lugares con condiciones similares (Efraín Antonio Domínguez Calle, 2008)

En efecto, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), ofrece una visión integral del nivel de utilización de los recursos hídricos de una nación con el propósito de abastecer a la población y respaldar sus actividades productivas, definiendo indicadores como “Nivel de estrés hídrico: extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles”, el cual corresponde a la proporción entre la cantidad total de agua dulce extraída por los sectores económicos clave y el total de recursos hídricos renovables, considerando las exigencias ambientales de agua.

El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) destaca que las últimas tres décadas han sido sucesivamente más cálidas en la superficie de la Tierra que cualquier década anterior desde 1850. Este aumento de temperatura es una clara indicación del cambio climático provocado por actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y otras prácticas que incrementan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. El informe subraya la urgencia de tomar medidas para mitigar estos efectos y adaptarse a los cambios ya en curso (IPCC, 2022).

La metodología para desarrollar modelos climáticos basados en los Shared Socioeconomic Pathways (SSP) sigue un enfoque en paralelo que combina datos socioeconómicos y climáticos. Los SSP describen cinco trayectorias posibles que el mundo podría seguir en función de desarrollos socioeconómicos futuros, desde un enfoque sostenible hasta uno con altas emisiones. Estos escenarios se utilizan junto con los Modelos de Circulación General (GCM) para proyectar cambios climáticos y sus impactos (IPCC, 2022).

El forzamiento radiativo es una medida del cambio en el balance energético de la Tierra debido a factores como las emisiones de gases de efecto invernadero y otros agentes climáticos. En el contexto de los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways), los valores de forzamiento radiativo proyectan diferentes niveles de calentamiento global en función de las trayectorias socioeconómicas y las políticas climáticas adoptadas (Keywan Riahi, 2015).

SSP1-1.9: Este es un escenario muy ambicioso de desarrollo sostenible que busca limitar el forzamiento radiativo a aproximadamente 1.9 W/m^2 para 2100. Está alineado con el objetivo de mantener el calentamiento global por debajo de 1.5°C (IPCC, 2022).

SSP1-2.6: También asociado con un desarrollo sostenible, este escenario busca limitar el forzamiento radiativo a aproximadamente 2.6 W/m^2 para 2100, compatible con el objetivo de limitar el calentamiento global a alrededor de 2°C (IPCC, 2022).

SSP2-4.5: Este es un escenario de "business as usual" o camino intermedio. El forzamiento radiativo en este caso se proyecta que alcanzará aproximadamente 4.5 W/m² para 2100, resultando en un aumento de la temperatura global de alrededor de 2.6 a 3.1°C para finales de siglo (IPCC, 2022).

SSP3-7.0: En este escenario de rivalidad regional y alto uso de combustibles fósiles, el forzamiento radiativo se proyecta en aproximadamente 7.0 W/m² para 2100. Esto implicaría un calentamiento global de alrededor de 3.2 a 4.5°C (IPCC, 2022).

SSP4-3.4: Este escenario, que enfatiza la desigualdad, tiene un forzamiento radiativo proyectado de aproximadamente 3.4 W/m² para 2100. Implica un aumento de la temperatura global de alrededor de 2.0 a 2.7°C (IPCC, 2022).

SSP4-6.0: En un camino de alta desigualdad con un uso intensivo de combustibles fósiles, el forzamiento radiativo es de aproximadamente 6.0 W/m² para 2100, resultando en un aumento de la temperatura de alrededor de 2.6 a 3.9°C (IPCC, 2022).

SSP5-8.5: Este escenario supone un fuerte crecimiento económico impulsado por combustibles fósiles y tiene el forzamiento radiativo más alto, proyectado en aproximadamente 8.5 W/m² para 2100. Esto resultaría en un calentamiento global de alrededor de 4.0 a 5.0°C o más (IPCC, 2022).

Tabla 4 Escenarios de cambio climático SSP

ESCENARIO	CARACTERISTICAS	IMPACTO CLIMATICO
SSP1 - Camino hacia la Sostenibilidad (SSP1-2.6)	Este escenario asume un desarrollo sostenible con bajas emisiones de carbono, cooperación internacional, y fuerte inversión en educación y salud.	Emisiones bajas y estabilización del clima con políticas eficaces contra el cambio climático.
SSP2 - Camino Intermedio (SSP2-4.5)	Representa una continuación de las tendencias actuales con ciertos avances en sostenibilidad, pero con un progreso desigual y desafíos persistentes.	Emisiones moderadas y un clima que sigue calentándose, pero a un ritmo controlado.
SSP3 - Regional Rivalry (SSP3-7.0)	Escenario marcado por nacionalismo, bajos niveles de cooperación internacional y políticas fragmentadas. Las prioridades nacionales sobrepasan las globales	Altas emisiones debido a una dependencia continua de los combustibles fósiles y bajas inversiones en sostenibilidad

SSP4 - Inequality (SSP4-6.0)	Un mundo con alta desigualdad socioeconómica y política, donde solo algunas regiones avanzan tecnológicamente, mientras otras quedan rezagadas.	Emisiones variables con ciertas áreas progresando en mitigación, pero globalmente insuficiente para prevenir el cambio climático.
SSP5 - Camino hacia el Desarrollo Fósil (SSP5-8.5)	Un enfoque intensivo en el crecimiento económico basado en energías fósiles, con alta tecnología y bajo énfasis en sostenibilidad ambiental.	Muy altas emisiones con un calentamiento significativo, presentando grandes desafíos para la adaptación al cambio climático

Fuente: (IPCC, 2022)

Tabla 5 Proyecciones de oferta hídrica

MÉTRICA	SSP1 – 2.6		
	2020-2039	2040-2059	2080-2099
Temperatura media anual (°C)	0.69	1.02	1.11
Precipitación anual (mm)	46.86	51.56	42.66
MÉTRICA	SSP2 – 4.5		
	2020-2039	2040-2059	2080-2099
Temperatura media anual (°C)	0.72	1.25	2.10
Precipitación anual (mm)	25.28	39.35	36.79
MÉTRICA	SSP3 – 7.0		
	2020-2039	2040-2059	2080-2099
Temperatura media anual (°C)	0.72	1.48	3.34
Precipitación anual (mm)	4.40	-16.35	-55.34

Fuente: (IPCC, 2022)

2.2.1. Modelo de circulación global (GCM)

Los Modelos de Circulación General o Global (GCM, por sus siglas en inglés) son herramientas matemáticas utilizadas para simular el sistema climático de la Tierra. Estos modelos son esenciales para entender y predecir el clima y sus cambios futuros debido a la influencia de las actividades humanas (IPCC, 2007).

Características de los GCM:

Simulación del Sistema Climático:

- **Atmósfera:** Simulan los procesos atmosféricos, como la circulación del aire, las precipitaciones y las variaciones de temperatura.
- **Océanos:** Incluyen la dinámica oceánica, como corrientes y temperaturas superficiales y profundas.
- **Criósfera:** Representan las capas de hielo y nieve.
- **Biosfera y Geósfera:** Consideran la interacción con los ecosistemas y la superficie terrestre.

Resolución Espacial y Temporal:

- **Espacial:** Dividen la Tierra en una red tridimensional de celdas, donde se calculan las variables climáticas.
- **Temporal:** Realizan simulaciones en pasos de tiempo que pueden variar desde minutos hasta años, permitiendo el análisis de cambios a corto y largo plazo.

Funcionamiento de los GCM

Ecuaciones Matemáticas:

- Utilizan ecuaciones basadas en las leyes de la física, como la conservación de la energía, la masa y el momento, para describir los movimientos y procesos en la atmósfera y los océanos.

Forzamientos Climáticos:

- Incluyen forzamientos naturales (volcanes, actividad solar) y antropogénicos (emisiones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo) para simular cómo estos factores influyen en el clima.

Calibración y Validación:

- Los modelos se calibran utilizando datos observacionales históricos y se validan mediante la comparación con datos reales para asegurar su precisión y fiabilidad.

Proyecciones Climáticas:

- Los GCM se usan para hacer proyecciones sobre futuros cambios climáticos bajo diferentes escenarios de emisiones y condiciones socioeconómicas, como los Shared Socioeconomic Pathways (SSP).

2.3. ANALISIS EXPLORATORIO DE SERIES DE DATOS

2.3.1. Metodología de las proporciones para llenado de datos

La metodología de las proporciones para el llenado de datos es una técnica utilizada para completar conjuntos de datos incompletos o con datos faltantes. Este método se basa en la utilización de relaciones proporcionales entre las variables conocidas y las variables faltantes para estimar los valores ausentes.

Se selecciona una estación meteorológica cercana donde se tienen registros completos y fiables de precipitación. Para la estación seleccionada, se calcula el coeficiente de proporcionalidad. Este coeficiente se obtiene dividiendo la precipitación registrada en la estación de referencia por la precipitación registrada en la estación donde se desea llenar datos faltantes (Maidment, 1993).

2.3.2. Análisis de consistencia

El análisis de consistencia es un proceso utilizado para verificar la coherencia y la fiabilidad de un conjunto de datos antes de utilizarlos en estudios o modelos analíticos. Este análisis es crucial para garantizar que los datos sean correctos, completos y lógicos, evitando así errores que puedan afectar los resultados y las conclusiones derivadas del análisis posterior.

El método consiste en el cálculo de la precipitación acumulada de las estaciones seleccionadas para el estudio y llevarlas al gráfico “Estación Patrón” vs “Estación X” para evaluar la consistencia de la información de precipitación y ajustar cualquier quiebre o error sistemático mediante un factor de ajuste (UNESCO, 1982).

2.4. OFERTA HIDRICA

Se entiende por oferta hídrica el caudal de agua disponible en un lugar para un momento determinado. La oferta hídrica puede ser superficial cuando proviene de ríos, quebradas, lagos o embalses, o subterránea cuando proviene de aljibes o pozos profundos. Desde una perspectiva hidrológica, la oferta hídrica se obtiene de la aplicación de la ecuación del balance hídrico a un área particular (Cuenca, microcuenca) (IDEAM, 2008).

2.5. MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Un modelo hidrológico es una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica (IDEAM, 2013).

En un modelo hidrológico, el sistema físico real que generalmente se representa es la 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático ayuda a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs) a partir del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo (IDEAM, 2013).

2.5.1. HydroBID

HydroBID es una plataforma de modelado hidrológico creada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) con el propósito de ayudar a los países de América Latina y el Caribe en su adaptación al cambio climático. Este sistema integrado y cuantitativo permite la simulación hidrológica, evaluando tanto la cantidad como la calidad del agua, y apoyando la gestión de recursos hídricos bajo diferentes escenarios climáticos. Además, HydroBID facilita la identificación de necesidades de infraestructura y el diseño de estrategias y proyectos de adaptación mediante sus módulos de análisis hidrológicos y climáticos. Los usuarios pueden definir el área de estudio y el período de simulación, así como utilizar una interfaz especial para incorporar datos climatológicos y una Base de Datos de Hidrología Analítica específica para la región. La herramienta ha demostrado su eficacia en países como Ecuador, Perú y Argentina a través de proyectos piloto e investigaciones (BID).

Además de su uso en la evaluación de impactos del cambio climático, HydroBID es útil en investigaciones sobre la simulación de aguas subterráneas, análisis del transporte de sedimentos, y estudio del comportamiento de la demanda de agua. La plataforma puede integrarse con otros programas como WaterALLOC para proporcionar un análisis más integral, y permite la simulación de escenarios de políticas de gestión hídrica mediante la construcción de embalses e hidroeléctricas. Su capacidad para operar a escalas regionales y locales, junto con su diseño específico para América Latina y el Caribe, la convierte en una herramienta ideal para la planificación y gestión sostenible del agua en estos países (BID, 2022).

2.5.1.1. Base de datos de hidrología analítica y datos de entrada

RTI ha desarrollado una base de datos hidrológica analítica, denominada AHD, por sus siglas en inglés Analytical Hydrological Database, para América Latina y el Caribe. Completamente derivada de un mapa digital de elevación (DEM) usando el SRTM (NASA), modificado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Datos procesados para crear cuencas de drenaje y segmentos de cauce lineales con conectividad.

2.5.1.2. Modelo de factor de carga generalizado

El modelo utilizado en HydroBID es un modelo de lluvia-escorrentía de tipo distribuido, conocido como el Factor de Carga de Cauces Generalizados (GWLF, por sus siglas en inglés). Este modelo se aplica principalmente en cuencas pequeñas y considera datos de uso y tipo de suelo para generar los volúmenes de escorrentía en cada subcuenca. Además, tiene en cuenta el aporte de los flujos de agua subterránea poco profunda o flujo base.

El modelo calcula cómo el agua se mueve a través de una cuenca: parte del agua de lluvia se convierte en escorrentía y otra parte se filtra en el suelo. Esta agua filtrada recarga gradualmente el agua almacenada bajo tierra, conocida como capa saturada. El agua de esta capa saturada se libera lentamente hacia arroyos y ríos como flujo base. Este flujo base se suma a la escorrentía superficial y otros flujos de agua que llegan desde áreas más altas de la cuenca para formar el volumen total de agua que fluye en los ríos cada día (BID).

Cálculos del Modelo de GWLF

A continuación, se describen las ecuaciones usadas para calcular cada componente del modelo: deshielo, evapotranspiración potencial, escorrentía, percolación, flujo y tránsito/propagación provisto por Douglas A. Haith.

Deshielo: el primer paso en el proceso de derretimiento de la nieve acumulada es determinar si la precipitación cae como lluvia o como nieve/congelación. Esto se decide al comparar la temperatura promedio diaria, T_t , con un umbral comúnmente fijado en 0°C. El balance de la cobertura de nieve del área en estudio es dado como:

$$SNO_t = SNO_{t-1} + R_t - SNO_{mIt}$$

Donde:

SNO_t es el contenido de agua de la capa de nieve en un día dado

R_t es la cantidad de precipitación en un día

SNO_{mlt} es la cantidad de deshielo estimada como

$$SNO_{mlt} = 0.45T_t$$

El agua de deshielo se trata como si fuera lluvia, lo que significa que se considera tanto para la infiltración en el suelo como para la percolación hacia las capas más profundas (Haith, 2000). Para la cuenca del río Coello se asume que la cobertura de nieve es uniforme.

Evapotranspiración potencial: el modelo GWLF emplea el método para estimar el potencial de evapotranspiración (PET) desarrollado por Hamon (1962). Este método utiliza la temperatura promedio diaria y la duración diaria de la luz solar para calcular el PET.

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_t}{T_t + 273}$$

Donde:

H_t es el número de horas de luz solar por día durante el mes que contenga el día t.

e_t es la presión de vapor de agua en saturación en milibars en el día t, puede ser aproximada, desarrollado por Bosen (1960)

$$e_t = 33.8639[(0.00738T_t + 0.8072)^2 - 0.000019(1.8T_t + 48) + 0.001316] \text{ para } T_t > 0$$

T_t es la temperatura en el día t (° C). Cuando $T_t \leq 0$, $PET_t = 0$

El número de horas de luz solar se calcula por medio de la fórmula desarrollada por Forsythe (1995)

$$H_t = \frac{2\cos^{-1}[-\tan\delta \tan\theta]}{\omega}$$

Donde:

δ es la declinación solar en radianes

θ es la latitud geográfica en radianes

ω es la rotación angular de la tierra.

La PET se ajusta entonces en base al uso de tierras/suelos y condiciones de la cobertura utilizando un factor de cobertura

$$PET_{Adj(t)} = CV * PET_t$$

Donde $PET_{Adj(t)}$ es la PET de cobertura ajustada y CV es el factor de cobertura.

Los valores del coeficiente de cultivo (CV) varían según el tipo de vegetación y los cultivos presentes. La evapotranspiración real se determina a partir de la evapotranspiración potencial ajustada para la cobertura vegetal, pero esta está condicionada por la cantidad de agua disponible en la humedad del suelo (BID).

Escorrentía: la escorrentía superficial, proveniente tanto de la lluvia como del deshielo, se estima utilizando la ecuación del número de curva desarrollada por el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (U.S. Soil Conservation Service).

$$RO_t = \left(\frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$$

Donde:

RO_t es la escorrentía en cm

R_t es la suma de la lluvia y el deshielo

D_t es el parámetro de detención

$$D_t = \frac{2540}{CN_t} - 25.4$$

CN_t es el número de curva asignado por uso de suelos y ajustado cada día

Para determinar el número de curva para un día específico, se calcula la humedad antecedente del suelo sumando la cantidad de lluvia y deshielo de los últimos cinco días.

$$Amc5_t = \sum_{x=1}^5 R_{(t-x)}$$

Donde:

$Amc5_t$ es la precipitación antecedente de los últimos 5 días.

Percolación: La ecuación para la capa no saturada es:

$$U_{t+1} = U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - P_t$$

El balance de agua para el área saturada se calcula de la siguiente manera:

$$S_{t+1} = S_t + P_t - G_t - D_t$$

En la ecuación anterior, U_t y S_t son las humedades del suelo de las zonas no saturada y la zona de poca profundidad en el comienzo del día t, y Q_t, E_t, P_t, G_t y D_t son la escorrentía de la cuenca, la evapotranspiración real, la percolación hacia la zona saturada poco profunda, el flujo/volumen de aguas subterráneas hacia el

arroyo y la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día t (cm) (BID).

La percolación ocurre cuando el agua en la zona no saturada excede la capacidad de retención de agua del suelo, conocida como U^* (en cm).

$$P_t = \text{Max} (0, (U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - U^*))$$

La capacidad de retención de agua del suelo, U^* , es una propiedad que define la cantidad máxima de agua que la capa no saturada del suelo puede retener. Esta característica se determina a partir de las propiedades hidráulicas del suelo (BID, 2022).

La evapotranspiración está limitada por la humedad disponible en la zona no saturada, así:

$$E_t = \text{Min} ((CV_t * PET_t), (U_t + R_t + M_t - Q_t))$$

2.5.1.3. Calibración del modelo

La calibración es el proceso de ajustar los parámetros del modelo para que los resultados simulados (como los caudales de los ríos, niveles de agua y otros parámetros hidrológicos) coincidan lo más posible con los datos observados en el campo. Esto se logra mediante la comparación iterativa entre las simulaciones del modelo y las observaciones reales, ajustando los parámetros hasta que se alcance un buen nivel de concordancia.

HydroBID permite ajustar varios parámetros para que los resultados simulados (como los caudales de los ríos) se alineen con los datos observados obtenidos de las estaciones limnimétricas.

Este ajuste se realiza manualmente mediante un método de ensayo y error, ajustando los parámetros hasta que los resultados simulados se acerquen lo más posible a los datos observados.

Para evaluar el desempeño de la simulación, HydroBID utiliza varias métricas estadísticas que comparan los datos simulados con los datos observados. Estas métricas ayudan a determinar la precisión del modelo.

Los datos generados por el modelo y los datos históricos deben estar completos, sin valores faltantes, durante el período de análisis, en una temporalidad diaria.

Métricas Utilizadas:

St: Representa los valores simulados por el modelo.

Ot: Representa los valores observados (datos reales).

N: Es el número de días considerados en la simulación.

σ_{obs} : Es la desviación estándar de la serie de tiempo observada.

σ_{sim} : Es la desviación estándar de la serie de tiempo simulada.

Las ecuaciones correspondientes a las métricas utilizadas en HydroBID se muestran en la tabla 7 del documento de referencia.

Estas métricas incluyen indicadores como el coeficiente de Nash-Sutcliffe, el error medio cuadrático (RMSE) y otros que ayudan a cuantificar la correlación y la precisión entre los datos simulados y observados.

Tabla 6 Parámetros de calibración de HydroBID

Parámetro	Descripción	Valor sugerido
Número de curva (NC)	Caracteriza el tipo de suelo de la cuenca y su hidrología; oscila entre 0 y 1, en donde un valor de 1 representa que toda el agua que llueve se convierte en escorrentía y 0 representa una completa infiltración.	-
Contenido de agua en el suelo (AWC)	Representa la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo para ser usada por las plantas, afectando la infiltración hacia el agua subterránea. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa.	10
Coeficiente de Recesión (R)	Evidencia cómo el agua subterránea que se encuentra cerca de la superficie contribuye a los caudales de los ríos o corrientes superficiales después de un evento de lluvia. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.	0.01
Seepage o coeficiente de permeabilidad	Representa el intercambio entre las aguas subterráneas cerca de la superficie con los cuerpos de agua más profundos, en donde la cantidad de agua que se le atribuye a este parámetro se considera como una salida de la modelación. También puede ser ingresado como un multiplicador o en un valor directo.	0.005
Factor ET de la estación de cultivo	Caracteriza el factor de evapotranspiración de las plantas durante la etapa de cultivo. Se puede ingresar como multiplicador o como un valor directo.	1
Factor ET de la estación de latencia	Corresponde al factor de evapotranspiración en la etapa de latencia o en la etapa en la que no se encuentra cultivada la zona. En la interfaz puede ingresarse como un multiplicador que altera el valor anidado en la AHD puede ingresarse de forma directa como resultado de una medición en campo.	1
Porcentaje de la cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca y está disponible en algunas de las versiones del programa.	2

Fuente: (BID, 2022)

Tabla 7 Métricas de desempeño para la calibración de HydroBID

Métrica de desempeño	Fórmula	Valor óptimo
Volumen general de error	$ove = \frac{\sum_{t=1}^N S_t - \sum_{t=1}^N O_t}{\sum_{t=1}^N O_t} * 100$	Más cercano a 0
Correlación R	$r = \frac{N \sum_{t=1}^N O_t S_t - \sum_{t=1}^N O_t \sum_{t=1}^N S_t}{\sqrt{[N \sum_{t=1}^N S_t^2 - (\sum_{t=1}^N S_t)^2][N \sum_{t=1}^N O_t^2 - (\sum_{t=1}^N O_t)^2]}}$	Más cercano a 1
Coeficiente de correlación modificado	$r_{mod} = r \frac{\min(S_{sim}, S_{obs})}{\max(S_{sim}, S_{obs})}$	Más cercano a 1
Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe	$r^2 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (S_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^N (O_t - \mu_o)^2}$	<0.2 es insuficiente 0.2 - 0.4 es satisfactorio 0.4 – 0.6 es Bueno 0.6 – 0.8 es Muy bueno >0.8 es Excelente

Fuente: (BID, 2022)

2.5.2. WaterALLOC

WaterALLOC es una herramienta de modelado y asignación de recursos hídricos diseñada para optimizar el uso del agua en diferentes sectores y gestionar eficazmente la demanda y la oferta de agua. Esta plataforma es particularmente útil en la planificación y gestión de recursos hídricos en regiones con recursos limitados o en situaciones de competencia por el agua entre distintos usuarios (BID, 2022).

Una de las características clave de WaterALLOC es su capacidad para asignar recursos hídricos de manera eficiente entre sectores como la agricultura, la industria y el uso doméstico, basándose en prioridades y disponibilidad. La

herramienta también ayuda a resolver conflictos entre usuarios del agua al simular diferentes escenarios de asignación. Además, WaterALLOC permite la simulación de escenarios de demanda y oferta, considerando variaciones estacionales, cambios climáticos y crecimiento poblacional, lo que facilita la evaluación de estrategias de gestión hídrica, como la implementación de nuevas infraestructuras y políticas de conservación (BID).

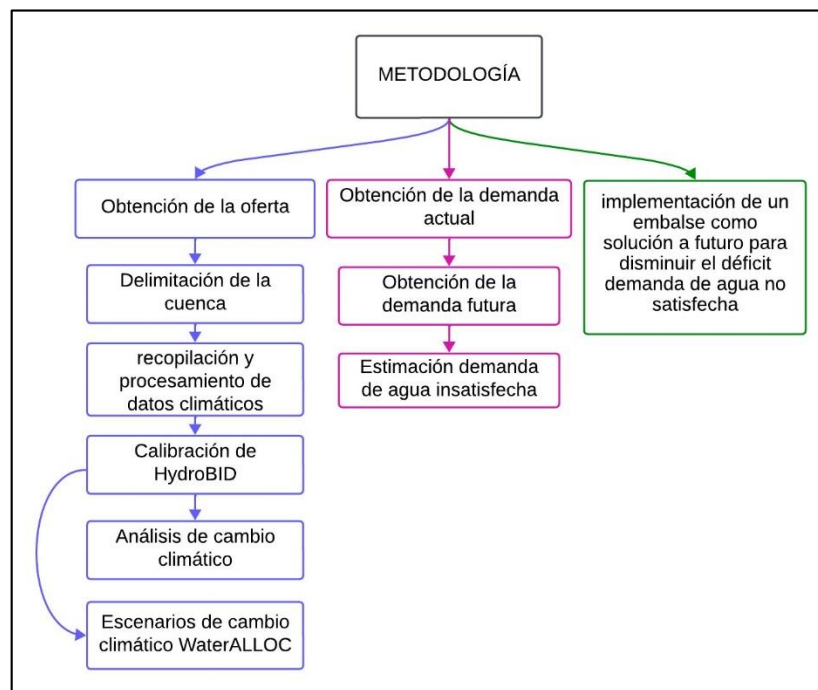
WaterALLOC ofrece una interfaz intuitiva que facilita la configuración de modelos y la interpretación de resultados, permitiendo a los usuarios definir áreas de estudio específicas, períodos de simulación y parámetros personalizados. También puede integrarse con otros programas de modelado hidrológico, como HydroBID, para proporcionar un análisis más completo y detallado, combinando datos hidrológicos, climáticos y socioeconómicos.

En cuanto a sus aplicaciones, WaterALLOC es valiosa para la planificación estratégica y la gestión de recursos hídricos a largo plazo, especialmente en la gestión de sequías y en la evaluación de proyectos de infraestructura, como la construcción de embalses y sistemas de riego. La herramienta también permite simular el impacto de políticas de conservación del agua y analizar el efecto de regulaciones en la distribución y uso del agua entre diferentes sectores (BID, 2022).

3. METODOLOGÍA

Esta investigación se divide en tres etapas metodológicas principales, alineadas con los objetivos planteados. Primero, se estimó la oferta hídrica actual y futura. Segundo, se determinó la demanda actual y futura. Tercero, se evaluó la implementación de un embalse como solución a futuro para disminuir el déficit demanda de agua no satisfecha en la cuenca del río Coello.

Ilustración 2 Esquema metodológico



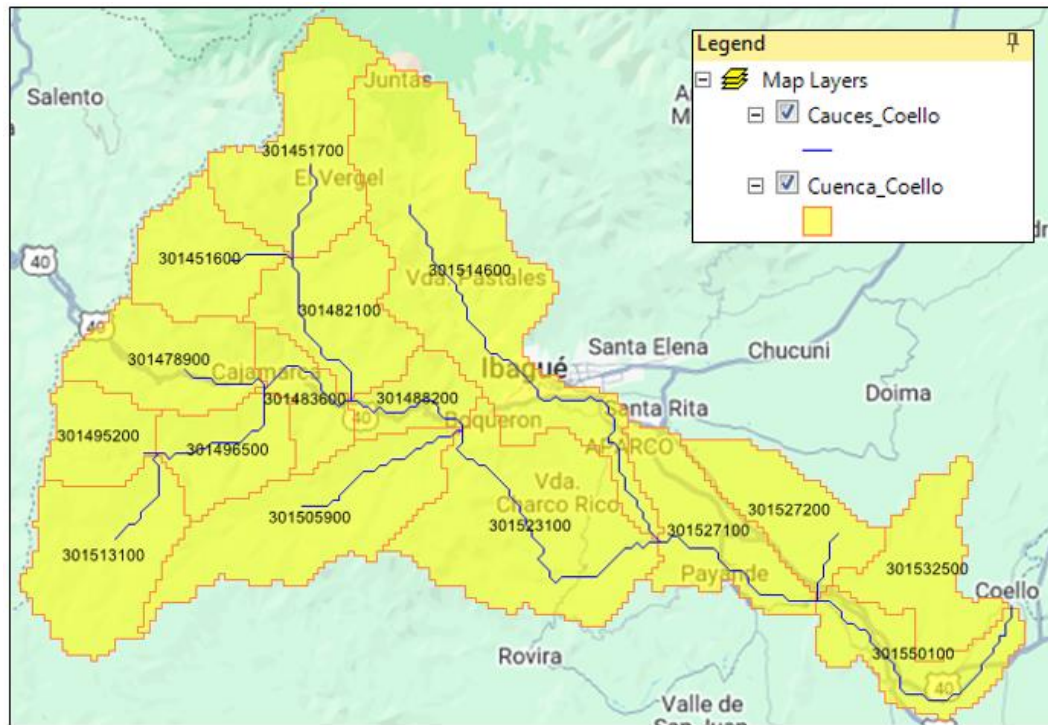
Fuente: elaboración propia

3.1. ESTIMACIÓN DE LA OFERTA

3.1.1. Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca se realiza utilizando la base de datos AHD del software HydroBID. Se emplea el software libre QGIS para visualizar y editar esta base de datos, cargando las capas de “catchment” y “AHD_flowline”. Primero, se enfoca en la región de Colombia y se delimita la cuenca del río Coello utilizando el navegador AHD, el cual proporciona información sobre subcuencas con su número identificador (COMID), ríos principales, dirección del flujo y datos geométricos como área, longitud del cauce principal y perímetro. Además, con las herramientas de geometría de QGIS, se calculan los centroides de cada subcuenca, un paso crucial para la interpolación climática que distribuye datos de temperatura y precipitación a lo largo de la cuenca.

Ilustración 3 Delimitación cuenca Río Coello



Fuente: elaboración propia

3.1.2. Obtención y tratamiento de los datos de entrada

En primer lugar, se recopila los datos climáticos e hidrológicos de la cuenca del Río Coello a partir de las estaciones limnimétricas y climatológicas ubicadas en las subcuencas, los cuales se obtienen de la página DHME del IDEAM, la Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA) y datos satelitales de NASA, requiriendo principalmente datos de temperatura media diaria, precipitación total diaria y caudales medios diarios, con los cuales se alimenta el modelo para su parametrización y posterior calibración.

Tabla 8 Estaciones limnimétricas y climatológicas en la cuenca del Río Coello

CATEGORÍA	CÓDIGO	NOMBRE	MUNICIPIO	COORDENADAS	
				LATITUD	LONGITUD
PRECIPITACIÓN	21210020	JUNTAS LAS	IBAGUÉ	4.5563056	-75.3216389
PRECIPITACIÓN	21210030	PASTALES	IBAGUÉ	4.5110556	-75.3008333
PRECIPITACIÓN	21210080	SECRETO EL	IBAGUÉ	4.4942778	-75.2899444
PRECIPITACIÓN	21210110	PLACER EL	IBAGUÉ	4.5209444	-75.2778889

PRECIPITACIÓN	21210120	ESMERALDA LA	IBAGUÉ	4.4909167	-75.2394167
PRECIPITACIÓN	21210140	PLAN EL	CAJAMARCA	4.38375	-75.4968611
PRECIPITACIÓN	21210220	PALMAR EL	IBAGUÉ	4.5801111	-75.3256667
TEMPERATURA	21215080	CHICORAL	ESPINAL	4.2315278	-74.9953611
TEMPERATURA	21245010	PERALES HATO OPIA	IBAGUÉ	4.4296667	-75.2005222
CAUDAL	21217070	PAYANDE	SAN LUIS	4.3013889	-75.0901389
CAUDAL	21217120]	PUENTE CARRETERA	IBAGUÉ	4.4028611	-75.2925278
CAUDAL	21217180	MONTEZUMA	IBAGUÉ	4.4820556	-75.2860556
CAUDAL	21217200	CARMEN EL	ROVIRA	4.3006111	-75.2065556

Para cada estación se realiza la verificación de la coherencia y la calidad de los datos, con el fin de garantizar que sean confiables y adecuados para su uso en el modelado. Esto incluye la identificación y corrección de errores, la detección de valores atípicos y anomalías, y la evaluación de la precisión y la fiabilidad de los datos. Se realiza mediante el análisis de consistencia, fundamental para asegurar que el modelo hidrológico produzca resultados precisos y significativos (Puma, 2018).

Para la revisión de la consistencia de los datos de precipitación de todas las estaciones de la cuenca del Río Coello se utiliza el método de la Doble Masa Acumulada, el cual permite detectar errores sistemáticos o anomalías en los valores registrados en un período de tiempo determinado (Hernández, 2019). Estos errores pueden surgir de cambios en el equipo de medición, errores en la calibración o en la observación de los datos.

3.1.3. Interpolación de datos climáticos

Una vez obtenidos los registros históricos diarios de precipitación y temperatura de bases de datos locales y regionales de entidades gubernamentales, se procede a realizar el procesamiento de los datos climatológicos.

HydroBID tiene incorporada una herramienta para el procesamiento de los datos climatológicos llamada CDIT: Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos. Los datos climáticos diarios disponibles en cada estación se interpolan espacialmente usando una técnica conocida como la Distancia Inversa Ponderada (IDW). Luego de correr la CDTI, cada subcuenca (catchment) tiene asignado datos de precipitación y temperatura diarios. Los parámetros y datos de entrada se almacenan en una sola base de datos SQLite, en este proyecto se utiliza el DB Browser for SQLite.

Ilustración 4 Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos

Fuente: elaboración propia

Donde:

Fecha inicial y final: corresponde al período para el cual se desea realizar la simulación.

Archivo de Coord. De centroides: aquí se carga el archivo “catchment_centroids.csv” con los COMID’s de las cuencas y sus coordenadas latitude/longitude que se encuentra en la carpeta “climate”.

Archivo de Coord. De estaciones: se carga el archivo “station_coord.csv” con las estaciones meteorológicas y sus coordenadas latitude/longitude.

Carpeta de Precip. y Temp.: aquí se carga las carpetas que contienen datos diarios de cada estación en formato .csv (subcarpetas Precip and Temp en la carpeta climate).

Base de datos SQLite: contiene la ruta de la base de datos que se utilizará en la corrida de la herramienta. Aquí es donde se guarda la tabla con los datos climáticos interpolados. La ubicación de la base de datos corresponde automáticamente con la impuesta en la ventana inicial de HydroBID.

Nombre de la tabla de datos climáticos: aquí se escribe el nombre de la tabla que contendrá los datos climáticos interpolados. Esta tabla luego se selecciona en “DB Met Data Table” en la ventana principal cuando se vaya a correr HydroBID para utilizar los valores interpolados.

No. De estaciones a utilizar en la interpolación: aquí se especifica el número de estaciones cercanas utilizadas para calcular la variable climática interpolada.

Para corroborar que la interpolación de datos climáticos corrió satisfactoriamente, se selecciona la opción 'Herramienta Editor de Base de Datos', luego se escoge la tabla de datos climáticos y se observa que para todas las estaciones hay datos climáticos diarios multianuales.

3.1.4. Calibración y validación del modelo de HydroBID

La calibración del modelo se realiza por subcuencas, utilizando datos de cuatro estaciones de caudal observado. Este proceso manual, basado en el método de ensayo y error, comienza en la cuenca más alta y avanza hacia las más bajas, ajustando los parámetros de cada subcuenca en relación con la anterior hasta llegar a la desembocadura del cauce principal. Se considera el período del 01/01/1985 al 31/12/2021.

En el proceso de calibración se consideraron los siguientes parámetros: número de curva, contenido disponible de agua en el suelo (AWC), coeficiente de recesión (R), pérdidas del sistema (seepage), factor de evapotranspiración de la estación de cultivo y factor de evapotranspiración de la estación de latencia. Las métricas de desempeño del modelo incluyeron el volumen general de error, la correlación R, el coeficiente de correlación modificado y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, junto con la curva de duración de caudales, que muestra gráficamente el comportamiento de los caudales observados y simulados.

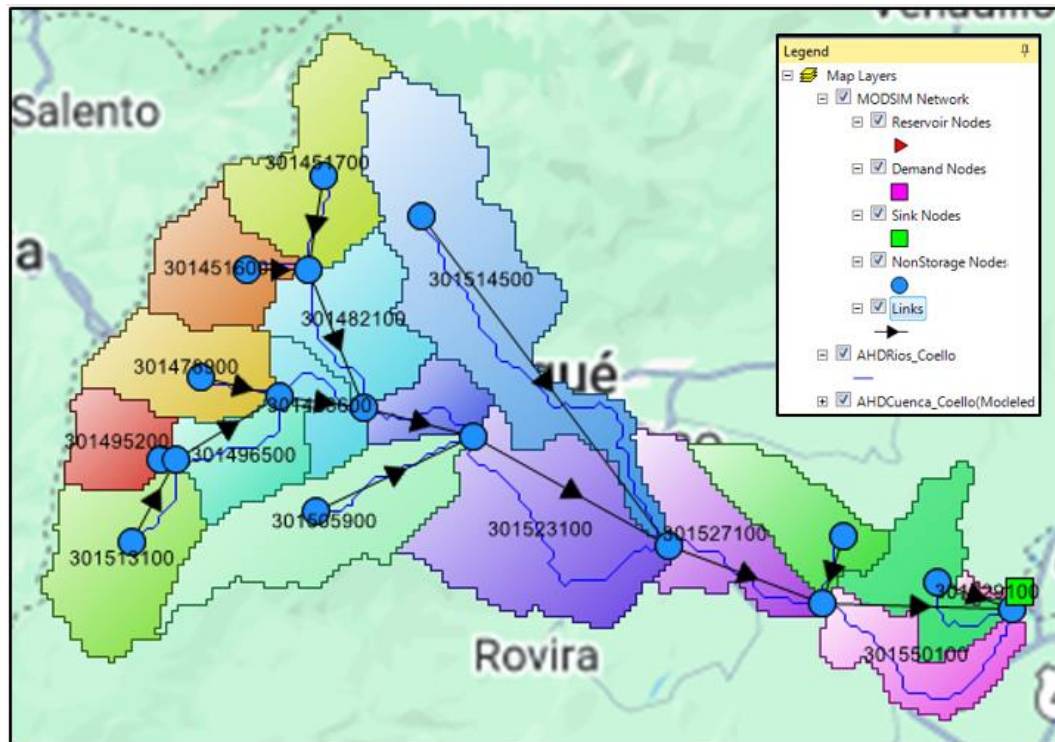
Como parte de la base de datos proporcionada por HydroBID, se incluye una caracterización de la cobertura del suelo de la región. Con esta información se definieron los números de curva para cada subcuenca, basándose en los tipos de suelo y grupos hidrológicos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), complementados con datos de cobertura de suelo del USGS y clasificaciones hidrológicas adaptadas de la base de datos mundial de suelos (HWSD). Esto permite una estimación precisa del número de curva, fundamental para las modelaciones de caudales (SPOC HydroBID, 2019).

3.1.5. Topología del sistema de modelación

Una vez calibrada la simulación en HydroBID, se construye la topología del sistema de modelación en WaterALLOC, la topología se refiere a la estructura y organización de los componentes y flujos dentro de un modelo hidrológico, incluye

la disposición y conexión de cuencas, ríos, embalses y otros elementos del sistema hidrológico que están siendo modelados. Esta estructura determina cómo el agua se mueve a través del sistema desde las precipitaciones hasta los cuerpos de agua receptores (BID).

Ilustración 5 Red de flujo superficial de MODSIM para la cuenca de estudio



Fuente: elaboración propia

3.1.6. Estimación de la oferta hídrica

Para simular la oferta hídrica en cada subcuenca, se importaron series temporales de caudal simulado por HydroBID como entradas en los nodos de afluencia de MODSIM.

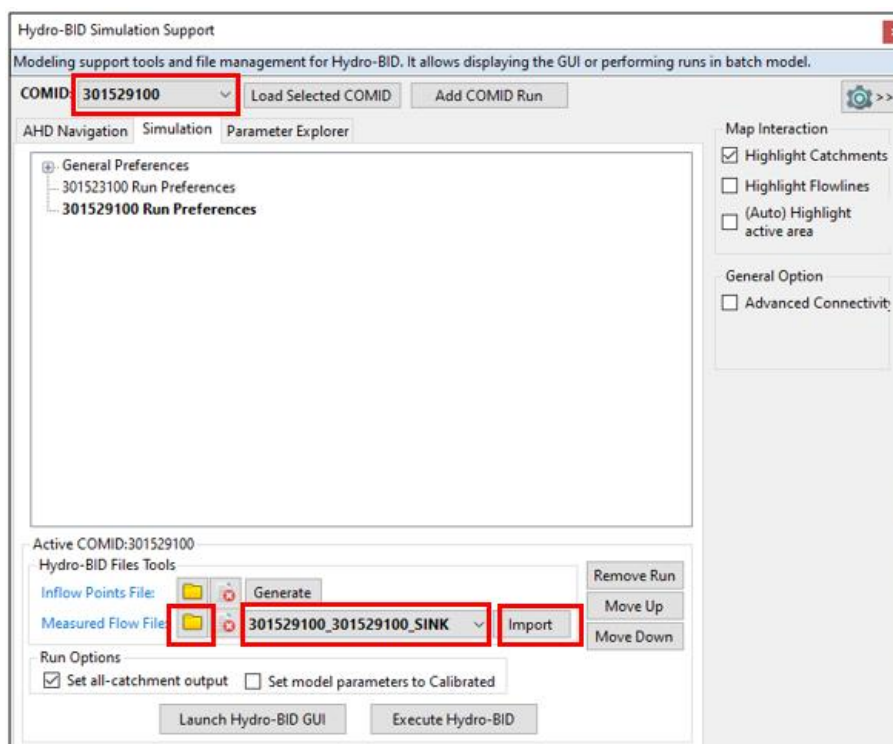
Se importan los caudales observados en la estación de la cuenca más aguas abajo '301529100' a la red de MODSIM, en la opción "Simulación HydroBID", siguiendo los siguientes pasos:

- Se selecciona la cuenca más aguas abajo
- Se enlaza el archivo de caudales '21217200'
- Se selecciona el enlace que vincula el nodo de afluencia del COMID seleccionado con el nodo de afluencia aguas abajo

- Clic en “Import”

El caudal es introducido al modelo en los nodos azules sin almacenamiento y es conducida y acumulada por los vínculos en la dirección establecida hasta los nodos de sumidero (de la misma forma que es calculada en HydroBID)

Ilustración 6 Importación de caudales a la red de MODSIM



Fuente: elaboración propia

3.1.7. Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático

La modelación de escenarios de cambio climático se realizó utilizando series de precipitación y temperatura derivadas de la metodología de los Shared Socioeconomic Pathways (SSP). Para ello, se implementó la herramienta de interpolación climática de HydroBID, analizando los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para el período 2020-2039.

MÉTRICA	SSP1 – 2.6
	2020-2039
Temperatura media anual (°C)	0.69

Precipitación anual (mm)	46.86
MÉTRICA	SSP2 – 4.5
	2020-2039
Temperatura media anual (°C)	0.72
Precipitación anual (mm)	25.28
MÉTRICA	SSP3 – 7.0
	2020-2039
Temperatura media anual (°C)	0.72
Precipitación anual (mm)	4.40

3.2. OBTENCIÓN DE LA DEMANDA

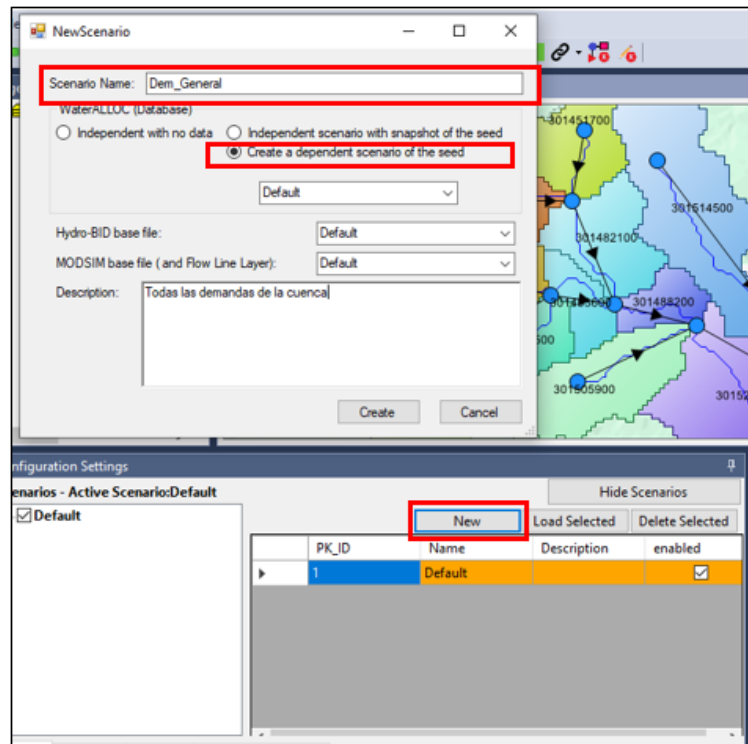
3.2.1. Obtención de la demanda actual y futura

Para de la demanda actual de la cuenca fue necesario recurrir a los registros de la Corporación Autónoma Regional del Tolima – Cortolima, con el fin de obtener los valores correspondientes a las concesiones asignadas dentro de la zona de estudio y que tienen una clasificación doméstica, agrícola e industrial. La totalidad de los puntos de demanda se pueden observar en la tabla 9.

COMID	DEMANDAS			
	ACUEDUCTO	AGRÍCOLA	CONSUMO HUMANO	INDUSTRIAL
301527100	0	67837.824	0	0
301527200	139.968	81864	0	0
301495200	0	1728	0	0
301483600	876.96	0	18.576	0
301488200	2039.1264	0	192.672	0
301496500	857.952	0	39.4848	0
301505900	87706.368	0	2.592	0
301523100	1244.16	22825.152	1537.92	0
301478900	6380.64	86.4	9.504	0
301514500	201893.7312	21613.824	1883.4768	850.6944
301451600	67.392	0	0	0
301550100	0	27855.36	0	0
301513100	0	0	0	0
301451700	0	0	0	0
301482100	952.128	0	4.32	0

Fuente: elaboración propia

Ilustración 8 Creación de escenario para demandas



Fuente: elaboración propia

Se nombra el nuevo escenario 'Dem_General', se selecciona la opción 'Create a dependent scenario of the seed' y selecciona el escenario 'Default' como el escenario de referencia. Esto hará que el nuevo escenario sea dependiente de 'Default'.

Ilustración 9 Configuración de escenario para demandas

WaterALLOC Demands Import

Imports WaterALLOC demand data and create demand nodes.

☒ Selected Scenario Preferences

- workspace: C:\Users\Valeria\Desktop\WA_FINAL2
- activeScnName: Dem_General
- activeScnID: 3
- MODSIM XY file: MODSIM\Dem_General.xy

Demand Import Preferences

Input file for demands: Demandas\Demandas_Coello.csv

☐ Include COMID precipitation in the NIWR

☐ Create ALL domestic nodes

☐ Delete all demand nodes from the base

Priorities

Agriculture	2
Municipal	1
Others	3
Groundwater	4

☒ Setup Domestic downstream return flows

Consumption [%] 20.00 # lags [periods] 0

☒ Setup Agricultural downstream return flows

Consumption [%] 60.00 # lags [periods] 7

☒ Setup Other Demands downstream return flows

Consumption [%] 100.00 # lags [periods] 0

Adjustment Factor

Multiplier 1.00

Name Prefix Column

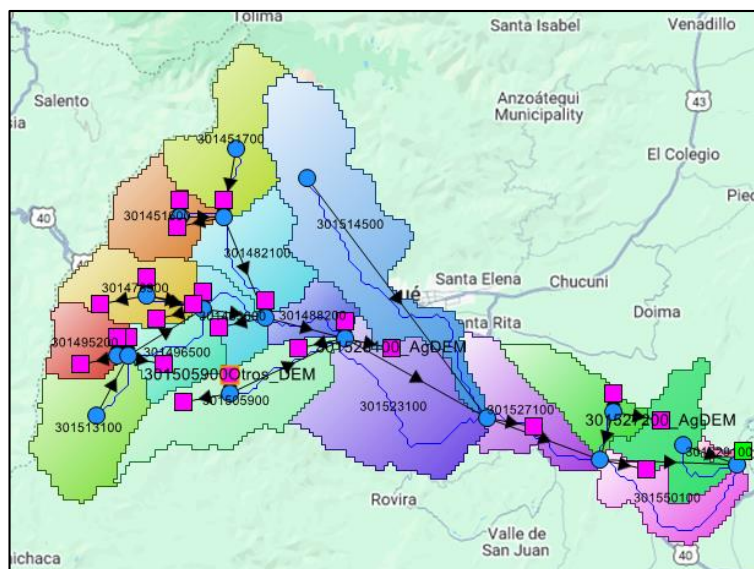
Node Position

Scale Factor 1.0

Import Demands

Fuente: elaboración propia

Ilustración 10 Visualización nodos de demanda



Fuente: elaboración propia

3.2.3. Estimación de la demanda insatisfecha por escenario de cambio climático

Después de integrar las series de datos de HydroBID en WaterALLOC, se ejecuta el modelo. Durante esta ejecución, WaterALLOC arroja valores de demanda, valores de oferta de agua generada y valores de demanda insatisfecha para cada nodo de demanda, por medio de gráficas y datos tabulados.

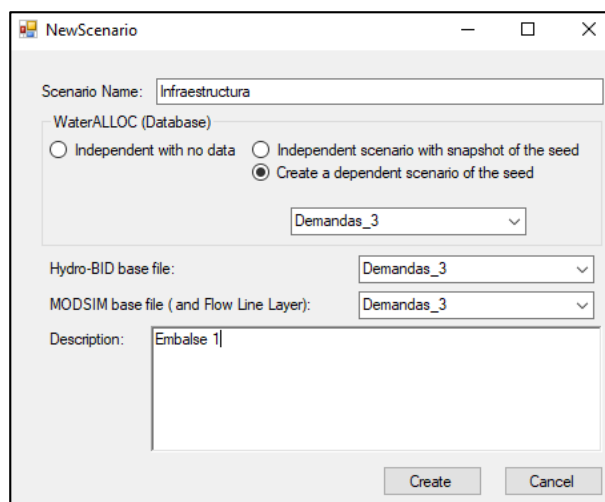
3.3. PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE EMBALSE PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA INSATISFECHA

Para este proyecto se propone la construcción de un embalse con capacidad de 40 millones de m³ que permita almacenar agua durante períodos de abundancia para su uso en períodos de escasez. Con WaterALLOC se realiza la simulación hidrológica de la cuenca con un embalse para mejorar la relación oferta-demanda en la cuenca en el futuro.

Un lugar ideal para el embalse es en la confluencia de varios ríos, donde se puede captar una mayor cantidad de agua, esto podría ser en las zonas donde los tributarios se unen antes de entrar a la parte más amplia del río principal.

Lo primero que se hace es crear un nuevo escenario en WaterALLOC, llamado 'Infraestructura' dependiente del escenario de demandas.

Ilustración 11 Creación de escenario de infraestructura

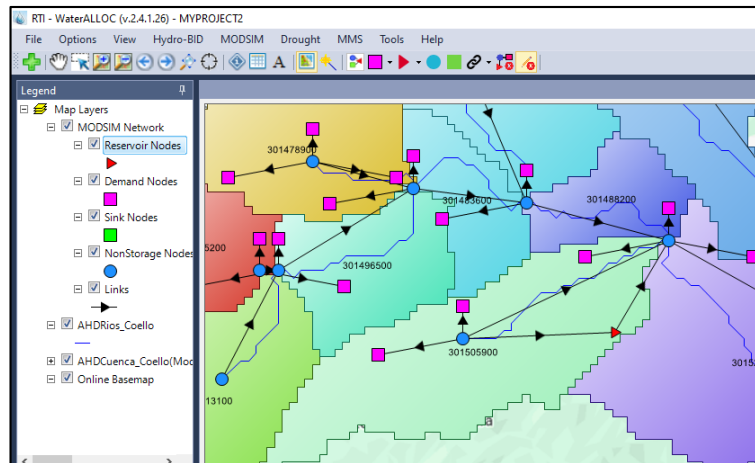


The image shows a 'NewScenario' dialog box with the following fields and options:

- Scenario Name:** Infraestructura
- WaterALLOC (Database):**
 - ☐ Independent with no data
 - ☐ Independent scenario with snapshot of the seed
 - ☒ Create a dependent scenario of the seed
- WaterALLOC (Database) dropdown:** Demandas_3
- Hydro-BID base file:** Demandas_3
- MODSIM base file (and Flow Line Layer):** Demandas_3
- Description:** Embalse 1
- Buttons:** Create, Cancel

Fuente: elaboración propia

Ilustración 12 Creación nodo de embalse



Fuente: elaboración propia

Ahora, se modifican las propiedades del embalse.

Ilustración 13 Configuración de propiedades del embalse

Reservoir Node Properties (42) - a82956a9-329c-47...

Node Name: ReservoirNode42

Description:

A/C/E/Hydraulic Capacity **Runoff Forecast**

General **Power** **Targets** **Evaporation** **Groundwater Seepage**

Reservoir Information

Maximum Volume: 40000

Minimum Volume: 10000

Initial Volume: 20000

Volume Units: 1000 m³

Hydrologic Table Name:

Priority

Priority Number: 150

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ESTIMACIÓN DE LA OFERTA

4.1.1. Tratamiento de los datos de entrada

Para la revisión de la consistencia de los datos de precipitación de todas las estaciones de la cuenca del Río Coello se utiliza el método de la Doble Masa Acumulada, el cual permite detectar errores sistemáticos o anomalías en los valores registrados en un período de tiempo determinado (Hernández, 2019). Estos errores pueden surgir de cambios en el equipo de medición, errores en la calibración o en la observación de los datos.

Se calcula la PPA de todas las estaciones para establecer una base de comparación de los datos y graficar la curva de doble masa con la Precipitación Acumulada de cada estación (PPx). Esto permite identificar quiebres o datos inconsistentes respecto a la tendencia.

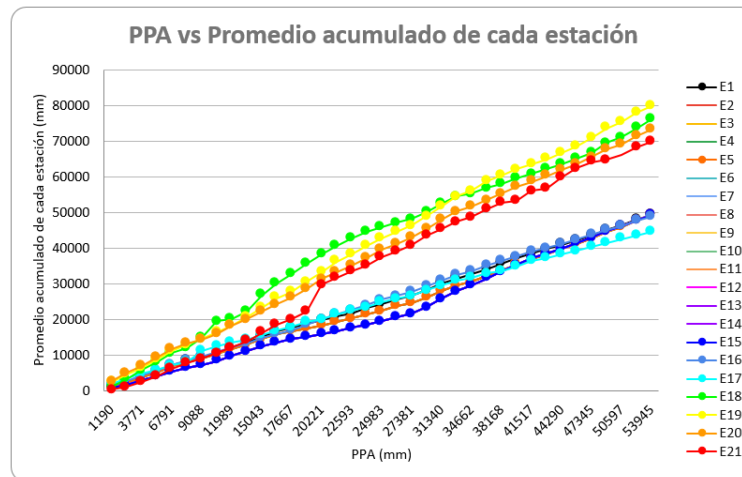
Tabla 9 Precipitación Promedio Acumulada

Precipitación Media Acumulada - PPA (mm)			
Año	PPA (mm)	Año	PPA (mm)
2021	1190	2002	26256
2020	2348	2001	27381
2019	3771	2000	29243
2018	5229	1999	31340
2017	6791	1998	33261
2016	7984	1997	34662
2015	9088	1996	36469
2014	10544	1995	38168
2013	11989	1994	39799
2012	13365	1993	41517
2011	15043	1992	42836
2010	16561	1991	44290
2009	17667	1990	45781
2008	18863	1989	47345
2007	20221	1988	49176
2006	21444	1987	50597
2005	22593	1986	52348

2004	23751	1985	53945
2003	24983		

Fuente: elaboración propia

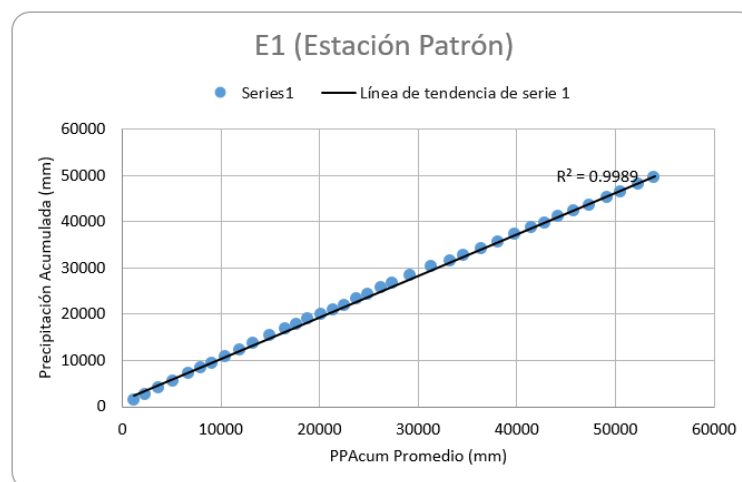
Gráfica 1 Precipitación promedio acumulada VS promedio acumulado de cada estación



Fuente: elaboración propia

Se selecciona la estación con los datos más confiables para luego evaluar las demás estaciones y generar el factor de corrección. Se establece como estación patrón a E1 por tener un $R^2 > 0,99$.

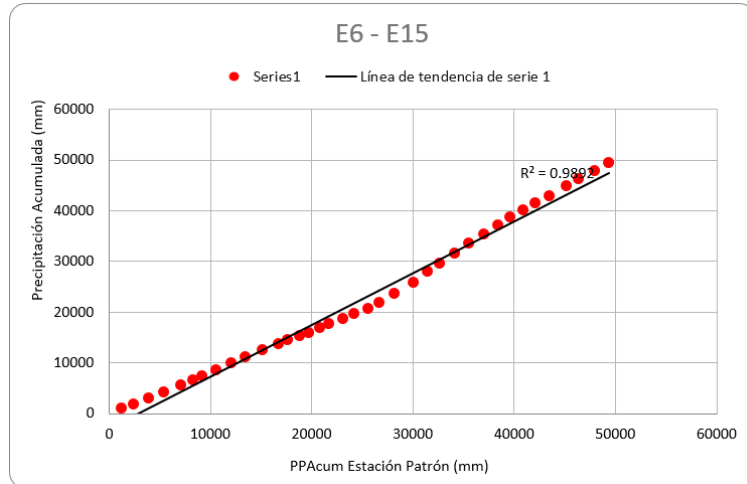
Gráfica 2 Estación patrón



Fuente: elaboración propia

Se procede a realizar el análisis de cada estación con respecto a la Estación Patrón (E1).

Gráfica 3 análisis de cada estación con respecto a la Estación Patrón

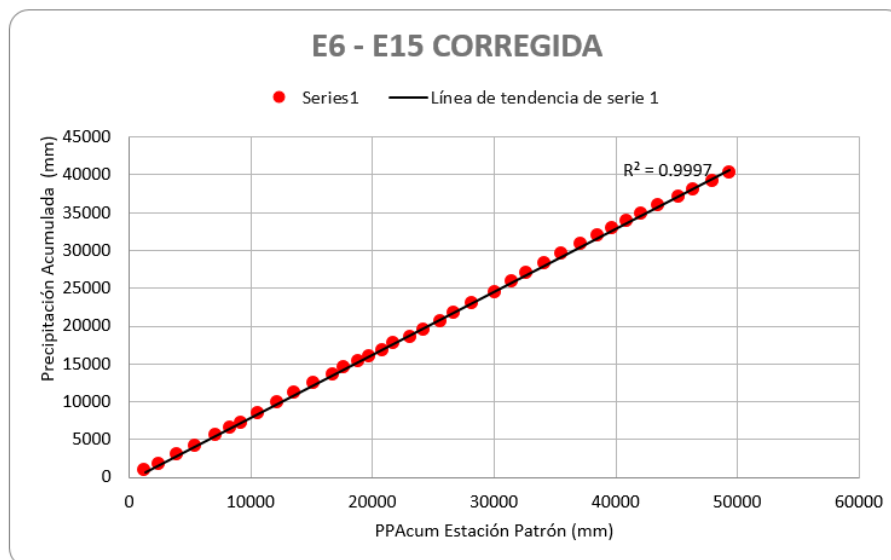


Fuente: elaboración propia

Se calcula el factor de ajuste dividiendo la pendiente del tramo que mejor representa la tendencia correcta por la pendiente del tramo identificado como quiebre o error sistemático. Este factor de ajuste, al ser aplicado a los datos que presentan quiebres, corrige la tendencia incorrecta y ajusta la consistencia de estas estaciones (Jorge Mendoza Cedeño).

Finalmente se vuelve a realizar la curva de doble masa para verificar el grado del ajuste de los datos. Se aplica el factor de corrección a las estaciones que presentaron un $R^2 < 0,90$. Este proceso se aplicó a las estaciones E6, E7, E8, E9, E10, E11, E12, E13, E14, E15, E18 y E21. (Anexo A)

Gráfica 4 aplicación de factor de corrección



Fuente: elaboración propia

Una vez validados los registros históricos diarios de precipitación y temperatura de bases de datos locales y regionales de entidades gubernamentales IDEAM y Corporación Autónoma Regional del Tolima (CORTOLIMA), se procede a realizar el procesamiento de los datos climatológicos. HydroBID tiene incorporada una herramienta para el procesamiento de los datos climatológicos llamada CDIT: Herramienta de Interpolación de Datos Climáticos. Los datos climáticos diarios disponibles en cada estación se interpolan espacialmente usando una técnica conocida como la Distancia Inversa Ponderada (IDW). Luego de correr la CDTI, cada subcuenca (catchment) tiene asignado datos de precipitación y temperatura diarios. Los parámetros y datos de entrada se almacenan en una sola base de datos SQLite, en este proyecto se utiliza el DB Browser for SQLite.

Para corroborar que la interpolación de datos climáticos corrió satisfactoriamente, se selecciona la opción 'Herramienta Editor de Base de Datos', luego se escoge la tabla de datos climáticos llamada 'Coello_Inter3' y se observa que para todas las estaciones hay datos climáticos diarios multianuales.

Ilustración 14 Base de Datos Climática Interpolada

Database Editor

Coello Inter3

Valores Mensuales

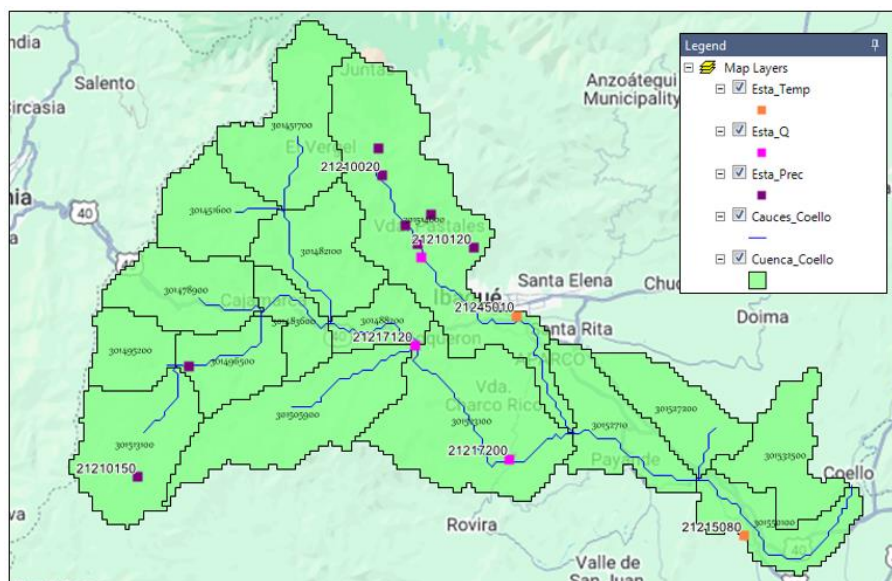
comid	measured_...	avg_temp	avg_precip
301451600	19850101	14,55	0,141
301451600	19850102	14,36	0,303
301451600	19850103	14,22	0,538
301451600	19850104	14,22	0,421
301451600	19850105	14,19	0,224
301451600	19850106	13,97	0,449
301451600	19850107	14,54	0,6
301451600	19850108	14,17	0,191
301451600	19850109	14,46	0,046
301451600	19850110	14,86	0,017
301451600	19850111	15,14	0,047
301451600	19850112	15,37	0,175
301451600	19850113	14	0,167
301451600	19850114	14,57	0,107
301451600	19850115	14,33	0,084
301451600	19850116	13,85	0,069
301451600	19850117	14,24	0,093
301451600	19850118	15	0,134
301451600	19850119	15,15	0,488
301451600	19850120	14,71	0,29
301451600	19850121	13,82	0,576
301451600	19850122	13,63	0,51
301451600	19850123	13,16	0,66
301451600	19850124	13,87	0,407
301451600	19850125	14,5	0,654
301451600	19850126	13,92	0,276
301451600	19850127	14,35	0,126

Fuente: elaboración propia

4.1.2. Calibración y validación del modelo de HydroBID

Para la calibración del modelo, se procedió a realizar la modelación de la subcuenca 301527100, correspondiente a la estación Payande, en un periodo de tiempo comprendido entre 1985 y 2021, siendo ésta la estación de caudales más próxima al punto final de salida de la cueca total del río Coello, como se muestra en la siguiente imagen.

Ilustración 15 Estaciones en la cuenca del río Coello



Fuente: elaboración propia

Los resultados de la primera modelación proporcionaron los parámetros estadísticos iniciales de error y correlación entre la información calculada por la herramienta y los datos históricos. Estos parámetros, junto con las gráficas de duración de caudales y caudales multianuales generadas por la herramienta, son cruciales para la calibración del modelo. El objetivo es lograr la mayor similitud posible entre los valores observados y los calculados.

Tabla 10 Parámetros de calibración inicial

Parámetro	Valor
NC	0.8
AWC	1
R	0.008
Seepage	0.005

Fuente: elaboración propia

Tabla 11 Parámetros Estadísticos resultantes de la modelación inicial

ESTADISTICAS	VALOR
Ove (%)	-28.8
R(-)	0.26
Rmod	0.25
NSE	-0.77

Con base en lo anterior, se realizaron los ajustes y pruebas necesarios a los parámetros, con el objetivo de mejorar el ajuste de las curvas de caudales y los parámetros estadísticos dentro de los rangos establecidos. Después de varias iteraciones, se determinó que los parámetros más relevantes e influyentes en la calibración del modelo fueron el coeficiente de recesión (RC), el contenido de agua disponible (AWC) y el coeficiente de permeabilidad.

Tabla 12 Parámetros de calibración inicial

Parámetro	Valor
NC	0.85
AWC	0.039
R	0.016
Seepage	0.0047

Fuente: elaboración propia

Tabla 13 Parámetros Estadísticos resultantes de la modelación inicial

ESTADISTICAS	VALOR
Ove (%)”	6.87
R(-)”	0.46
Rmod”	0.43
NSE”	-0.19

Fuente: elaboración propia

Las métricas de desempeño de la calibración reflejan que el proceso de calibración es aceptable, teniendo en cuenta que, la zona de estudio, cuenca del río Coello se caracteriza por ser una cuenca de pulsos, donde los volúmenes de escorrentía aumentan repentinamente debido a los deshielos del Nevado del Ruiz (Aguilar, 2020). Este comportamiento no fue considerado en el proceso de calibración, por lo que el ajuste de los resultados en la parte alta de la cuenca solo representa el componente atmosférico, excluyendo los aportes adicionales de los deshielos (Aguilar, 2020).

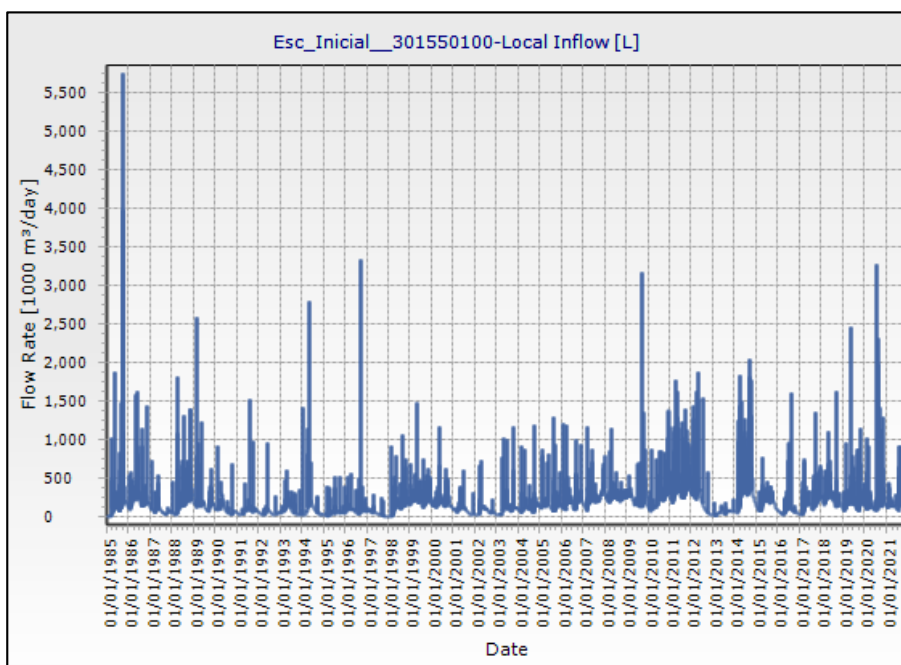
4.1.3. Modelación hidrológica bajo escenarios de cambio climático

A continuación, se mostrará los hidrogramas que muestran el flujo enrutado a través del enlace.

4.1.3.1. Escenario actual

La oferta de agua en el nodo actual es de 877.728 m³/día.

Gráfica 5 Hidrograma flujo enrutado a COMID 301550100



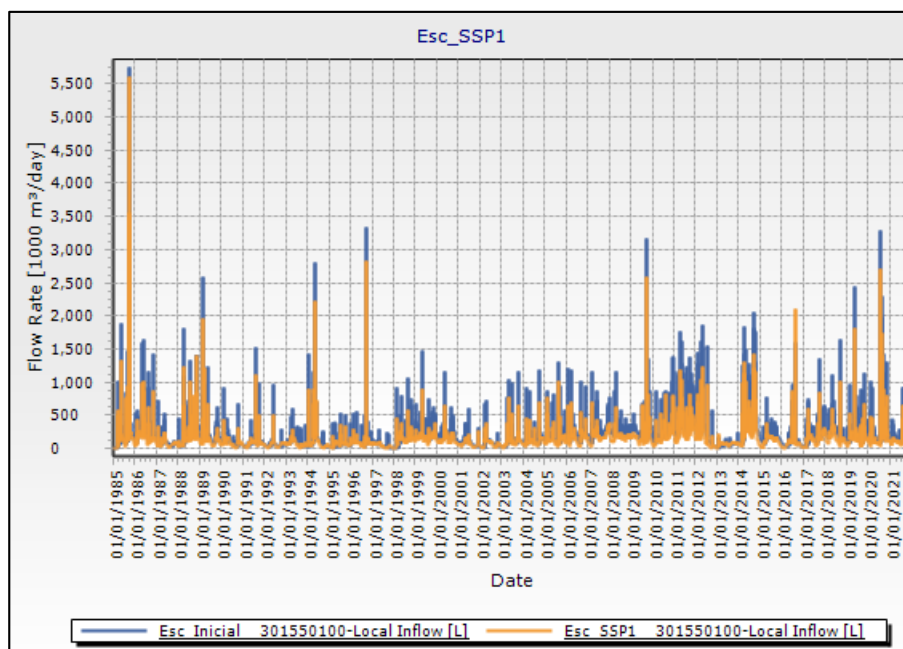
Fuente: elaboración propia

Los hidrogramas de flujo enrutado para cada COMID se encuentran en el anexo C.

4.1.3.2. Escenario SSP1 (2020 – 2039)

El análisis de los caudales en el nodo 301550100 de la cuenca, bajo el escenario de cambio climático SSP1 (2020-2039), muestra una reducción en comparación con los caudales iniciales. Según los datos proporcionados, el caudal inicial es de 877.728 m³/día, mientras que bajo el escenario SSP1, el caudal es de 827.052 m³/día. La reducción en el caudal es de 684,782.54 m³/día, lo que representa una reducción del 5.77% en la oferta.

Ilustración 16 Flujo enrutado de escenario actual vs SSP1



Fuente: elaboración propia

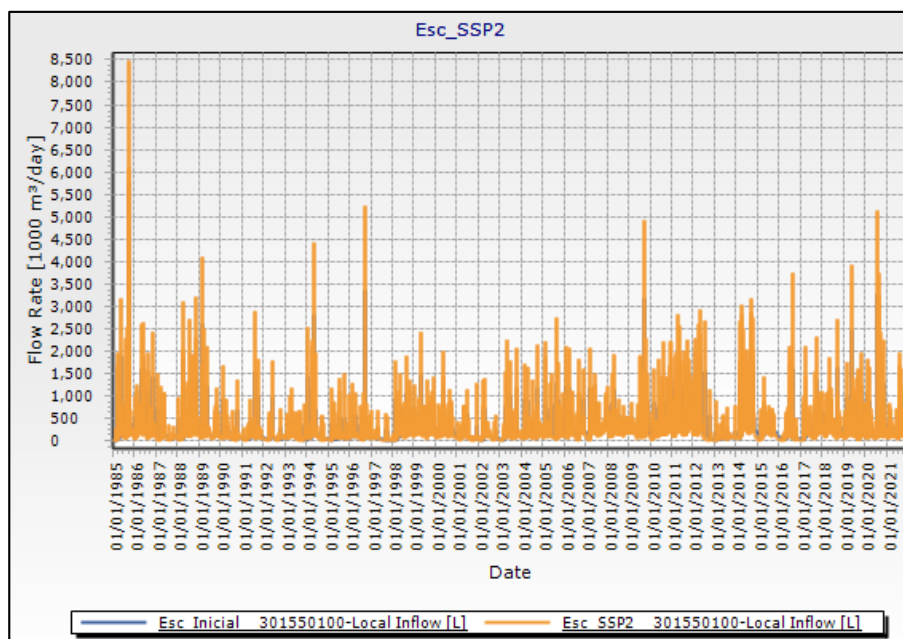
En la gráfica se observa que los picos de caudal bajo el escenario SSP1 son de menor magnitud comparados con los picos de caudal iniciales. Esto indica que se espera una disminución en la oferta hídrica total y la capacidad de la cuenca para suministrar agua se verá reducida, aumentando la frecuencia y severidad de los períodos de escasez.

Los hidrogramas de flujo enrutado para cada COMID se encuentran en el anexo D.

4.1.3.3. Escenario SSP2 (2020 – 2039)

El análisis de los caudales en el nodo 301550100 de la cuenca bajo el escenario de cambio climático SSP2 (2020-2039) muestra una reducción en comparación con los caudales iniciales. Según los datos proporcionados, el caudal inicial es de 877.728 m³/día, mientras que bajo el escenario SSP2, el caudal es de 803.163 m³/día. La reducción en el caudal es de 74.5649841 m³/día, lo que representa una reducción del 8.49% en la oferta de agua.

Ilustración 17 Flujo enrutado de escenario actual vs SSP2



Fuente: elaboración propia

El escenario SSP2, denominado "Camino Intermedio", representa una continuación de las tendencias actuales con ciertos avances en sostenibilidad, pero con desafíos persistentes. Este escenario proyecta emisiones moderadas y un clima que sigue calentándose, aunque a un ritmo controlado.

El cambio climático en el escenario SSP2 afecta directamente los patrones de precipitación y temperatura, resultando en una menor recarga de acuíferos y flujos superficiales. Esto se refleja en la gráfica, donde los caudales bajo el escenario SSP2 (líneas naranjas) son consistentemente menores que los caudales iniciales (líneas azules).

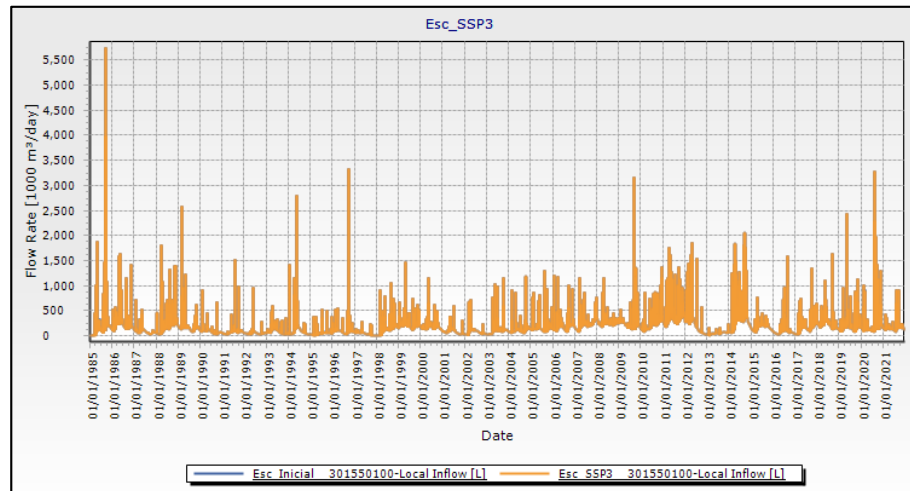
Los hidrogramas de flujo enrutado para cada COMID se encuentran en el anexo E.

4.1.3.4. Escenario SSP3 (2020 – 2039)

El análisis de los caudales en el nodo de la cuenca bajo el escenario de cambio climático SSP3 (2020-2039) muestra un incremento en comparación con los caudales iniciales. Según los datos proporcionados, el caudal inicial es de 877.728 m³/día, mientras que bajo el escenario SSP3, el caudal es de 890.636 m³/día. El

aumento en el caudal es de 12.907 m³/día, lo que representa un incremento del 1.47% en la oferta de agua.

Ilustración 18 Flujo enrutado de escenario actual vs SSP3



Fuente: elaboración propia

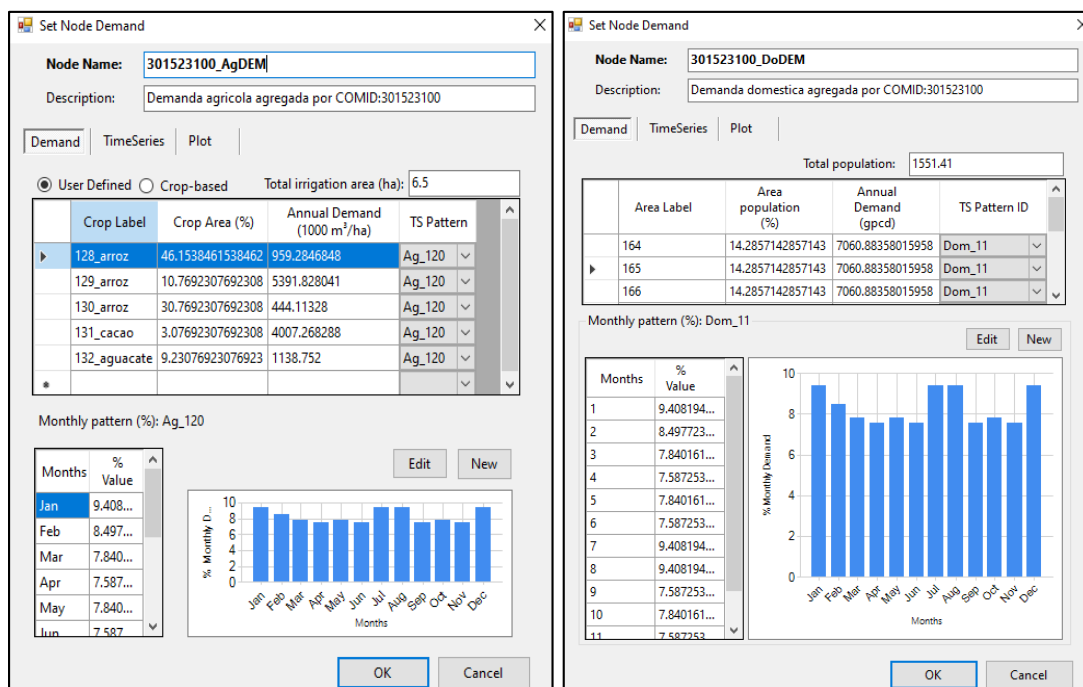
El escenario SSP3 muestra un aumento en la oferta de agua. Este incremento podría ser atribuido a cambios en los patrones de precipitación y temperatura que, aunque no mitigados por políticas de sostenibilidad, resultan en una mayor recarga de acuíferos y flujos superficiales en esta región específica.

Los hidrogramas de flujo enrutado para cada COMID se encuentran en el anexo F.

4.2. OBTENCIÓN DE LA DEMANDA

El proceso de proyección de la población arrojó como resultado una variación promedio de 1.9%, -0.5% y 2.1% para los puntos de demanda agrícola, industrial y poblacional respectivamente; valores que fueron aplicados en el período de modelación 2020 – 2039 de los escenarios ya mencionados.

Ilustración 19 Exploración de las demandas importadas



Fuente: elaboración propia

4.2.1. Obtención de la demanda insatisfecha por escenario

Una vez se ingresan las demandas de la cuenca, se procede a correr el modelo de MODSIM y se pueden observar las series temporales de las demandas suministradas, los flujos de entrada y los déficits de agua para cada nodo.

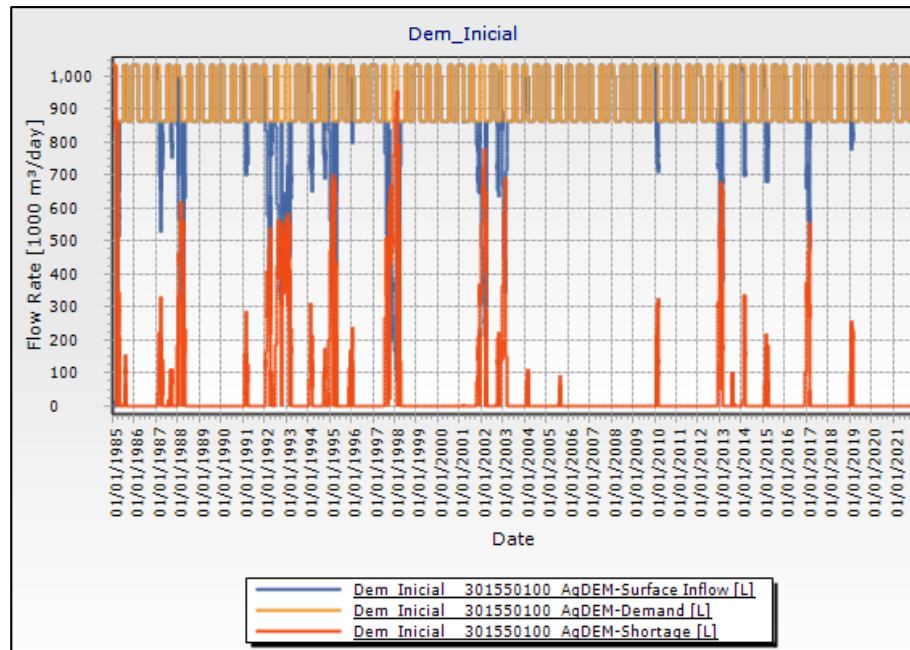
En la leyenda se muestran los siguientes elementos:

- Surface Inflow (en azul) representa el flujo de agua hacia el nodo a través del enlace.
- Demand (en amarillo) representa la demanda en el nodo.
- Shortage (en naranjado) representa la demanda insatisfecha. Esto se calcula como la diferencia entre el flujo de agua hacia el nodo y la demanda.

4.2.1.1. Escenario actual

En el escenario actual, se observa una demanda total de agua de 931.811 m³/día, mientras que el déficit de agua es de 54.084 m³/día. Este déficit representa aproximadamente el 5.80% de la demanda total en el nodo 301550100, lo cual refleja la necesidad de una mejor gestión de los recursos hídricos.

Ilustración 20 Serie temporal de demandas en COMID 301550100



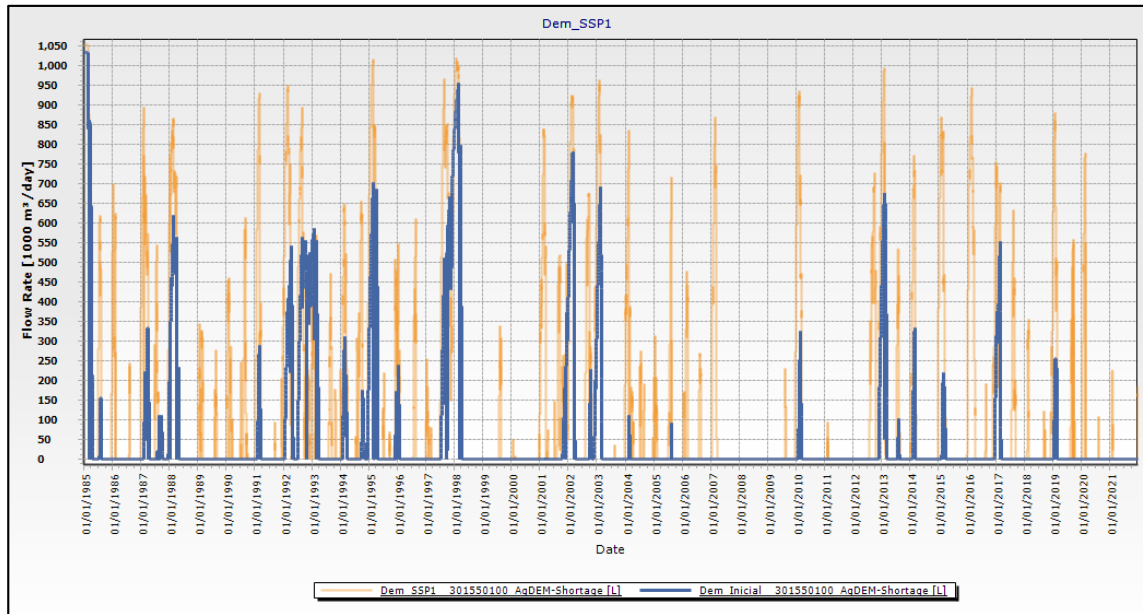
Fuente: elaboración propia

Las series temporales para todos los nodos se encuentran en el anexo B.

4.2.1.2. Escenario SSP1 2.6 (2020 – 2039)

En el escenario actual, la demanda total de agua es de 931.811 m³/día con un déficit de 54.084 m³/día. Bajo el escenario de cambio climático SSP1 (2020-2039), el déficit se incrementa a 122.469 m³/día.

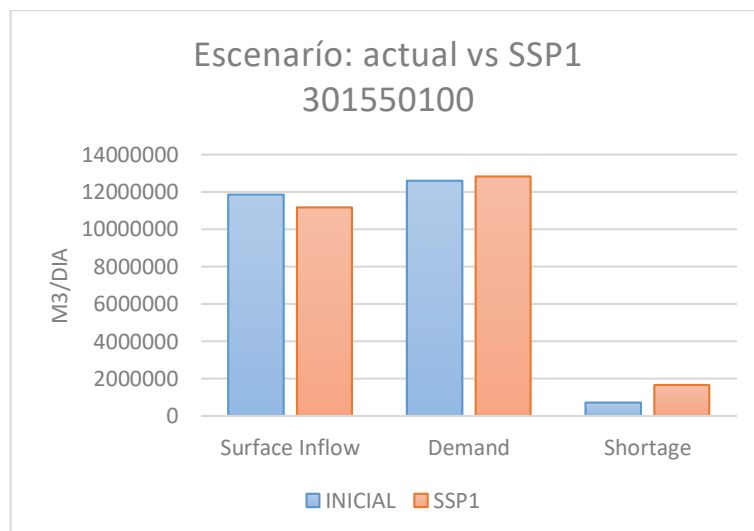
Ilustración 21 déficit de escenario actual vs SSP1



Fuente: elaboración propia

El análisis muestra que, bajo el escenario SSP1, el déficit se incrementa significativamente, alcanzando un 126.4% más que en el escenario actual. Este resultado subraya la importancia de implementar medidas adicionales de gestión del agua y adaptación al cambio climático para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico a largo plazo.

Gráfica 6 déficit de escenario actual vs SSP1

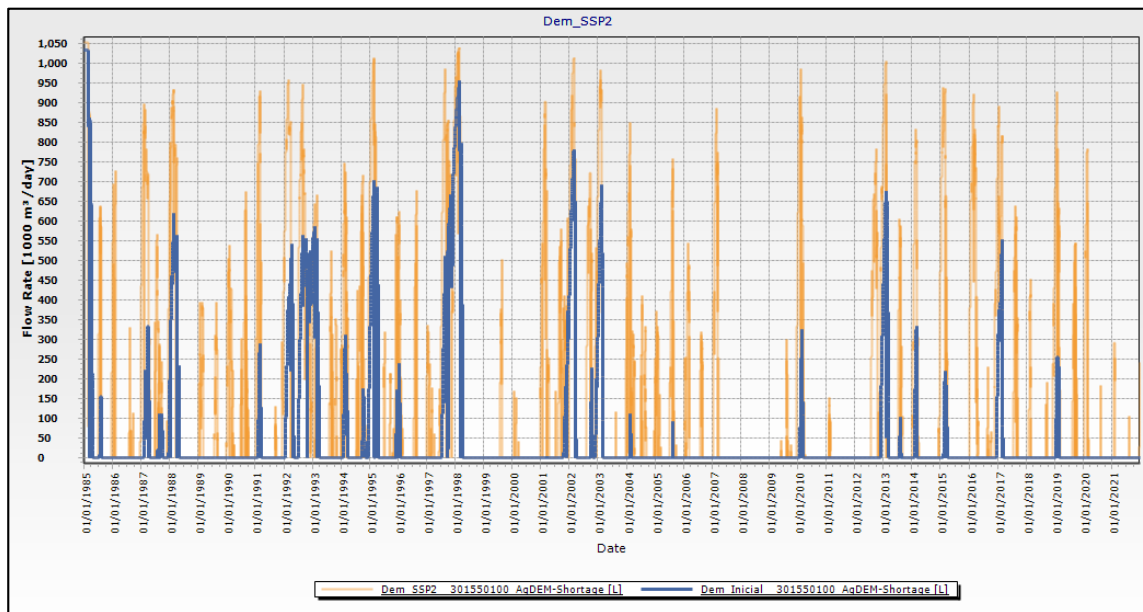


Fuente: elaboración propia

4.2.1.3. Escenario SSP2 4.5 (2020 – 2039)

En el escenario actual, la demanda total de agua es de 931.811 m³/día con un déficit de 54.084 m³/día. Bajo el escenario de cambio climático SSP2 (2020-2039), el déficit se incrementa significativamente a 146.358 m³/día.

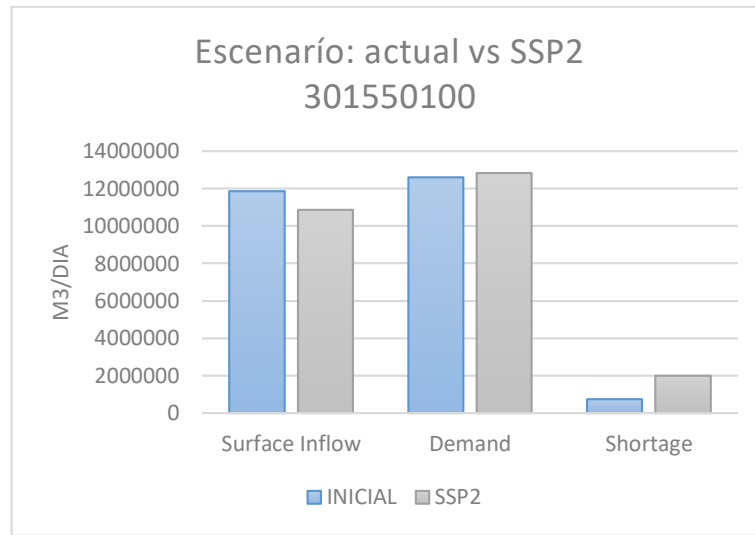
Ilustración 22 déficit de escenario actual vs SSP2



Fuente: elaboración propia

El análisis muestra que, bajo el escenario SSP2, el déficit se incrementa drásticamente, alcanzando un 170.6% más que en el escenario actual.

Gráfica 7 déficit de escenario actual vs SSP2

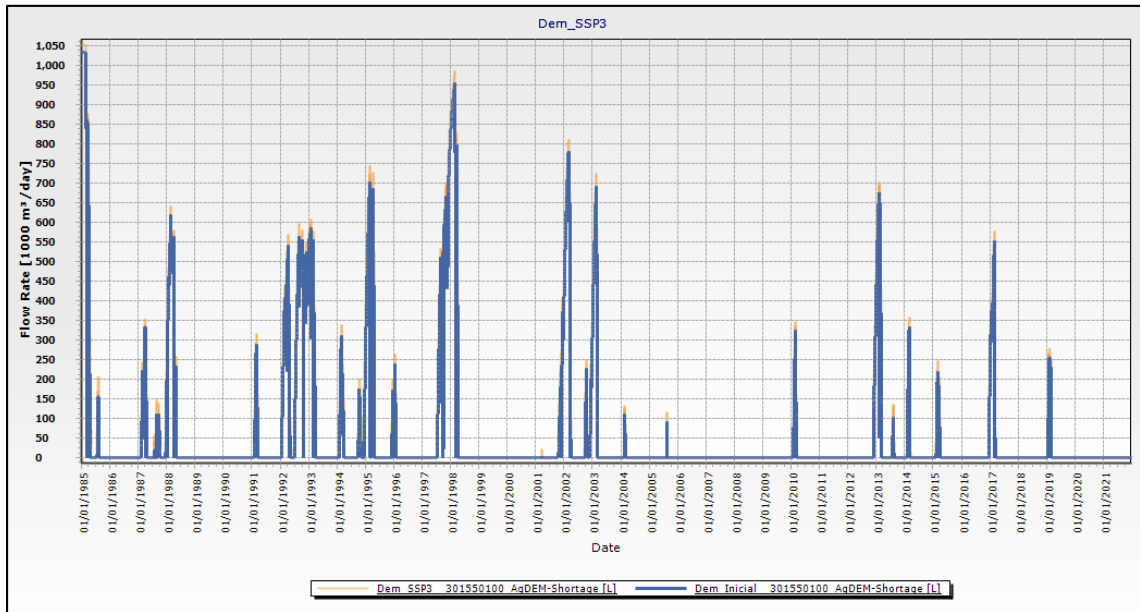


Fuente: elaboración propia

4.2.1.4. Escenario SSP3 7.0 (2020 – 2039)

En el escenario actual, la demanda total de agua es de 931.811 m³/día con un déficit de 54.084 m³/día. Bajo el escenario de cambio climático SSP3 (2020-2039), el déficit se incrementa a 58.885 m³/día.

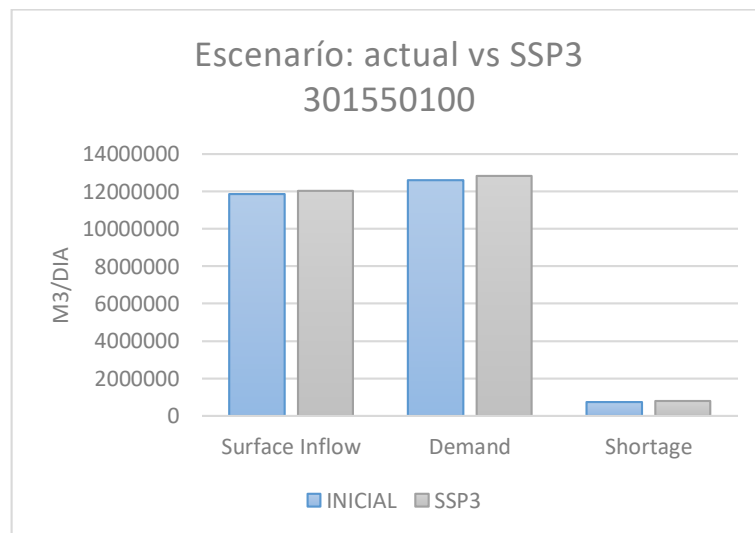
Ilustración 23 déficit de escenario actual vs SSP3



Fuente: elaboración propia

El análisis muestra que, bajo el escenario SSP3, el déficit también incrementa, alcanzando un 8.88% más que en el escenario actual. Este resultado subraya la necesidad de implementar medidas de gestión del agua y adaptación al cambio climático para asegurar la sostenibilidad del recurso hídrico a largo plazo, especialmente en un contexto de políticas fragmentadas y bajas inversiones en sostenibilidad.

Gráfica 8 déficit de escenario actual vs SSP2



Fuente: elaboración propia

4.3. PLANTEAMIENTO Y EVALUACIÓN DE CONSTRUCCIÓN DE EMBALSE PARA LA DISMINUCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA INSATISFECHA

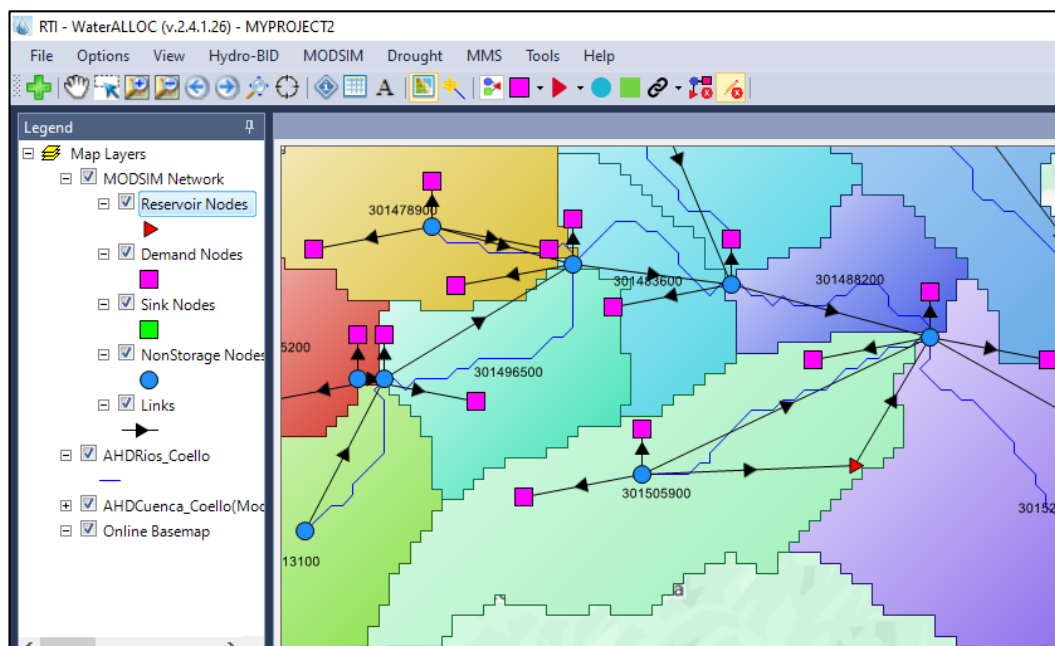
Para el proyecto, se modela un embalse simple que se operará para mantener el almacenamiento objetivo máximo.

- El embalse tiene un almacenamiento máximo de 40 millones de metros cúbicos.
- Un almacenamiento mínimo de 10 millones de metros cúbicos.
- Un almacenamiento inicial de 20 millones de metros cúbicos.

Bajo esta configuración, el embalse será operado para minimizar la escasez aguas abajo y almacenar el agua hasta que se cumpla el almacenamiento objetivo.

Para identificar como las deficiencias de agua se han reducido bajo el escenario de Infraestructura, se observan los nodos de demanda (■) y se realiza la comparación de déficits con y sin embalse.

Ilustración 24 Creación nodo de embalse



Fuente: elaboración propia

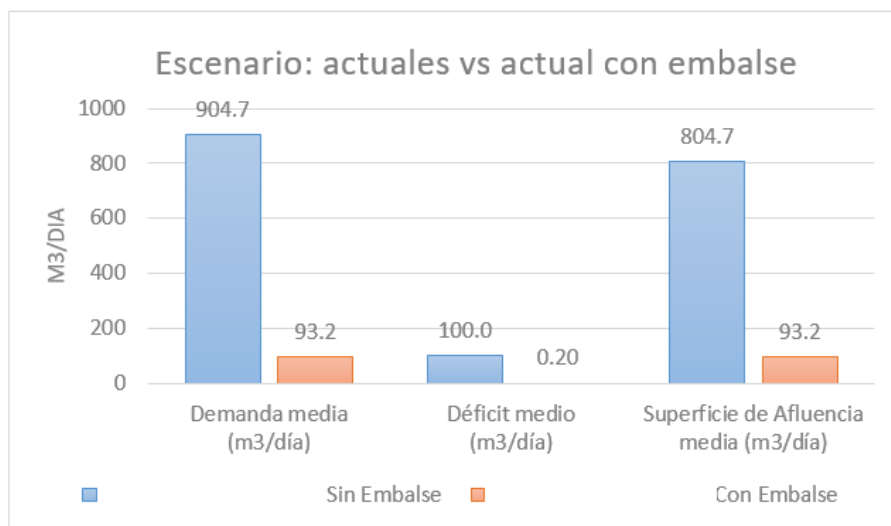
Los resultados obtenidos al estudiar la relación entre la oferta y la demanda en la cuenca del Río Coello, tanto en su estado actual como en una proyección futura bajo la influencia de la construcción de un embalse con capacidad de 40 millones de m³, se presentan a continuación:

Tabla 14 Déficit sin embalse vs con embalse en COMID 301550100

Escenario	Déficit medio (m ³ /día)
Sin Embalse	146.358
Con Embalse	0.2073

Fuente: elaboración propia

Gráfica 9 Relación oferta/demanda agrícola sin embalse vs con embalse en COMID 301550100



Fuente: elaboración propia

La oferta parece disminuir porque parte del agua es almacenada en el embalse, reduciendo el flujo inmediato disponible en el sistema. Sin embargo, esta agua almacenada se libera de manera controlada para satisfacer la demanda en períodos de menor disponibilidad, mejorando la gestión del recurso hídrico.

La implementación del embalse en la cuenca del río Coello resulta en una significativa disminución en la demanda media, el déficit medio y la superficie de afluencia media. La demanda media se reduce en un 89.67%, el déficit medio disminuye en un 99.79%, y la superficie de afluencia media se reduce en un 88.43%. Estos resultados destacan la efectividad del embalse en mejorar la

gestión del recurso hídrico y reducir significativamente los problemas de déficit de agua en la cuenca.

5. IMPACTO SOCIAL Y HUMANISTICO DEL PROYECTO

El proyecto brinda información valiosa a la comunidad que depende de la cuenca, permitiéndoles comprender las condiciones y disponibilidad del agua que impactan en sus actividades económicas y sociales. Esto empodera a la comunidad para reducir el riesgo de verse afectada por eventos hidrológicos extremos como sequías.

En esencia, este estudio se convierte en una herramienta crucial para la toma de decisiones y la implementación de medidas de adaptación al cambio climático. Estas medidas no solo beneficiarán a las autoridades ambientales locales, sino también a la población en general, promoviendo un desarrollo sostenible y resiliente en la región.

Los resultados de esta investigación son de gran importancia para comprender los efectos potenciales del cambio climático en Colombia. Aportan información crucial para incorporar el riesgo climático en la planificación del desarrollo sectorial y territorial, siendo elementos fundamentales para el diseño de medidas de adaptación y mitigación establecidas en el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.

La información sobre los posibles impactos en el recurso hídrico del país es un insumo indispensable para las autoridades nacionales y regionales en el manejo integral del recurso hídrico, especialmente en lo que respecta a la seguridad hídrica, un Objetivo de Desarrollo Sostenible fundamental para América Latina y el Caribe.

6. CONCLUSIONES

En la cuenca del río Coello, para el periodo comprendido entre 2020 - 2039 y bajo los escenarios SSP1 2.6 y SSP2 4.5, se espera que se presente una disminución en el caudal disponible de entre 5.77% y 8.49%. Estas posibles reducciones en los caudales pueden tener implicaciones directas sobre los aspectos económicos y sociales de la zona, lo que combinado con la posible generación de una demanda insatisfecha puede conllevar a que la cuenca entre en un estado de riesgo por desabastecimiento hídrico.

La proyección de la tasa de crecimiento de demanda para el periodo de tiempo 2017 a 2039, llevada a cabo mediante el método de regresión lineal, arrojó como resultado una variación promedio de 1.9%, 0.5% y 2.1% para los puntos de demanda agrícola, industrial y poblacional respectivamente, utilizando como base los registros históricos del Producto Interno Bruto (PIB) anual, obtenidos de datos proporcionados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y el Banco de la República desde el año 2005 hasta el año 2016.

El análisis de la demanda de agua no satisfecha reveló que, para el escenario SSP1 2.6, se espera que el déficit aumente significativamente en un 126.4% comparado con la situación actual. En SSP2 4.5, se espera que el déficit aumente aún más, en un 170.6%. En SSP3 7.0, se espera que el déficit también se incremente, aunque en menor medida (8.88%), indicando que la alta dependencia de combustibles fósiles y la baja inversión en sostenibilidad contribuyen a una gestión ineficiente del agua.

La simulación de un embalse con capacidad de 40 millones de m³ mostró una mejora en la gestión hídrica. El déficit medio disminuyó en un 99.79%. Este resultado destaca la efectividad del embalse en la mitigación de la demanda insatisfecha y mejoran la resiliencia de la cuenca del río Coello frente a escenarios de cambio climático.

Las proyecciones SSP1 y SSP2 alertan sobre una reducción en la oferta hídrica de la cuenca del río Coello, lo que, junto al crecimiento poblacional y la expansión agrícola e industrial, podría generar estrés hídrico por el aumento de la presión sobre el recurso. Ante estos escenarios, las autoridades ambientales y los actores institucionales y gubernamentales deben asumir la responsabilidad de controlar las actividades económicas que utilizan el recurso hídrico en la cuenca, mitigando así el riesgo de desabastecimiento.

Es crucial implementar medidas de gestión del agua que promuevan un uso eficiente y sostenible del recurso, garantizando su disponibilidad para las necesidades presentes y futuras de la región.

7. RECOMENDACIONES

La inclusión de la población de la cuenca del río Coello en los procesos de decisión y análisis del territorio es fundamental. Su participación activa permitirá aumentar sus capacidades en materia de conservación y gobernanza, promoviendo una gestión integral del recurso hídrico en conjunto con las autoridades e instituciones. Al ser los actores directamente involucrados en las dinámicas de la cuenca, su conocimiento y colaboración son esenciales para enfrentar los desafíos y mitigar los impactos negativos que puedan surgir. Esta sinergia entre la población y las entidades competentes conducirá a una gestión más efectiva, sostenible y resiliente del recurso hídrico en beneficio de las comunidades presentes y futuras.

Para futuros trabajos, se recomienda obtener y utilizar datos actualizados y de alta calidad. Esto incluye datos hidrológicos, climatológicos y socioeconómicos de fuentes confiables. La precisión de la modelación depende en gran medida de la calidad de los datos utilizados.

Considerar en mayor medida los factores socioeconómicos que afectan la demanda de agua, como ingresos, niveles educativos, precios del agua, políticas públicas, urbanización. La integración de estos factores puede proporcionar una visión más holística y realista de la gestión del recurso hídrico.

Fomentar la colaboración entre disciplinas como la ingeniería, la economía, la biología y las ciencias sociales. Un enfoque multidisciplinario puede enriquecer el análisis y ofrecer soluciones más integrales y efectivas.

8. REFERENCIAS

Aguilar, J. A. (2020). Caracterización hidrológica en la cuenca del Río Coello (departamento del Tolima, Colombia) con el programa. Centro para el Conocimiento del Paisaje.

BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. (2022). BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. Obtenido de BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO: <https://www.iadb.org/es/agua-y-saneamiento/about-hydro-bid>

Banco Interamericano de Desarrollo, F. M.-W. (s.f.). Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. RTI International, Banco Interamericano de Desarrollo.

Berhe, F. T. (2013). MODSIM-based water allocation modeling of Awash River Basin, Ethiopia. Etiopía: Instituto de Tecnología de Addis Abeba, Universidad de Addis Abeba.

BID. (2022). BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO. Obtenido de BANCO INTERAMERICANO DE DESARROLLO: <https://www.iadb.org/es/agua-y-saneamiento/about-hydro-bid>

BID, F. M.-W. (s.f.). Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. RTI International, Banco Interamericano de Desarrollo.

CARLOS ANDRÉS SABAS R., D. P. (Agosto de 2009). ESTUDIO DE OFERTA Y DEMANDA HÍDRICA EN LA CUENCA DEL RÍO BARBAS. . Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Corporación Automona Regional del Tolima. (2020). El Plan de Manejo y Ordenamiento de la Cuenca del Río Coello. Tolima: CORTOLIMA.

Corporación Autónoma Regional del Tolima. (2019). CARACTERIZACIÓN CLIMATOLÓGICA DE LA SUBZONA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COELLO. Tolima: Cortolima.

Corporación Autonoma Regional del Tolima. (2019). Cortolima. Obtenido de Cortolima: https://www.cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Coello/2fase/CARACTERIZACION_HIDROLOGICA.pdf

- Corporación Autónoma Regional del Tolima. (2019). Cortolima. Obtenido de Cortolima:
https://www.cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Coello/2fase/CARACTERIZACION_HIDROLOGICA.pdf
- Corporación Autónoma Regional del Tolima. (2019). PMCA RIO COELLO - FASE II. DIAGNOSTICO. Tolima: CORTOLIMA.
- Cortolima. (2019). Cortolima. Obtenido de Cortolima:
https://www.cortolima.gov.co/images/POMCA/Rio_Coello/2fase/CARACTERIZACION_HIDROLOGICA.pdf
- CORTOLIMA. (2019). POT. Tolima: CORTOLIMA.
- Efraín Antonio Domínguez Calle, H. R. (2008). RELACIONES DEMANDA-OFFERTA DE AGUA Y EL ÍNDICE DE ESCASEZ DE AGUA COMO HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO COLOMBIANO. Bogotá: Universidad Pontificia Javeriana.
- Haith, A. a. (2000). Curve Number Approach for Estimating Runoff from Turf. USA: J. Environ. Qual.
- Hernández, N. B. (2019). Aplicación de modelos hidrológicos para la estimación de caudales mensuales en la subcuenca del Rio Bigote. Piura, Perú: Universidad de Piura.
- IDEAM - Decreto 1729 de 2002. (2002). IDEAM. Obtenido de IDEAM:
http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Decreto_1729_de_2002.pdf/59ad8528-1179-4fd7-9075-aed67fce2b40
- IDEAM. (2008). Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos renovables en Colombia: Estudio Nacional del Agua, relaciones de demanda de agua y oferta hídrica. Bogotá: IDEAM.
- IDEAM. (2013). IDEAM. Obtenido de IDEAM:
<http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=Un%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20es%20pues,r%20representado%20por%20una%20expresi%C3%B3n%20anal%C3%ADtica.>
- IDEAM. (2013). IDEAM. Obtenido de IDEAM:
<http://www.ideam.gov.co/web/siac/demandaagua#:~:text=La%20demanda%20de%20agua%20estimada,sectores%20econ%C3%B3micos%20y%20la%20poblaci%C3%B3n.>

- INGENIAR Risk Intelligence Ltda. (2021). Estudio de Riesgo por Efectos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación para la Estrategia a Largo Plazo E2050 de Colombia Fase I. Bogotá.
- IPCC. (2007). Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. USA: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jorge Mendoza Cedeño, A. C. (s.f.). Análisis Hidrológico de la Cuenca Roca fuerte para Estimar el Potencial Hídrico de la Zona. Portoviejo, Ecuador: Revista Tecnológica ESPOL.
- Keywan Riahi, D. P. (2015). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. Global Environmental Change.
- Labadie, J. W. (2007). Decision Support System for Adaptive River Basin Management: Application to the Geum River Basin, Korea. . Korea: Water International.
- Maidment, D. R. (1993). HANDBOOK AND HYDROLOGY. Texas: University of Texas at Austin.
- Paola Duque-Sarango, D. M. (2019). Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HECHMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical. Quito: Universidad Politécnica Salesiana-Ecuador.
- Puma, J. C. (2018). "MODELAMIENTO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO APLICADO A LA DELIMITACIÓN DE LA FAJA MARGINAL YUMINA – SOCABAYA (KM 12 + 500.00) Y PROTECCIÓN CONTRA INUNDACIONES EN MÁXIMAS AVENIDAS EN EL DISTRITO DE SOCABAYA, PROVINCIA DE AREQUIPA, DEPARTAMENTO DE AREQUIPA". Arequipa, Perú: Universidad Católica de Santa Maria.
- Rodriguez, M. A. (2020). GOVERNABILITY OR GOVERNANCE IN WATER RESOURCE MANAGEMENT. THE COLOMBIAN CASE. . Bogotá: Revista Republicana.
- RTI INTERNATIONAL. (s.f.). RTI INTERNATIONAL. Obtenido de RTI INTERNATIONAL: <https://www.rti.org/focus-area/wateralloc>
- Rubios, T. O. (2011). Hidráulica de ríos y procesos morfológicos. Bogotá: Ecoe Ediciones.

SPOC HydroBID. (2019). Herramienta para el manejo y planificación del recurso hídrico en América Latina y el Caribe. HydroBID.

Thatch, L. M. (2020). Integrated Hydrologic Modeling to Untangle the Impacts of Water Management During Drought. Ground Water. Universidad de Princeton.

Tolima, C. A. (2019). ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN INICIAL DEL POMCA DE LA SUBZONA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COELLO. Tolima: CORTOLIMA.

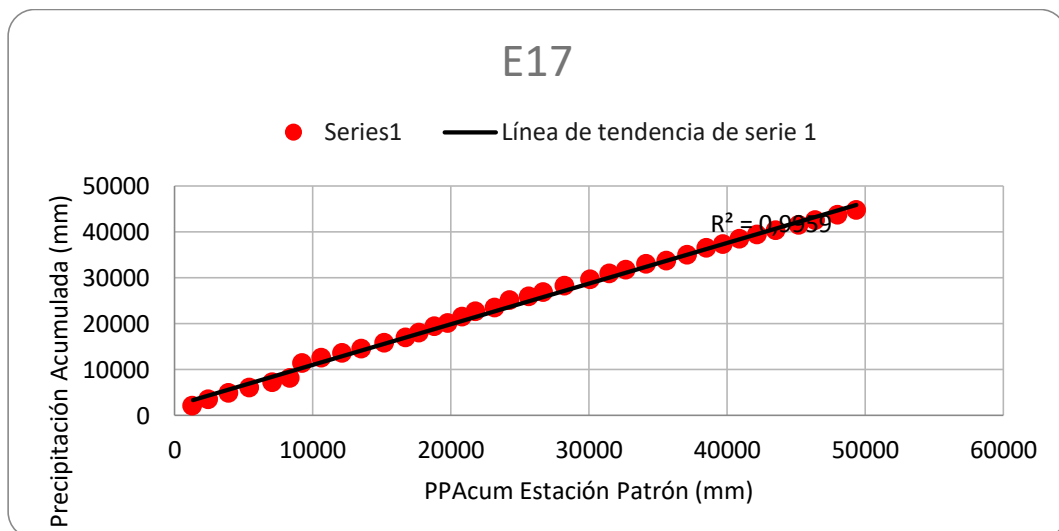
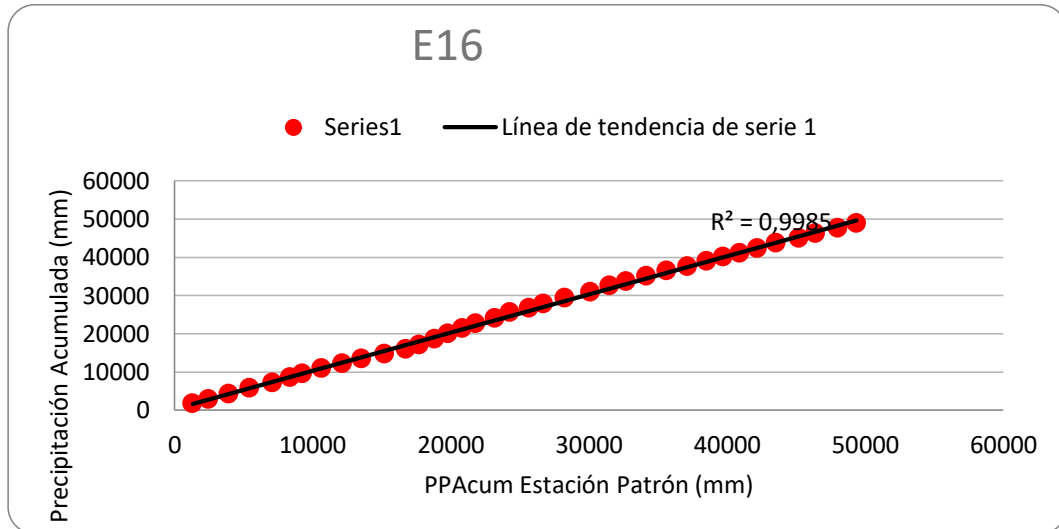
Tolima, C. A. (2019). ANÁLISIS SITUACIONAL INICIAL DE LA SUBZONA HIDROGRÁFICA DEL RÍO COELLO. Tolima: Cortolima.

UNESCO. (1982). Guía metodológica para el balance hídrico de América del Sur. Montevideo, Uruguay: UNESCO.

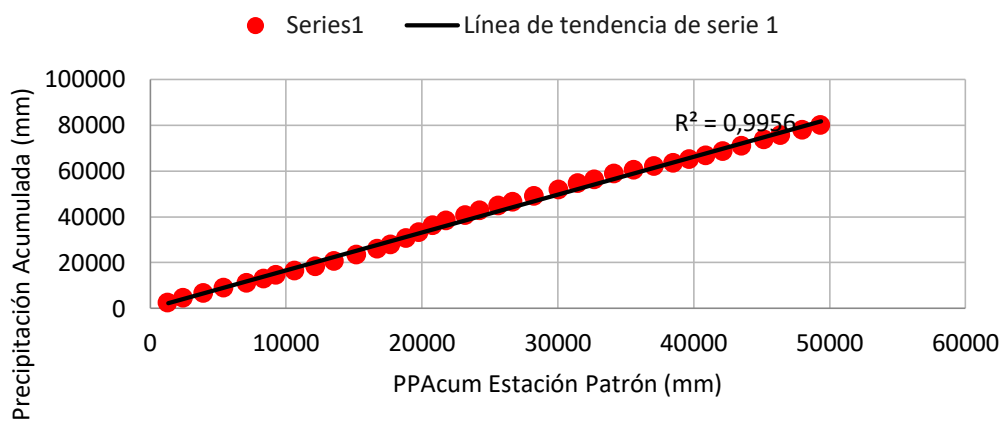
ANEXOS

ANEXO A

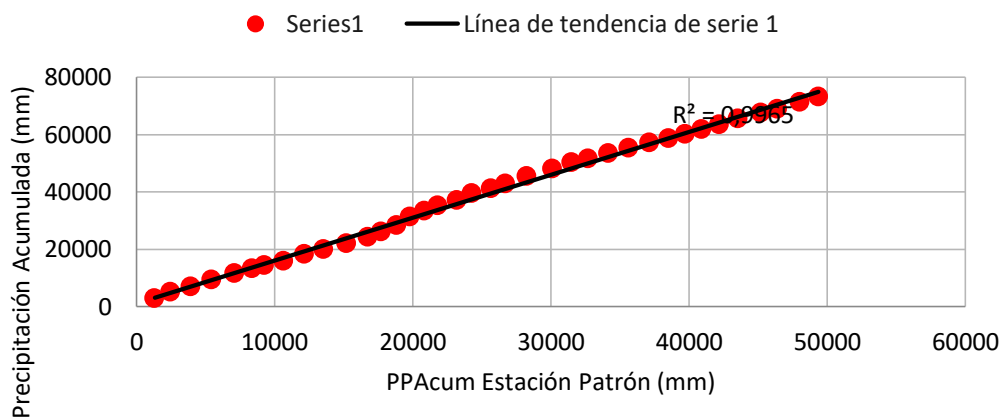
- Curvas de Doble Masa de la estación patrón vs cada estación



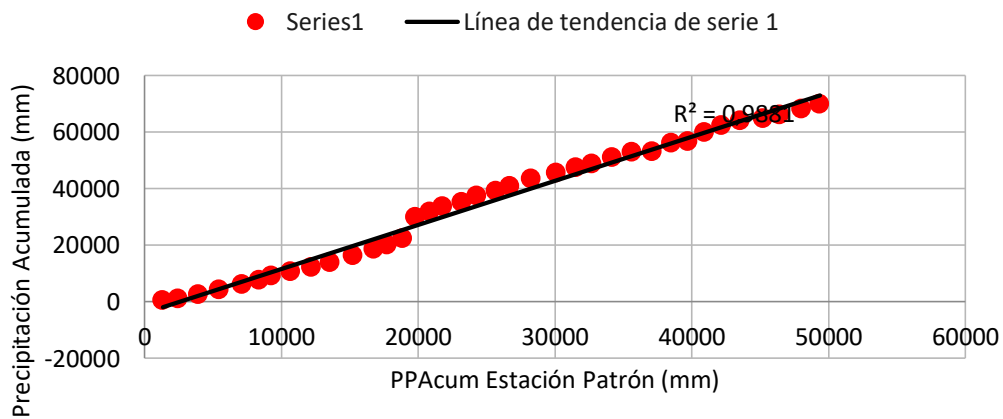
E19



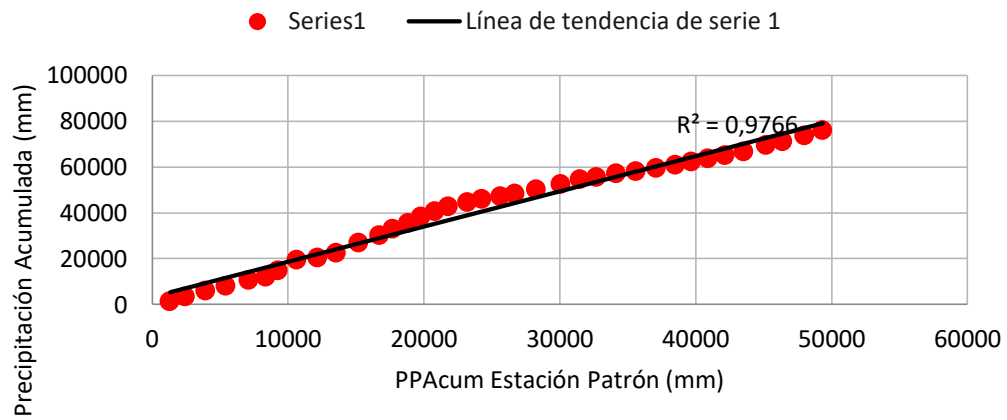
E20



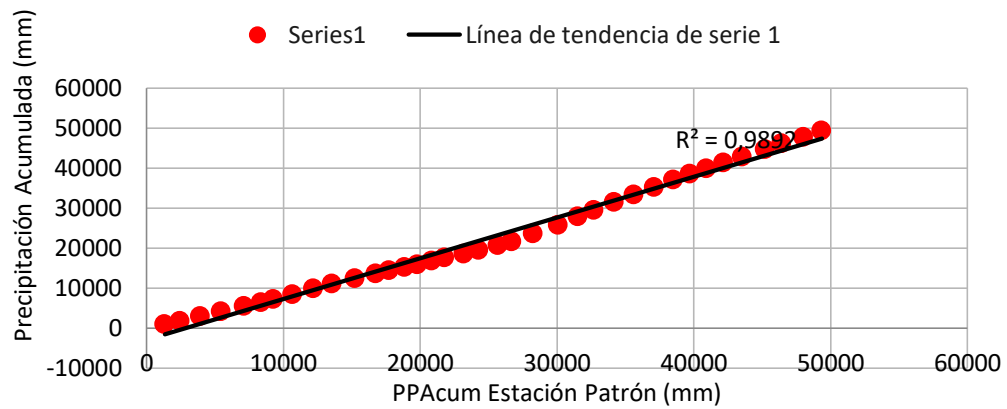
E21



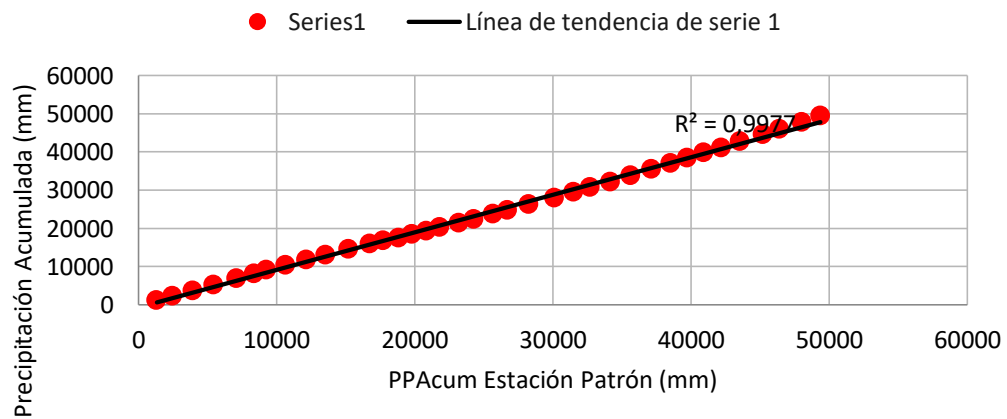
E18



E6 - E15

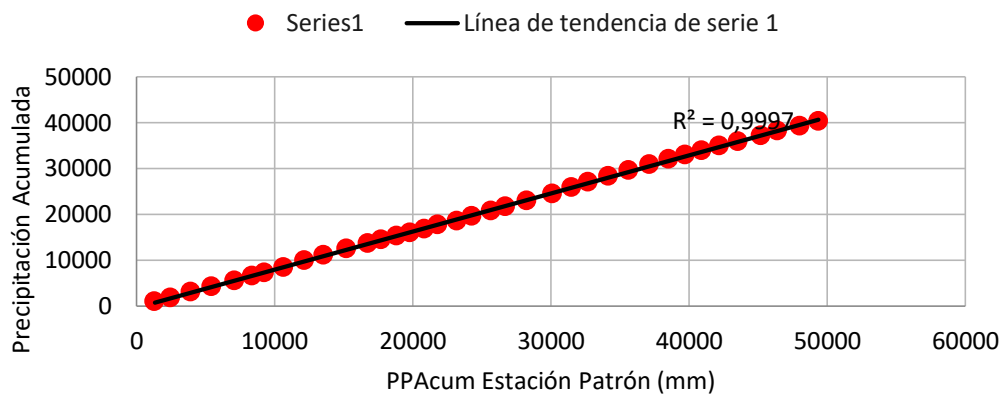


E2 - E5

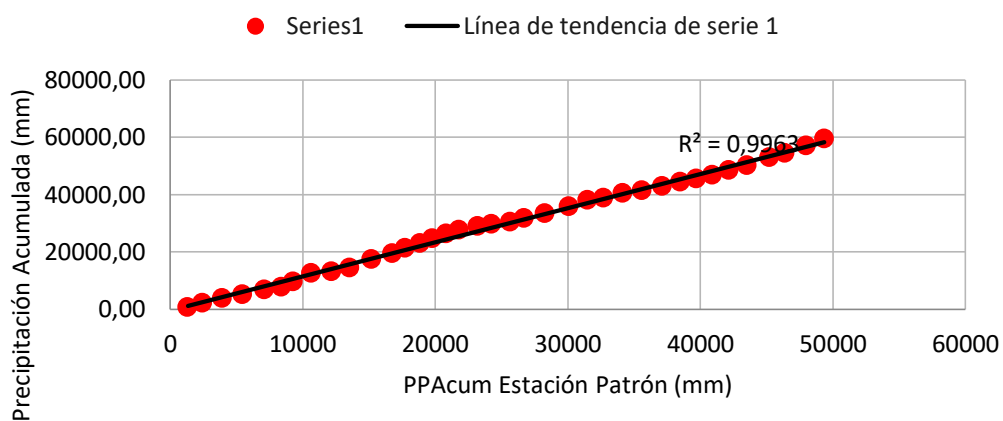


- Curvas de doble masa de las estaciones corregidas

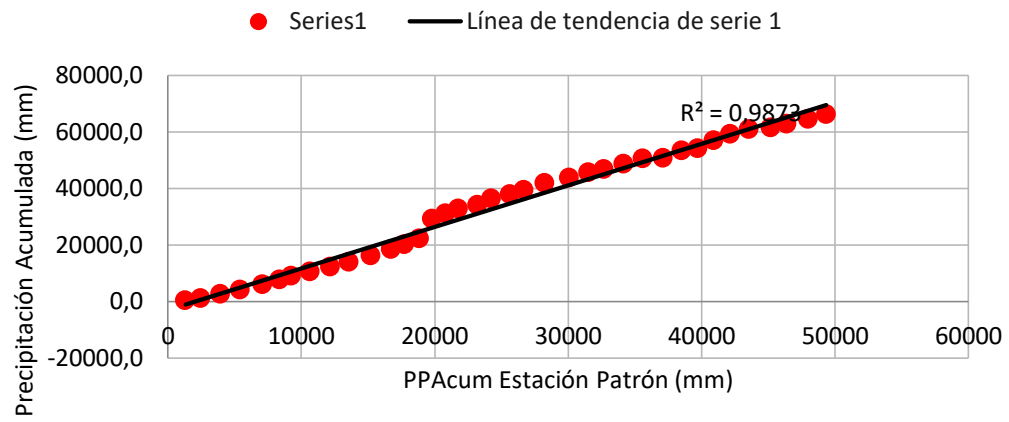
E6 - E15 CORREGIDA



E18 CORREGIDA



E21 CORREGIDA

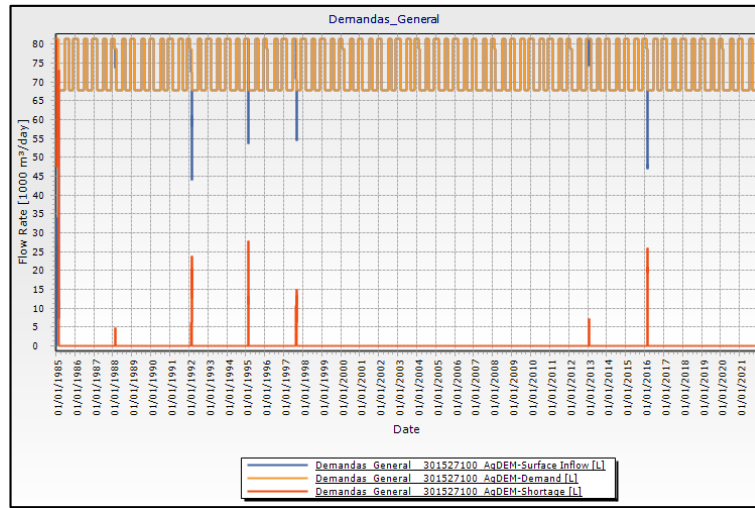


ANEXO B

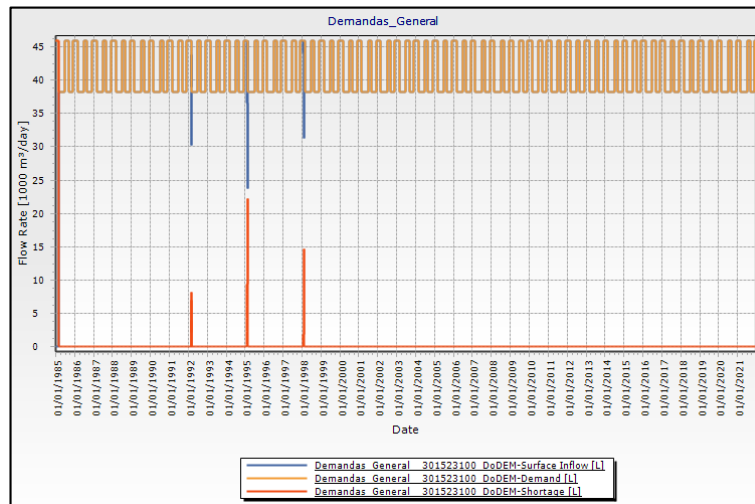
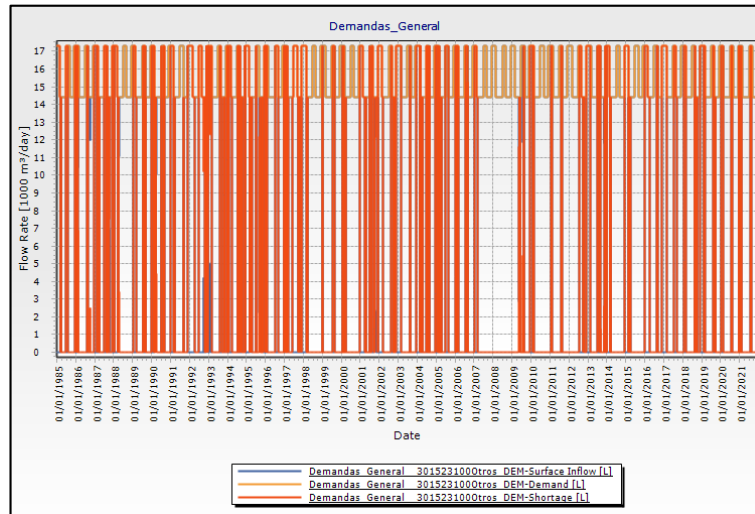
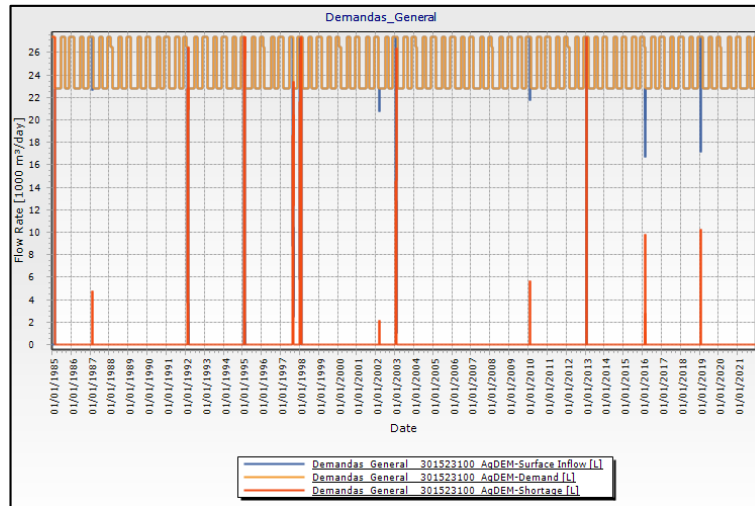
Gráfica 10 Serie temporal de demandas en COMID 301527200



Gráfica 11 Serie temporal de demandas en COMID 301527100



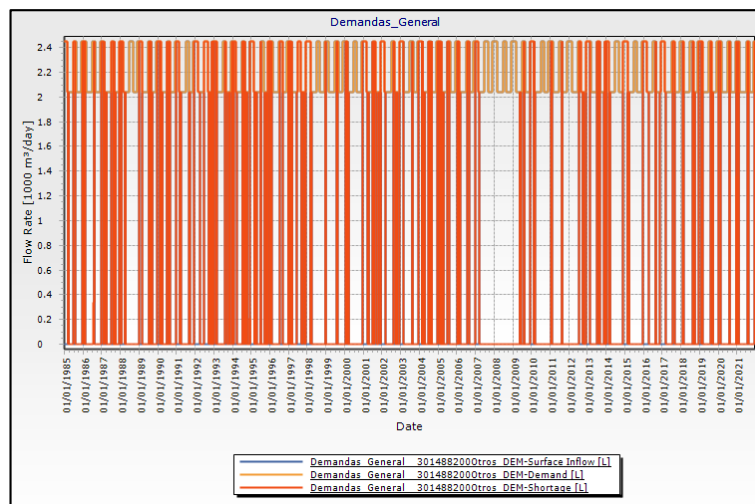
Gráfica 12 Serie temporal de demandas en COMID 301523100



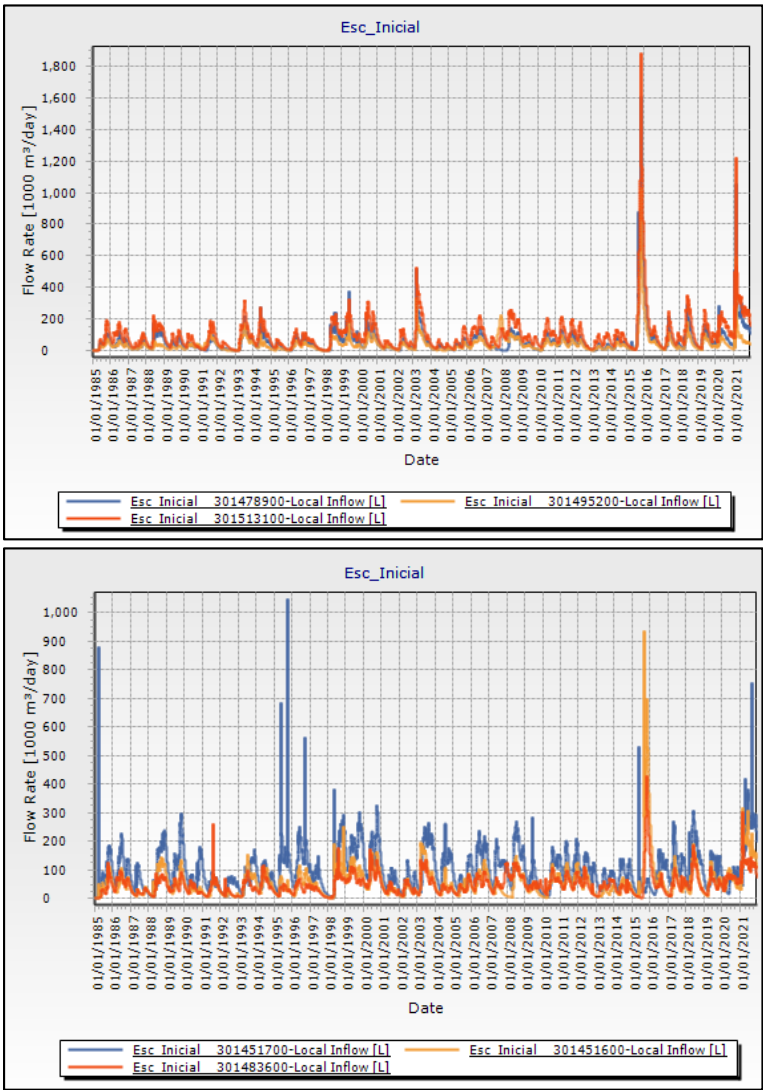
Gráfica 13 Serie temporal de demandas en COMID 301505900

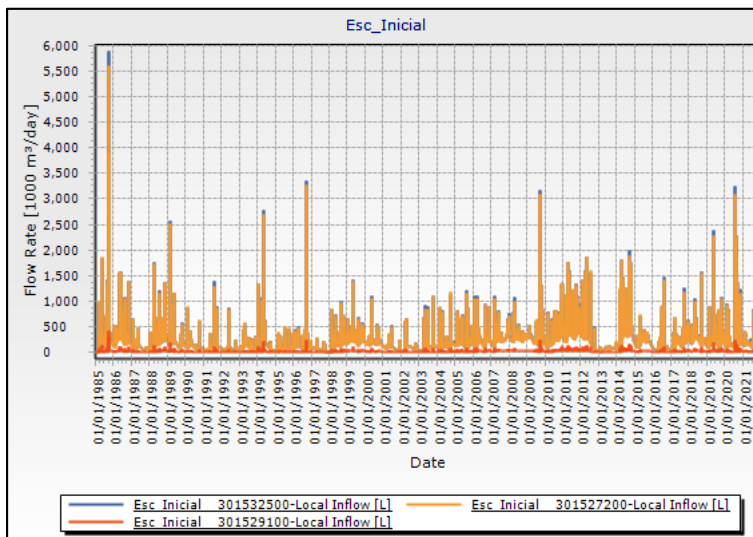
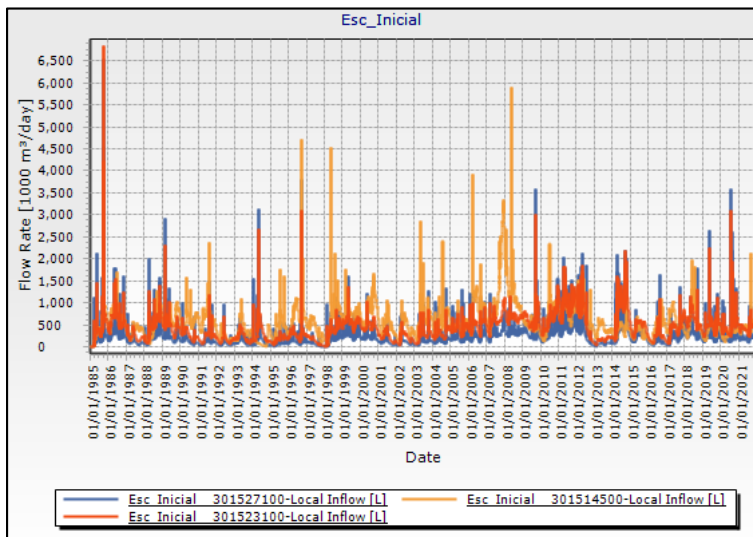
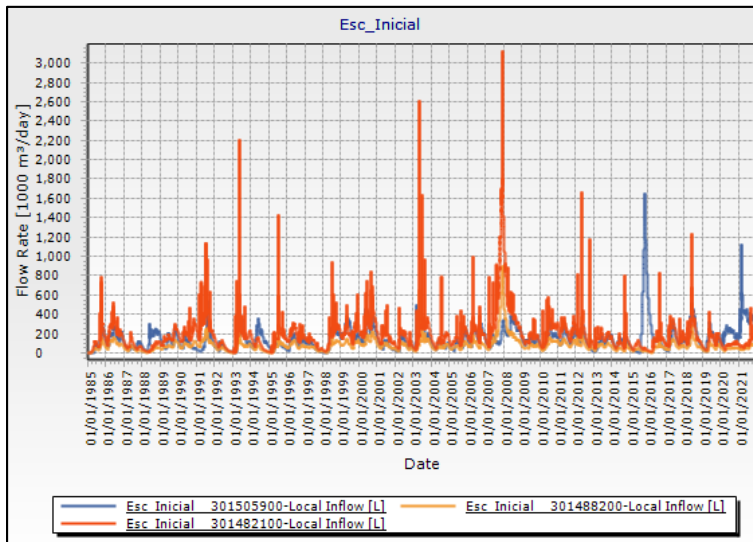


Gráfica 14 Serie temporal de demandas en COMID 301488200

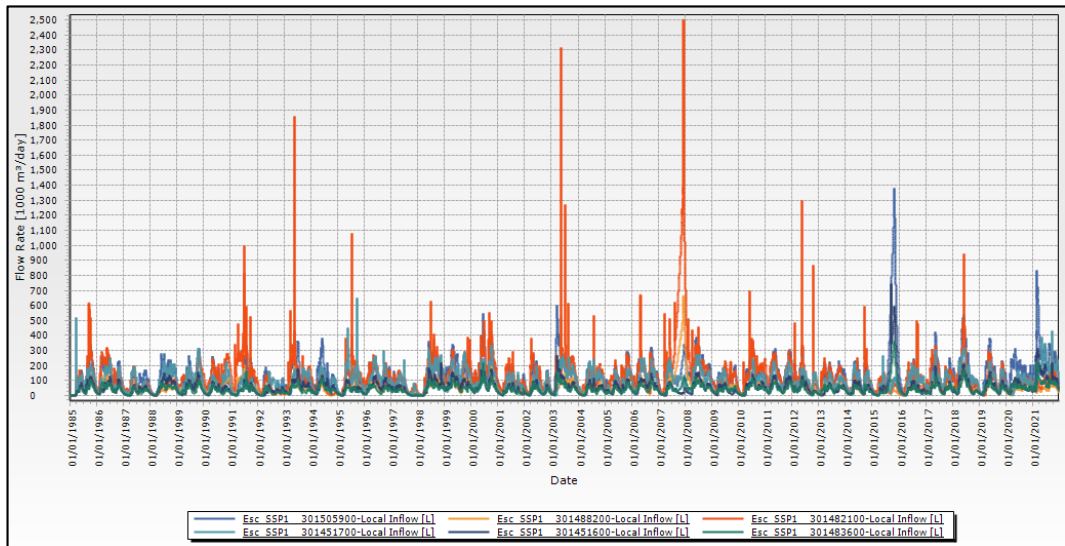
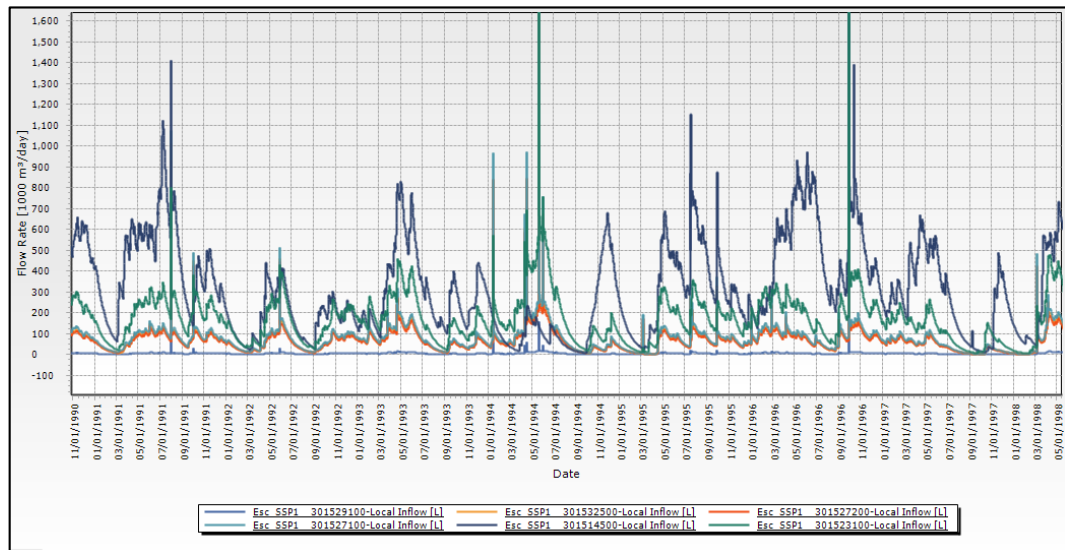


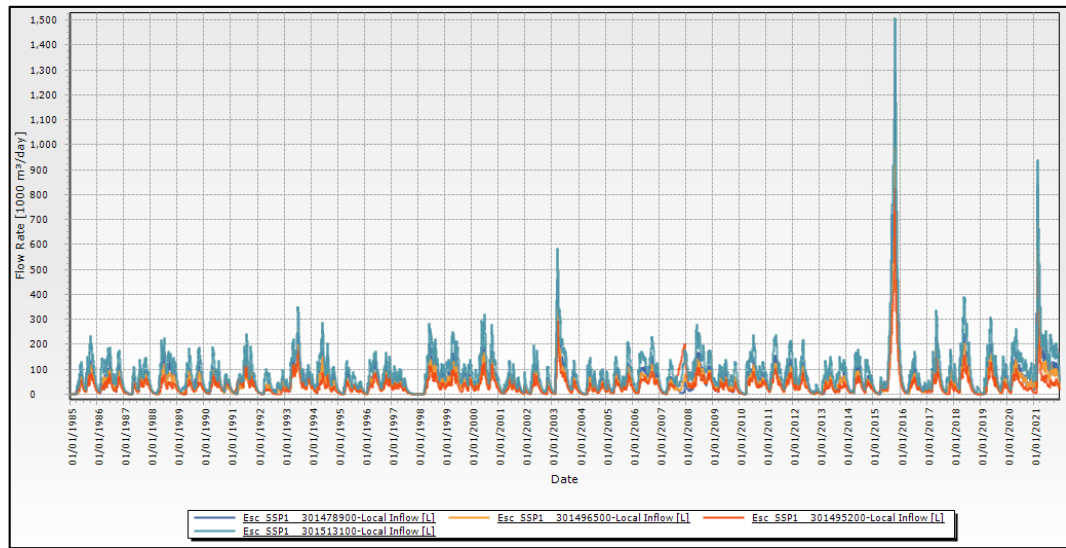
ANEXO C



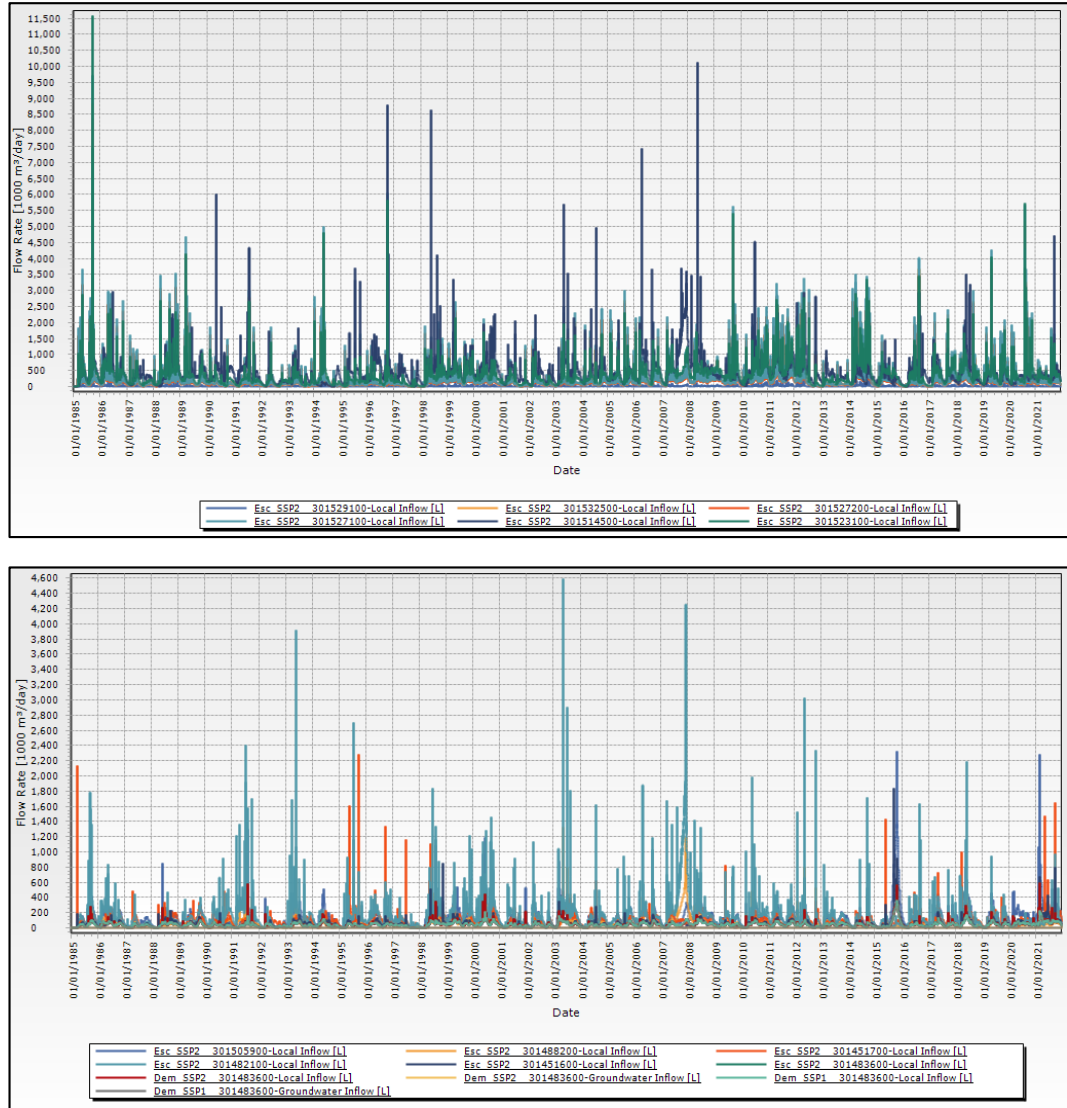


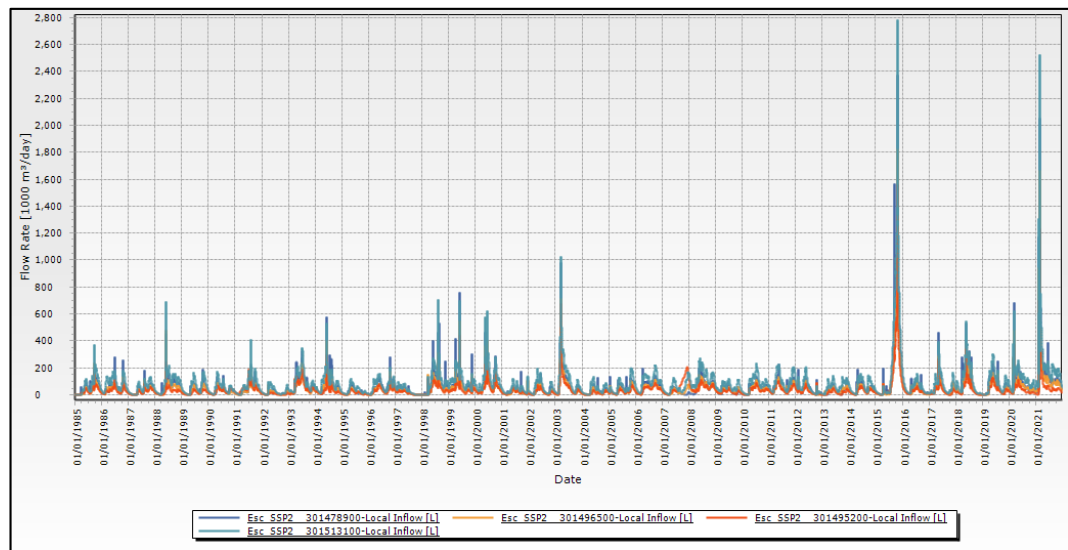
ANEXO D





ANEXO E





ANEXO F

