

**ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS POR SUBCUENCAS PERTENECIENTES  
A LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA, NORTE DE SANTANDER, MEDIANTE LA  
HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO HYDRO-BID.**

**Autor**

**DELCY DANIELA CAPACO DAZA**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
**FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, AMBIENTAL Y QUÍMICA.**  
**INGENIERÍA AMBIENTAL**  
**PAMPLONA, DICIEMBRE 2020**

**ESTIMACIÓN DE CAUDALES MEDIOS POR SUBCUENCAS PERTENECIENTES  
A LA CUENCA DEL RÍO PAMPLONITA, NORTE DE SANTANDER, MEDIANTE LA  
HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO HYDRO-BID.**

**Autor**

**DELCY DANIELA CAPACO DAZA**

**Director CORPONOR**

**JOSÉ ANTONIO GARCÍA NEGRÓN**

**SUBDIRECTOR CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS HÍDRICOS**

**Codirector CORPONOR**

**MARTIN EMILIO SEPÚLVEDA CONTRERAS**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**Codirector**

**FIDEL ANTONIO CARVAJAL SUAREZ**

**INGENIERO AMBIENTAL**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL, AMBIENTAL Y QUÍMICA.**

**INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PAMPLONA, DICIEMBRE 2020**

## **Tabla de contenido**

Introducción .....	13
2. Objetivos .....	15
2.1 Objetivo general .....	15
2.2 Objetivos específicos .....	15
3. Descripción y planteamiento del problema .....	16
4. Justificación.....	17
5. Marco referencial .....	18
5.1 Antecedentes .....	18
5.3 MARCO LEGAL .....	21
5.4 Marco conceptual .....	24
5.5 Marco contextual.....	27
6. Hydro-BID .....	30
6.1 Funcionamiento de Hydro-BID.....	31
6.2 Herramienta de interpolación climática de Hydro-BID .....	34
6.3 Calibración del modelo .....	34
7. Metodología .....	37
7.1 Fase I: Alistamiento de insumos .....	37
7.2 Fase II: Ajuste de base de datos .....	38
7.3 Fase III: Obtención de información de entrada para programa Hydro-BID. ....	40
7.4 Fase 4: Calibración y validación del modelo .....	40
7.5 Fase 5: Obtención de caudales medios.....	41
8. Resultados .....	42

8.1 Fase I: Alistamiento de insumos .....	42
8.2 Fase II: Ajuste de base de datos .....	43
8.3 Fase III: Obtención de información de entrada para programa Hydro-BID .....	48
8.4 Fase IV: Calibración y validación del modelo .....	49
8.5 Fase 5: Obtención de caudales medios.....	66
9. Discusión de resultados.....	68
9.1 Sobre el ajuste de base de datos hidrometeorológicos .....	68
9.2 Sobre la obtención de información de entrada para programa Hydro-BID. ....	68
9.3 Sobre la calibración y validación del modelo .....	69
9.5 Sobre obtención de caudales medios.....	71
10. Conclusiones .....	73
11. Recomendación .....	75
12. Bibliografía .....	76
13. Anexos.....	82
A: Curvas de doble masa precipitación.....	82
B: Curvas de doble masa temperatura.....	90

### **Lista de tablas**

Tabla 1. Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos.	33
Tabla 2. Variables de Calibración y rangos recomendados.	35
Tabla 3. Métricas de desempeño Hydro-BID.	36
Tabla 4. Características de estaciones climáticas e hidrológicas.	42
Tabla 5. Características de las subcuencas.	49
Tabla 6. Parámetros iniciales y finales para la calibración de la estación La Don Juana.	50
Tabla 7. Métricas de desempeño inicial y final estación la Don Juana.	50
Tabla 8. Estadísticos obtenidos en el proceso de validación estación la Don Juana.	54
Tabla 9. Parámetros iniciales y finales de calibración estación Aguas Claras	58
Tabla 10. Métricas de desempeño inicial y final estación Aguas Claras.	58
Tabla 11. Métricas de desempeño en el proceso de validación estación Aguas Claras.	62
Tabla 12. Caudal e indicador de aporte de caudal por área.	66

### **Lista de graficas**

Grafica 1. Curva doble masa precipitación estación [16010020]. .....	44
Grafica 2. Modelo polinómico para el ajuste de la base de datos Agua Clara .....	46
Grafica 3. Serie ajustada implementando la función polinómica. ....	46
Grafica 4. Modelo polinómico para el ajuste de la base de datos La Donjuana .....	47
Grafica 5. Serie ajustada implementando la función polinómica. ....	47
Grafica 6. Hidrograma de promedios de los resultados medios por día, antes y después de calibración .....	51
Grafica 7. Curva de duración de flujo, antes y después de calibración. ....	52
Grafica 8. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, antes y después de calibración .....	53
Grafica 9. Hidrograma de resultados medios por día, para la validación de la estación Don Juana .....	55
Grafica 10. Curva de duración de flujo, para la validación de la estación La Don Juana. ....	56
Grafica 11. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, para la validación de la estación La Don Juana. ....	57
Grafica 12. Hidrograma de promedios de los resultados medios por día, antes y después de calibración estación Aguas Claras. ....	59
Grafica 13. Curva de duración de flujo, antes y después de calibración estación Aguas Claras..	60
Grafica 14. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, antes y después de calibración estación Aguas Claras.....	61
Grafica 15. Hidrograma de resultados medios por día, para la validación de la estación Aguas Claras. ....	63
Grafica 16. Curva de duración de flujo, para la validación de la estación Aguas Claras .....	64

Grafica 17. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, para la validación de la estación Aguas

Claros ..... 65

Grafica 18. Comportamiento de aporte de caudal por área. .... 67

**Lista de ilustraciones**

Ilustración 1. Esquema del funcionamiento de Hydro-BID..... 31

Ilustración 2. Diseño de fases metodológicas ..... 37

### **Lista de mapas**

Mapa 1. Ubicación geográfica de la cuenca Rio Pamplonita. ....	27
Mapa 2. Ubicación de las estaciones climáticas e hidrológicas.....	43
Mapa 3. Ubicación de subcuencas identificadas por COMID.....	48
Mapa 4. Indicador de aporte de caudal por área. ....	67
Mapa 5. Análisis parte baja de la cuenca Rio Pamplonita.....	69

**Lista de ecuaciones**

Ecuación 1. Media aritmética .....	38
Ecuación 2. Interpolación lineal .....	39
Ecuación 3. Modelo lineal polinómico de grado 8 .....	45
Ecuación 4. Modelo polinómico de grado 6 .....	46

## **Resumen**

Este proyecto plantea la obtención de caudales medios por subcuencas del Río Pamplonita bajo escenarios de simulación hidrológica en condiciones normales, implementando la herramienta de modelación hidrológica Hydro-BID. Inicialmente para la obtención de insumos de entrada del modelo, se descargó de la plataforma dhime del IDEAM las variables de temperatura, precipitación y caudal, de estaciones climáticas e hidrológicas instaladas en la cuenca de estudio. Los datos climáticos se ajustaron usando los métodos de media aritmética y proporciones normales, siendo validados mediante la curva doble masa y el parámetro de R2, en cuanto a los datos de caudal se ajustaron utilizando el programa Matlab online, aplicando el modelo polinómico de grado 8 para los datos de la estación de 16017010, y modelo polinómico de grado 6 para la estación 16017020, verificando su eficiencia y confiabilidad mediante el parámetro de R2. Para la delimitación y generación de COMID y centroides de la cuenca se utilizó el programa QGIS y la base de datos AHD. La calibración del modelo se llevó a cabo utilizando la base de datos de caudales obtenidos de la plataforma del IDEAM donde por medio de una serie de iteraciones se ajustaron los parámetros hidrológicos del modelo hasta la obtención de estadísticos de desempeño adecuados, los cuales posteriormente fueron validados, obteniendo como resultados índices de desempeño óptimos especialmente para los datos mensuales. Finalmente se obtuvieron los caudales medios y el índice de aporte caudal por área, para cada una de las subcuencas.

## Summary

This project proposes the obtaining of average flows by sub-basins of the Pamplonita River under hydrological simulation scenarios under normal conditions, implementing the Hydro-BID hydrological modeling tool. Initially, to obtain input inputs for the model, the variables of temperature, precipitation and flow, from climatic and hydrological stations installed in the study basin, were downloaded from IDEAM's dhime platform. The climatic data were adjusted using the arithmetic mean methods and normal proportions, being validated by means of the double mass curve and the R2 parameter, as for the flow data they were adjusted using the online Matlab program, applying the grade 8 polynomial model. for the data of the station 16017010, and polynomial model of degree 6 for the station 16017020, verifying its efficiency and reliability through the parameter of R2. For the delimitation and generation of COMID and centroids of the basin, the QGIS program and the AHD database were used. The calibration of the model was carried out using the database of flows obtained from the IDEAM platform where, through a series of iterations, the hydrological parameters of the model were adjusted until obtaining adequate performance statistics, which were subsequently validated, obtaining optimal performance indexes as results, especially for monthly data. Finally, the mean flows and the flow rate per area were obtained for each of the sub-basins.

## **Introducción**

Según la UNESCO ( 2019), “el uso del agua ha venido aumentando en 1% anual en todo el mundo desde los años 80 del siglo pasado, impulsado por una combinación de aumento de la población, desarrollo socioeconómico y cambio en los modelos de consumo. La demanda mundial de agua se espera que siga aumentando a un ritmo parecido hasta 2050, lo que representa un incremento del 20 al 30% por encima del nivel actual de uso del agua, debido principalmente al aumento de la demanda en los sectores industrial y doméstico”. En contexto, es fundamental el manejo integral de los recursos hídricos, siendo el impulso necesario para innovar nuevas estrategias de estudio para su conservación.

En este objetivo el Banco Interamericano de Desarrollo BID ofrece “el sistema de simulación Hydro-BID que incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad (volúmenes y caudales) de agua dulce a escalas regional, de cuencas y de subcuencas” (Nalesso & Coli, 2017).

Este estudio pretende aportar información sobre la disponibilidad de caudales medios por subcuenca del Rio Pamplonita implementando el sistema de modelación de recurso hídrico Hydro-BID, bajo escenarios en condiciones normales de la cuenca. Esta información será de gran utilidad para la corporación autónoma regional del norte de Santander CORPONOR “para la planificación y la gestión integral de los recursos hídricos de esta importante cuenca” (Escrura et al., 2016).

Para contextualizar, durante el desarrollo del trabajo inicialmente se plantea los objetivos alcanzados, seguidamente de la descripción del problema y la justificación. En el quinto capítulo se formula el marco referencial donde se identifica y exponen los conceptos que sustentan la

argumentación de la hipótesis del proyecto. En el sexto capítulo se describe el programa Hydro-BID, sus funciones y parámetros. En el séptimo capítulo, se realiza la descripción de la metodología implementada para la realización del modelo hidrológico, y finalmente en el capítulo octavo y noveno se muestran los resultados obtenidos y el análisis correspondiente a estos.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo general**

Estimar caudales medios por subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Pamplonita, Norte De Santander, mediante la herramienta de simulación del recurso hídrico HYDRO-BID.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Descargar los datos hidrometeorológicos de temperatura, precipitación y caudal del período 2010-2019, almacenados en la plataforma Web DHIME y registros de mediciones de las estaciones del IDEAM instaladas en la cuenca del río Pamplonita.
- Validar estadísticamente los datos hidrometeorológicos de temperatura, precipitación y caudal del período 2010-2019, descargados de la plataforma Web DHIME del IDEAM y registros de mediciones de las estaciones del IDEAM instaladas en la cuenca del río Pamplonita.
- Ajustar la base de datos hidrometeorológicos de temperatura, precipitación y caudal validada teniendo en cuenta los requerimientos de insumos para correr el modelo Hydro-BID.
- Simular los caudales medios de las subcuencas pertenecientes a la cuenca del río Pamplonita, empleando la base de datos ajustada, calibrando y ejecutando el modelo hidrológico Hydro-BID.

### **3. Descripción y planteamiento del problema**

Según Pizarro et al., (2005), “las relaciones hidrológicas que ocurren en una cuenca pueden ser estudiadas a través de modelos que simplifiquen y representen los distintos fenómenos que suceden al interior de ésta”. En sentido a lo anterior, el modelo Hydro-BID cuenta con un sistema integrado para la modelación de caudales, impactos y modificaciones a nivel de cuenca y subcuenca, esto con la finalidad de evaluar las modificaciones del recurso hídrico derivados por cambios naturales o antrópicos, con el objetivo de mejorar el proceso de toma de decisiones y planificación del recurso hídrico.

Según CORPONOR, (2010) “el recurso hídrico a lo largo de la cuenca del Río Pamplonita se utiliza principalmente en la demanda doméstica, agrícola, pecuaria e industrial de los municipios de Bochalema, Chinácota, Cúcuta, Herran, Los patios, Pamplona, Pamplonita, Puerto Santander, Ragonvalia y Villa del Rosario en un consumo total de 130.299.294,74 m<sup>3</sup> al año”. Además según Ibáñez Asensio et al., (2009) cuenta con “un mal manejo y uso de los recursos naturales, la cuenca presenta problemas de erosión, uso inadecuado del suelo, conflictos por uso del agua y contaminación del recurso”. Entorno a lo anterior la corporación Autónoma Regional CORPONOR y su jurisdicción de cambio climático y recurso hídrico considera de gran importancia realizar la simulación de caudales medios a nivel de subcuenca implementando el modelo Hydro-BID en la cuenca del río Pamplonita Norte de Santander, con la finalidad de proveer información precisa y completa sobre el comportamiento hídrico de cada subcuenca, datos fundamentales para la planeación y manejo del recurso hídrico.

#### **4. Justificación**

Para Moreda et al., (2014) “los recursos hídricos pueden verse afectados negativamente por el cambio climático y otros eventos que alteren la disponibilidad de agua, como el crecimiento demográfico y cambios en el uso de los suelos asociados con la urbanización, crecimiento industrial y agrícola”. Evaluar la disponibilidad de agua es importante para garantizar que la oferta de agua cumpla con las necesidades demandantes por ecosistemas y poblaciones dependientes de este recurso.

En consecuencia, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), desarrolla y aplica “un conjunto integrado de herramientas de simulación conocidas como Hydro-BID, el sistema de simulación Hydro-BID incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad de volúmenes y caudales de agua dulce a escalas regional, de cuencas y de subcuencas”(Moreda et al., 2016).

La presente investigación tiene como objetivo principal implementar la herramienta Hydro-BID, para conocer la disponibilidad de agua por subcuenca del río Pamplonita, el cual tiene una gran importancia a nivel del departamento del Norte de Santander, constituye un área estratégica para el desarrollo departamental, con gran influencia comercial, agrícolas y pecuarias lo cual se traduce en impacto ecológico negativo.

Se desarrolla la investigación, con el fin de proveer información para la gestión integral del recurso hídrico y la planificación de los diferentes eventos que pueden llevarse a cabo, a su vez facilitar la toma de decisiones a la corporación autónoma regional del norte de Santander CORPONOR y su subdirección de cambio climático y recurso hídrico, y de esta forma garantizar un uso sostenible del agua.

## **5. Marco referencial**

### **5.1 Antecedentes**

Desde hace algunas décadas las organizaciones se han propuesto a mejorar los usos del agua de una manera eficiente, a partir de ello también nuevas estrategias para mejorar la toma de decisiones al momento de hacer un uso sostenible del agua, en consecuencia, se han desarrollado una serie de metodologías capaces de ayudar en el análisis y comportamiento de las cuencas hidrográficas como lo son los softwares que permiten modelar y ampliar los estudios en relación al recurso hídrico. Con esta necesidad, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha proporcionado el sistema Hidro-BID para el análisis hidrológico y climático a nivel de cuenca y subcuenca, por tal razón es fundamental hacer alusión a algunos casos que han sido estudiados y correspondientemente analizados.

Por su parte Moreda et al., (2014) “demuestra las capacidades de la herramienta de modelaje de recursos hídricos Hydro-BID en una aplicación para el Rio Bermejo Superior en el Noroeste de Argentina. Este informe describe los pasos seguidos por un equipo multidisciplinario del proyecto, trabajando en conjunto con partes interesadas y consultores locales, para evaluar el impacto del cambio climático en una región que ya sufre de escasez de agua y para evaluar las opciones posibles de adaptación”. El modelo Hydro-BID se aplicó con éxito, a pesar de importantes faltas en los datos locales de Jujuy, mediante el uso de una combinación de bases de datos internacionales y locales. El análisis de bases de datos locales proporciono un contexto importante y una comprensión hidroclimática que permitieron usar bases de datos internacionales de manera correcta. El análisis de las faltas en los datos locales también destacó

la necesidad de hacer seguimiento más extensivo e intensivo de la demanda de agua, el clima, el caudal y otros parámetros de entrada, para su uso en trabajos futuros.

Nalesso (2020), en el departamento de Santander, Colombia, “la Red de Territorios Sostenibles Agua, Biodiversidad y Clima (Red ABC) utilizo la plataforma Hydro-BID para gestionar de manera integral sus recursos hídricos presentes y futuros en el río Lebrija, el cual transporta un volumen de agua de casi 5 mil millones de metros cúbicos de agua por año. Es una cuenca con un alto nivel de biodiversidad, y de vital importancia para casi dos millones de personas. Esto permitió fortalecer las instituciones, comunidades regionales y locales de la cuenca, en la mejora de la gestión del agua, puesto que la base de la gobernanza territorial por cuenca, se basa en la generación y apropiación del conocimiento para la toma de decisiones de los sectores privados y los públicos; basados en datos hidrológicos organizados y analizados que se convierten en conocimiento como es el caso de la modelación hidrológica de la cuenca, que permitió conocer la oferta en los diferentes escenarios de variabilidad climática y de cambio climático”.

Otro de los estudios realizado por Escurra et al., (2016) donde aplicando este modelo en Perú “como parte de un esfuerzo continuo para desarrollar las habilidades de modelado de cuencas del personal profesional que trabaja para la Autoridad Nacional del Agua (ANA) y para demostrar las capacidades del sistema Hydro-BID relevantes para los desafíos de gestión de recursos hídricos. Donde se desarrolló el modelo Hydro-BID para la cuenca Chancay-Lambayeque, con el soporte técnico de RTI. El personal de RTI luego utilizó el modelo para demostrar el uso de un nuevo módulo Hydro-BID para simular la carga de sedimentos”. Obteniendo como resultado que embalse de Tinajones en la provincia de Chiclayo y dentro de la cuenca Chancay-Lambayeque es

el cuarto embalse más grande del Perú, con una capacidad máxima utilizable de 319 millones de metros cúbicos.

Moreda et al., (2017), “analiza el efecto potencial de los cambios en la precipitación y temperatura promedio en el caudal, especialmente porque puede afectar proyectos de infraestructura de inversión hídrica propuestos en la cuenca del río Chalpi, Ecuador. EPMAPS (Empresa de Agua y Saneamiento Público Metropolitano de Quito está planificando los Proyectos Ríos Orientales un importante programa de infraestructura para satisfacer las futuras necesidades de agua de Quito. EPMAPS está utilizando los resultados de este esfuerzo para evaluar si es probable que los cambios en el clima reduzcan significativamente los flujos futuros”.

A nivel local Díaz & Suárez, (2019) “presentan los resultados obtenidos a partir de una modelación hidrológica realizada en la cuenca del río Pamplonita, Colombia; con el fin de determinar los impactos potenciales del cambio climático sobre el régimen hidrológico de la zona, implementando la herramienta de modelación para América Latina y el Caribe Hydro-BID, donde se calibró el modelo a partir de estaciones de caudales, además se realizó una regionalización de parámetros para modelar los caudales futuros. Se integraron las variables de precipitación, temperatura y caudal evaluadas para las condiciones actuales y para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 8.5. Las series climatológicas futuras, de 2015 a 2100, se generaron por medio de la metodología de reducción de escala basada en el método estadístico de la teoría del caos a partir de los datos obtenidos del modelo de circulación global CCMS4, ya que este modelo según la evaluación realizada fue el que mejor se ajustó a la zona de estudio. Adicionalmente se obtuvieron los porcentajes de variación de caudal de cada uno de los escenarios respecto a las condiciones actuales, dando como resultado que se presentará una

posible disminución en el caudal entre el 6.10% y 10.8% para los diferentes escenarios.

Finalmente se realizó el indicador SQI que refleja la duración y severidad de la sequía para los años 2015 a 2100. Y luego se plantean algunas medidas para prevenir y mitigar los impactos producidos por el cambio climático en la cuenca en cuanto a la sequía hidrológica”.

### **5.3 MARCO LEGAL**

Existen en Colombia una serie de leyes, decretos y normas expedidas para garantizar la protección, conservación y manejo sostenible de los recursos hídricos, entre ellas las mencionadas a continuación.

“**Decreto 2811 de 1974.** Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1972).

“**Artículo 312°.** Reglamentado por el Decreto Nacional 1729 de 2002. Entiéndese por cuenca u hoyo hidrográfica el área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red hidrográfica natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor, que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar. Artículo 317°.- Para la estructuración de un plan de ordenación y manejo se deberá consultar a los usuarios de los recursos de la cuenca y a las entidades, públicas y privadas, que desarrollan actividades en la región”(Gestor Normativo, 2002).

“**Ley 1151 de 2007.** Declarando de interés público las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua los acueductos municipales y distritales, por lo cual los departamentos y municipios dedicarán un porcentaje no inferior al 1% de sus

ingresos corrientes para la adquisición y mantenimiento de dichas zonas o para financiar esquemas de pago por servicios ambientales”(Gestor Normativo, 2002).

**“Decreto 953 de 2013.** Por el cual se reglamenta el artículo 111 de la Ley 99 de 1993 modificado por el artículo 210 de la Ley 1450 de 2011, con el fin de promover la conservación y recuperación de las áreas de importancia estratégica para la conservación de recursos hídricos que surten de agua a los acueductos municipales, distritales y regionales, mediante la adquisición y mantenimiento de dichas áreas y la financiación de los esquemas de pago por servicios ambientales, de la misma forma garantizar la inversión oportuna y efectiva de los recursos y una adecuada articulación entre las entidades territoriales y autoridades ambientales con ese mismo fin, se requiere establecer las directrices para la adquisición y mantenimiento de las áreas antes mencionadas y para la financiación de los esquemas de pago por servicios ambientales”(Minambiente, 2013).

**“Decreto 1090 de 2018.** Reglamenta la Ley 373 de 1997 en lo relacionado con el Programa para el Uso Eficiente y Ahorro de Agua y aplica a las Autoridades Ambientales, a los usuarios que soliciten una concesión de aguas y a las entidades territoriales responsables de implementar proyectos o lineamientos dirigidos al uso eficiente y ahorro del agua”(Minambiente, 2018).

**“Decreto 1640 de 2012.** Por el cual se reglamenta los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, y se dictan otras disposiciones. Dispone como ámbito de aplicación que estas disposiciones son de carácter permanente y rigen en todo el Territorio Nacional aplicando a todas las personas naturales y jurídicas, en especial a las entidades del Estado con competencias al interior de la estructura definida para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos del país. Señala la

competencia de las autoridades ambientales para hacer evaluaciones regionales del agua. Señala la competencia y procedimiento al ministerio del medio ambiente para adelantar planes estratégicos en las áreas hidrográficas o macrocuencas, a la vez que determina las funciones de los consejos ambientales regionales de macrocuencas y los lineamientos del programa nacional de monitoreo del recurso hídrico y el plan de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas. Por último, establece el plan nacional de microcuencas y de acuíferos”(Minambiente, 2012).

“**Decreto 1323 de 2007.** Por el cual se crea el Sistema de Información del Recurso Hídrico - SIRH”(Minambiente, 2007).

“**Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015.** Compila las disposiciones reglamentarias del Sector Ambiente. Se determinan las instancias para la coordinación de la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos, entre ellas el Consejo Ambiental Regional de la Macrocuena para cada una de las áreas Hidrográficas o Macrocuencas del País y la Comisión Conjunta en las Subzonas Hidrográficas”(Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

“**Ley 99 de 1993.** Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente como organismo rector de la gestión del medio ambiente y de los recursos naturales renovables y se establecen lineamientos para fortalecer el Sistema Nacional Ambiental y fijar las pautas generales para el ordenamiento y manejo de cuencas hidrográficas y demás áreas de manejo especial, al igual que establece la competencia a las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible en la ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas ubicadas en el área de su jurisdicción”(Congreso de la República de Colombia, 1993).

#### **5.4 Marco conceptual**

La hidrología se define según Bateman (2007), como “una rama de las ciencias de la Tierra que estudia el agua, su ocurrencia, distribución, circulación, y propiedades físicas, químicas y mecánicas en los océanos, atmósfera y superficie terrestre. Esto incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares”.

Define Sabater & Elozegi (2009), “el régimen hidrológico como la variabilidad estacional habitual de un río, encontrando ríos perennes que nunca se secan, ríos temporales que se secan todos los años, y ríos efímeros los cuales llevan agua muy de vez en cuando”.

El área de una cuenca hidrográfica Ibáñez Asensio et al., (2009), la define como el “espacio delimitado por la curva del perímetro. Esta línea se traza normalmente mediante un mapa topográfico en función las curvas de nivel representadas”.

Las cuencas hidrográficas para Faustino & Jiménez (2000), “son espacio de terreno limitado por las partes más altas de las montaña, laderas y colinas, en él se desarrolla un sistema de drenaje superficial que concreta sus aguas en un río principal”.

El ciclo hidrológico lo describen Córdova & Rodríguez (2015), como “el continuo movimiento del agua a través de la atmósfera y la tierra, en un espacio llamado hidrosfera, que se extiende desde unos quince kilómetros, dentro de la atmósfera (en la troposfera), hasta más o menos un kilómetro de profundidad en la litosfera o corteza terrestre”.

Las subcuencas Según Ordoñez (2011), las definen como un “conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente”, por otra parte, según Green Facts, (2020), esta serie de subcuencas y cuencas son las encargadas de transportar el “agua

dulce natural con una baja concentración de sales, o generalmente considerada adecuada, previo tratamiento, para producir agua potable”.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos para Minambiente (2020), “busca orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recursos hídricos, a través de una conciliación entre el desarrollo económico y social y la protección de los ecosistemas. Este concepto ha evolucionado pasando por diversas etapas de desarrollo”.

Modelos hidrológicos según IDEAM (2014), “es una herramienta de gran importancia para el estudio de avenidas que se ha extendido por todo el mundo, fundamentalmente en países desarrollados. En la actualidad, con el empleo de estos modelos, se realiza el análisis y la prevención de las inundaciones; además, es posible manejar hipótesis suficientemente realistas o previsibles que ofrezcan un cierto grado de confianza para la toma de decisiones, ya sea en la ordenación del territorio en torno a los ríos o para exigir criterios de diseño de obras e infraestructuras capaces de soportar y funcionar adecuadamente en situaciones de emergencia”.

El sistema Hydro-BID para Moreda et al., (2014), la define como “un sistema integrado y cuantitativo para simular hidrología y gestión de recursos hídricos”. Cuenta con “una Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) para la región de América Latina y el Caribe, representando más de 230,000 cuencas y sus correspondientes segmentos fluviales” (BID, 2020).

COMID se define según Rineer & Bruhn (2014), como el número “identificador común de una característica o relación AHD”.

Cuenca alta para Ibáñez Asensio et al., (2009), “corresponde generalmente a las áreas montañosas o cabeceras de los cerros, limitadas en su parte superior por las divisorias de aguas”.

De la misma manera la cuenca media para Ibáñez Asensio et al., (2009), es “donde se juntan las aguas recogidas en las partes altas y en donde el río principal mantiene un cauce definido”.

Cuenca baja o zonas transicionales Ibáñez Asensio et al., (2009), “Donde el río desemboca a ríos mayores o a zonas bajas tales como estuarios y humedales”.

Temperatura para Rodríguez et al., (2012), es una “magnitud física que mide la energía térmica de una sustancia, están asociadas las sensaciones de caliente y frío”.

Caudal lo define la empresa Fibras y Normas de Colombia (2004), como “la cantidad de fluido que circula a través de una sección de un ducto, ya sea tubería, cañería, oleoducto, río, canal, por unidad de tiempo. Generalmente, el caudal se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área determinada en una unidad de tiempo específica”.

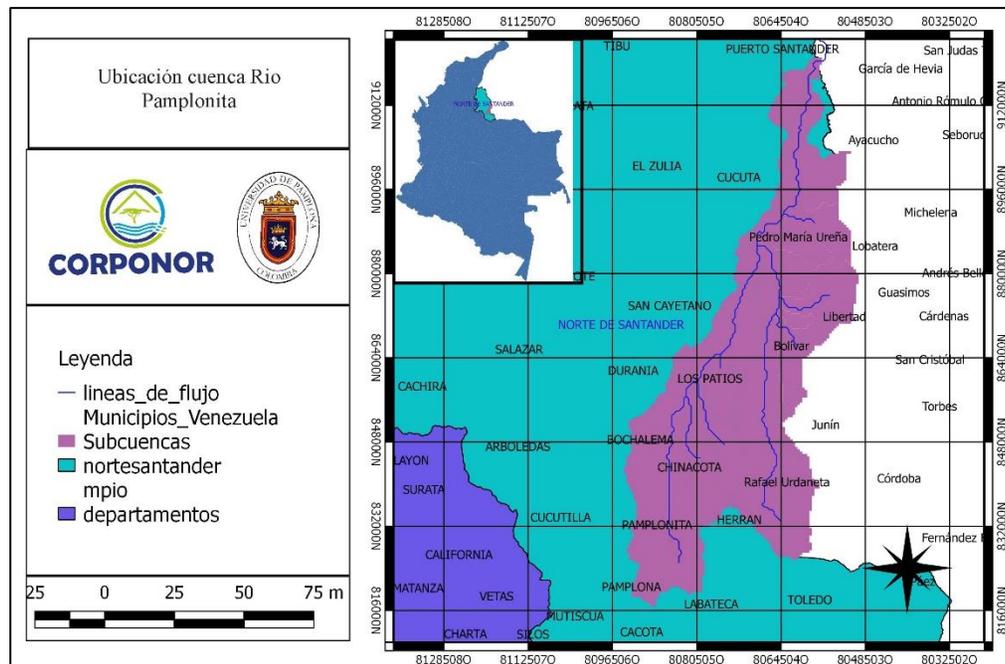
La precipitación según el IDEAM (2012), “corresponde a la cantidad de agua que llega al suelo en forma de lluvia, rocío, granizo o nieve, contabilizada durante i períodos, en la estación j durante el tiempo t”.

La Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) según Rineer & Bruhn (2014), “es una base de datos espacialmente explícita basada en un sistema de información geográfica (GIS) de aguas superficiales”. Cuenta con “una estructura de cuencas de polígono anidado con un esquema único de identificación de cuencas; una estructura derivada correspondiente para los segmentos fluviales contenidos dentro de las cuencas; atributos descriptivos que crean un sistema interconectado de segmentos fluviales aguas arriba y aguas abajo y entre cuencas; una estructura de base de datos para poblar y adjuntar atributos adicionales específicos al modelo”. “Contiene datos de sus elevaciones máximas y mínimas, longitud, inclinación promedio y otras características geométricas”(Moreda et al., 2014). Cada cuenca “puede ser relacionada a datos

basados en el área relevante a los modelos a ser desarrollados, por ejemplo, área, capa vegetal y uso de suelos, inclinación promedio, tipos de suelos predominantes y datos climáticos” (Moreda et al., 2014).

### 5.5 Marco contextual

Según la caja de Herramientas de Hidrología para POMCAS (2010), la “cuenca del río Pamplonita se ubica en el departamento de Norte de Santander - Colombia, y en el departamento de Táchira en Venezuela. La cuenca hace parte de la región hidrográfica del caribe entre las coordenadas geográficas 7°8'43" a 8°20'44" de Latitud Norte y 72°2'6" a 72°43'29" de Longitud Oeste. El río Pamplonita tiene aproximadamente una longitud de 136 km naciendo en el cerro de Altogrande, en el páramo de Fontibón, en las cercanías de Pamplona a (3648 msnm) hasta su desembocadura en el río Zulia (42 msnm)”.



**Mapa 1.** Ubicación geográfica de la cuenca Río Pamplonita.

**Fuente:** propia

“La cuenca limita al sur con la cuenca del río Chitagá y municipios de Pamplona, Toledo, Cácuta y Labateca, al Norte y Occidente con la cuenca del Río Zulia y municipios de Mutiscua, Pamplona, Cucutilla, Bochalema, Arboledas, Durania, San Cayetano y Cúcuta y al Oriente con Territorio Venezolano con los Municipios de Rafael Urdaneta, Bolívar, Pedro María Ureña, Libertad y Ayacucho” (CORPONOR, 2010).

Según Sánchez, (2020) “Desciende por el valle del Cariongo, sale por el boquerón de Pamplona y sigue hacia el noroeste, hasta la altura de Chinácota, recibe las aguas de la quebrada La Honda y sigue bajando hasta el valle de Cúcuta, y al salir se junta con el Táchira, hasta desembocar en el caudaloso río Zulia”, que los arroja al lago de Maracaibo.

“Su cuenca se ubica sobre la cordillera oriental, extendiéndose por el suroeste de Norte de Santander, desde Pamplona hasta Puerto Santander”. “La mayor parte de su recorrido es casi horizontal y gradualmente se va desestabilizando es una de las notándose la presencia de fenómenos y procesos de erosión y acumulación en las partes altas y bajas, la mayor parte de su recorrido es casi horizontal y gradualmente se va desestabilizando es una de las notándose la presencia de fenómenos y procesos de erosión y acumulación en las partes altas y bajas” (Sánchez, 2020).

La “cuenca del río Pamplonita está conformada por 12 municipios de los cuales cinco están en su totalidad dentro de la cuenca y los otros siete municipios comparten su territorio con las cuencas de los ríos Zulia o Chitagá según sea el caso, los municipios que están en su totalidad dentro de la cuenca son: Villa del Rosario, Los Patios, Chinácota, Ragonvalia, Herrán. Y los municipios que no se encuentran en su totalidad son: Cúcuta, Bochalema, Pamplonita, Pamplona, Toledo, San Cayetano y Labateca” (CORPONOR, 2014).

“Afluentes del río Pamplonita margen derecha: las quebradas Monte dentro, Los Negros, Los Cerezos, Zipachá, Tanauca, Ulagá, El Gabro, El Ganso, Santa Helena, Cucalina, La Teja, De Piedra, La Palmita, Matagira, La Chorrera, Iscalá, Honda, Cascarena, Villa Felisa, Ciénaga, Juana Paula, Don Pedra, Faustiner, Europea, Rodea, Aguasucia. Los Rios Táchira y río Viejo y los caños Las Brujas, caño Caghicana y caño Guardo”(Gelvis & Noreña, 2015).

“Afluentes del río Pamplonita margen izquierda: las quebradas: Navarro, San Antonio, La Palma, Hojanca, La Laguna, Batagá, Galindo, Santa Lucía, Las Colonias, El Laurel, Chiracoca, Montuosa, El Masato, Quebraditas, Aguanegra, Zorzana, El Ojito, Jaguala, Viajaguala, Tío José, El Magro, Aguadas, La Rinconada, Periquera, Voladora, La Sarrera, La Cuguera, Guaimaraca, Aguaclarera. Los caños La Tigra, Negro, El Oso, Chipo”(Gelvis & Noreña, 2015).

## **6. Hydro-BID**

“El Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ofrece asistencia financiera y técnica para proyectos de infraestructura en agua y saneamiento, irrigación, control de inundaciones, transporte y energía”(Escrura et al., 2016). “BID patrocina trabajos para desarrollar y aplicar un conjunto integrado de herramientas de simulación de cuencas conocidas como Hydro-BID. El Sistema de simulación Hydro-BID incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad (volúmenes y caudales) de agua dulce a escalas regional, de cuencas y de subcuencas” (Moreda et al., 2014).

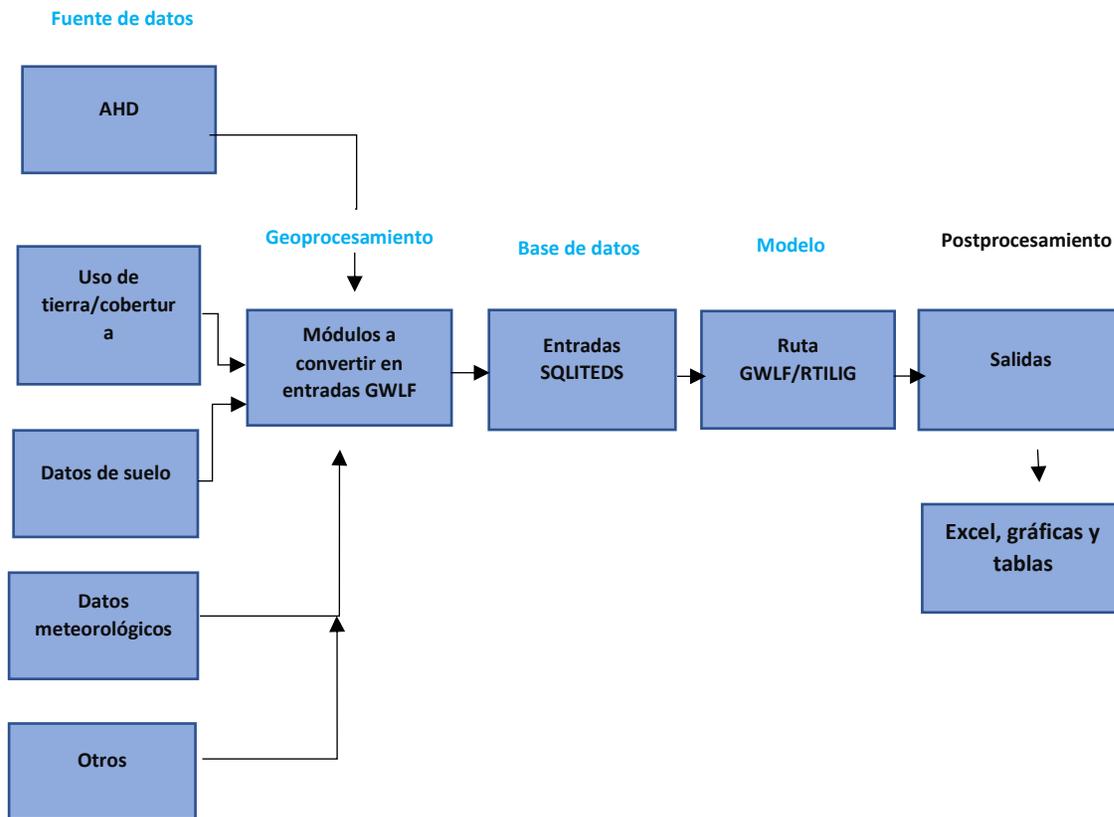
El sistema incluye módulos para incorporar los efectos de las aguas superficiales y los embalses en los caudales de las aguas superficiales y para estimar las cargas de sedimentos. Los datos producidos por Hydro-BID son útiles para el análisis de balances hídricos, decisiones respecto a las asignaciones de los recursos hídricos, y “análisis económicos y las herramientas de soporte de decisiones para ayudar a los responsables de tomar decisiones a escoger de manera bien informada entre las alternativas para diseños de proyectos de infraestructura, así como entre las alternativas de políticas de gestión de recursos hídricos” (Moreda et al., 2016).

“Provee una visión general del Sistema de modelaje Hydro- BID, incluyendo la LAC AHD; datos de clima, datos de cobertura de la tierra y suelos; y el modelo de escorrentía GWLF para crear una herramienta de simulación de recursos hídricos y usarlo a nivel de cuenca y subcuenca. Los modelos de cuencas desarrollados con Hydro-BID proporcionan

proyecciones de caudales fluviales basados en las entradas de datos/inputs del usuario” (Moreda et al., 2016).

### 6.1 Funcionamiento de Hydro-BID

“Hydro-BID es una herramienta independiente, de base Java que puede correr en cualquier PC que tenga instalado Java”(Escrura et al., 2016). Cuenta con una serie de componentes descritos a continuación en la ilustración 1.



*Ilustración 1. Esquema del funcionamiento de Hydro-BID.*

*Fuente: Moreda et al., (2014)*

- **Fuente de datos:** el sistema utiliza una “Base de Datos de Hidrología Analítica (AHD) es una base de datos basada en un sistema de información geográfica (GIS) de aguas superficiales. Sirve como una plataforma espacial regional para integrar datos dispersos que se

necesita para apoyar los modelos de hidrografía regional. Provee un marco para la parametrización de modelos en una manera consistente, que provee la conectividad del flujo aguas arriba/aguas abajo necesarias para dichos modelos, y provee la data necesaria para mostrar los resultados en forma gráfica”(Escrura et al., 2016).

“Las herramientas AHD están diseñadas para ayudar a los usuarios con la visualización y navegación en las líneas de flujo y cuencas de la AHD en la aplicación de escritorio Quantum GIS (QGis). Las herramientas cuentan con menús simples que permiten a los usuarios escoger cuáles características quieren navegar y luego mostrar la información de los resultados de la navegación. Estas herramientas también contienen símbolos diseñados especialmente para mejorar la exhibición de las geometrías de la AHD y los resultados de navegación” (Moreda et al., 2016).

- **Geoprocesamiento:** Hydro-BID está basado en el modelo GWLF. “El modelo de precipitación-escorrentía componente de GWLF se aplica a unidades de cuencas pequeñas al tomar en consideración los usos de tierras y las condiciones del suelo dentro de la cuenca. La respuesta a cada uso de tierra en una cuenca dada es tratada por separado para generar un volumen de escorrentía estimado. El flujo que se genera de cada cuenca, incluyendo las contribuciones de aguas subterráneas poco profundas o flujo base, se dirige a través de las redes de corrientes definidas por la AHD” (Moreda et al., 2014). La mayoría de los parámetros requeridos por el GWLF se acoplan en una base de datos para cada cuenca de la AHD, incluyendo el área de captación y la longitud del arroyo. Los parámetros principales del GWLF se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos.

Parámetros	Descripción	Método de Estimación
Capacidad disponible de Agua del Suelo (U*)	Este parámetro activa el inicio de la percolación	Puede ser estimado por las características del suelo.
Número de Curva (CN)	Controla la cantidad inicial de abstracción y usada para calcular la detención	Se escoge usando el uso del suelo y el tipo de clasificación del suelo
Coefficiente de la Curva de Evaporación (CV)	Representa la variación estacional de la evaporación debido al crecimiento de la vegetación	Se estima mensualmente.
Coefficiente de Recesión de Aguas Subterráneas (r)	Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde la zona saturada	En estaciones de aforo en las cuencas, el parámetro de recesión puede ser estimado usando técnicas de separación hidrográfica.
Parámetro de Percolación (s)	Controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas	Dependiendo de la formación geológica, los valores de percolación pueden ser muy variables

**Fuente:** Moreda et al., (2014)

- **“Base de datos:** El Hydro-BID corre desde una sola base de datos recopilada para una cuenca o para una región por toda la extensión de América del Sur continental. Usamos una base de datos freeware llamada SQLITE. Para una región dada, la base de datos es recopilada usando la AHD, el uso de la tierra/suelo y los datos de cobertura terrestre, suelos y datos meteorológicos” (Moreda et al., 2017).

- **Salidas/Outputs del Modelo**

“Hydro-BID genera salidas de información en forma de series de tiempo diarias de los flujos estimados para la localidad y el período escogidos. A discreción del usuario estas salidas pueden ser resumidas en una serie de tiempo mensual” (Eскурra et al., 2016).

## **6.2 Herramienta de interpolación climática de Hydro-BID**

HydroBID cuenta con un módulo de interpolación que utiliza la metodología IDW, con “esto se generan los datos interpolados de precipitación y temperatura para cada una de las microcuencas almacenadas en la AHD. En este módulo se debe ingresar los datos de las microcuencas a utilizar y las estaciones de estudio que se van a interpolar” (Bolívar Alexander, 2020).

## **6.3 Calibración del modelo**

“Hydro-BID provee un número de parámetros iniciales para simulaciones hidrológicas; sin embargo, como en todos los modelos, los parámetros necesitan ser calibrados para simular los caudales deseados con precisión. Para permitir la calibración dentro del sistema, Hydro-BID tiene una opción para agregar las series de tiempo de flujos observados”. Actualmente, el “sistema requiere una calibración manual en la cual el usuario selecciona y cambia los parámetros en el montaje (set up) y repite la corrida del modelo” (Moreda et al., 2014).

La base de datos de Hydro-BID se encuentra parametrizada y precalibrada utilizando valores provenientes de bases de datos regionales, por esta razón el proceso de calibración y validación es necesario para garantizar que el modelo represente lo más correctamente posible a la realidad (Nalesso & Coli, 2017). Para llevar a cabo el proceso de calibración de Hydro-BID este incluye unos parámetros (tabla 2) que permiten ajustar el modelo a la serie de datos observados los

cuales son los registros de caudales obtenidos de las estaciones limnimétricas, para que de esta forma disminuir el porcentaje de error del modelo.

**Tabla 2. Variables de Calibración y rangos recomendados.**

Parámetro	Definición	Valor optimo
Numero de curva (CN)	“Numero de Curva. Controla la cantidad inicial de abstracción utilizada para calcular la escorrentía. Valores por defecto están disponibles en la base de datos”.	0.8 – 1.2 (multiplicador)
CDA	“Capacidad Disponible de Agua en el Suelo. Activa el inicio de la percolación. Valores por defecto están disponibles en la base de datos”.	0.2 – 1.2 (multiplicador)
Recesión R	“Coeficiente de Recesión. Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde el almacenamiento saturado.	0.001 – 0.75 (dia-1)
Coeficiente de percolación	“Coeficiente de Percolación. Coeficiente que controla la tasa de filtración en el acuífero subterráneo”.	0.005 – 0.1 (dia-1)
Factor ET en temporada de cultivo	“Factor de evapotranspiración durante la estación de cultivo”.	0.5 – 1.5
Factor ET en temporada latente	“Factor de evapotranspiración durante la estación latente”.	0.5 – 1.5
Porcentaje de cobertura impermeable	Porcentaje estimado de la porción impermeable de la cuenca.	1%

**Fuente:** Centro de soporte Hydro-BID, (2018)

Para verificar las simulaciones de calibración puedes utilizar las variables de error, la gráfica de las series temporales y la curva de duración de flujo (Escrura et al., 2016). Las siguientes métricas son las variables utilizadas para la determinación estadística de los errores, tabla 3.

**Volumen de error general:** “indica la media del porcentaje de error entre los valores simulados y los valores observados” (Centro de soporte Hydro-BID, 2018).

**Correlación R:** analiza las “desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas” (Centro de soporte Hydro-BID, 2018).

**Correlación Modificada:** analiza “las desviaciones estándar de las series de tiempo de flujos observadas y simuladas, aplicando un factor que relaciona los valores mínimos y los máximos” (Centro de soporte Hydro-BID, 2018).

**Eficiencia de Nash-Sutcliffe:** “analiza la magnitud de la relación entre las varianzas de los flujos simulados y las varianzas de los flujos observados” (Centro de soporte Hydro-BID, 2018).

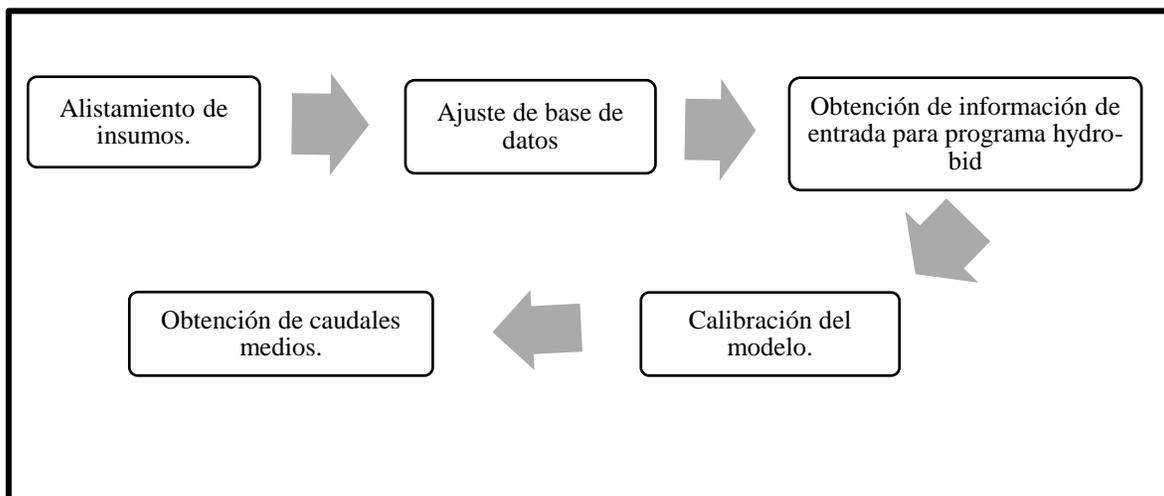
**Tabla 3. Métricas de desempeño Hydro-BID.**

Métricas de desempeño	Formula	Valor Optimo
Volumen de error general	$ove = \frac{\sum_{T=1}^N S_T - \sum_{T=1}^N O_t}{\sum_{T=1}^N O_t} \times 100$	cercano a 0
Correlación R	$r = \frac{N \sum_{T=1}^N S_T O_t - \sum_{T=1}^N O_t \sum_{T=1}^N S_t}{\sqrt{[N \sum_{T=1}^N S_t^2 - (\sum_{T=1}^N S_t)^2][N \sum_{T=1}^N O_t^2 - (\sum_{T=1}^N O_t)^2]}}$	0-1
Correlación Modificada	$r_{mod} = r \frac{\min(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})}{\max(\sigma_{sim}, \sigma_{obs})}$	0-1
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	$ove = \frac{\sum_{T=1}^N (S_T - O_t)^2}{\sum_{T=1}^N (O_t - \mu_o)^2}$	>0.2 insatisfactorio 0.2-0.4 satisfactorio 0.4-0.6 bueno 0.6-0.8 muy bueno >0.8 excelente

**Fuente:**(Cabrera, n.d.) (Moreda et al., 2016)

## 7. Metodología

Para la obtención de caudales medios por subcuenca del Río Pamplonita mediante la herramienta de simulación de recurso hídrico hydro-BID bajo escenarios hidrológicos en condiciones normales, se ha empleado la siguiente metodología (ilustración 2) la cual consta de 5 fases importantes.



*Ilustración 2. Diseño de fases metodológicas*

*Fuente: propia*

### 7.1 Fase I: Alistamiento de insumos

#### 7.1.1 Descarga de datos hidrometeorológicos plataforma Web DHIME

Los datos climáticos e hidrológicos utilizados en el estudio, se obtuvieron del geoportal DHIME del IDEAM, opción Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos, seleccionando la estación a consultar en la galería de mapas, mostrando los atributos asociados a la estación. En la parte izquierda se encuentra el panel de consulta, el cual por medio de una serie de filtros permite personalizar las consultas para mostrar la información de una forma más detallada. Para la respectiva descarga se ingresó a este panel la fecha inicial (01/01/2010) de partida de descarga

datos y la fecha final (31/12/2019), posteriormente; la serie de tiempo, frecuencia del parámetro y la variable a descargar, departamento, municipio y código de la estación, agregar consulta y finalmente descargar la información.

## **7.2 Fase II: Ajuste de base de datos**

### **7.2.1. Homogeneización de datos climáticos y análisis de consistencia.**

Utilizando la herramienta Excel se procedió al ajuste y homogenización para las variables precipitación y temperatura, utilizando el método de media aritmética, si la base de datos de la variable a ajustar contenía un número total de datos faltantes menor al diez por ciento.

#### *Ecuación 1. Media aritmética*

**Fuente:** Moreda et al., ( 2014)

$$D_i = \frac{A_i + B_i + C_i}{3}$$

Donde,

D = precipitación y/o temperatura estimada para el día i

A, B, C = precipitación y/o temperatura observada de las estaciones A, B y C en el día i

De lo contrario se usó el método de interpolación lineal, este método permite rellenar los datos ausentes usando los mismos datos registrados de la propia estación. Esto se realizó de forma manual.

*Ecuación 2. Interpolación lineal*

**Fuente:** Moreda et al., (2014)

$$y = y_1 + (x - x_1) \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

Donde,

y= precipitación y/o temperatura a estimar

y1=dato anterior al dato faltante

y2=dato siguiente al dato faltante

x= día del dato faltante

x1= día anterior al dato faltante

x2=día siguiente al dato faltante

Para el análisis de consistencia o validación de los datos de precipitación y temperatura, se realizó por medio de la metodología de la curva de doble masa para verificar que las pendientes no presenten variaciones significativas. El resultado se comprobó por medio del parámetro de ajuste R<sup>2</sup>.

**7.2.2. Homogeneización y análisis de consistencia de datos hidrológicos.**

Para el ajuste y validación de los datos de caudal observados se utilizó la herramienta MATLAB online, ya que está disponible de manera libre en la web, aplicando el modelo que mejor se ajustó a los datos de la serie propuestas y verificando su eficiencia y confiabilidad mediante el parámetro de R<sup>2</sup>.

### **7.3 Fase III: Obtención de información de entrada para programa Hydro-BID.**

#### **7.3.1 Identificación de la cuenca y subcuencas en QGIS.**

La ubicación de la cuenca hidrográfica Rio Pamplonita se llevó a cabo mediante la herramienta de sistema de información geográfica QGIS y la base de datos de navegación AHD, donde se ubicó el punto de cierre de la cuenca, mostrando las subcuencas que aportan aguas a la cuenca del rio Pamplonita con su respectivo número identificador COMID.

Una vez seleccionada la cuenca se realizó la ubicación de los centroides de las subcuencas usando la herramienta QGIS. Al finalizar el procedimiento se obtuvo un documento Excel con la información de latitud y altitud de los centroides, el número COMID por subcuenca y área por subcuenca.

### **7.4 Fase 4: Calibración y validación del modelo**

#### **7.4.1 Parámetros de calibración hidrológicos.**

Inicialmente se ingresó al programa Hydro-BID, específicamente a la interfaz herramientas de interpolación climática, la base de datos de temperatura y precipitación, archivo de coordenadas de los centroides y el archivo con las coordenadas de las estaciones, para realizar la respectiva interpolación climática, información que se guarda automáticamente en la base de datos SQLite asignada, para posteriormente realizar la calibración del modelo.

El proceso de calibración se realizó utilizando las estaciones hidrológicas de La Don Juana, ubicada en la parte alta de la cuenca, en un periodo de 01/01/2010 al 31/12/2019 y la estación Aguas Claras, ubicada en la parte baja de la cuenca, en un periodo de 01/01/2010 al 31/12/2019.

Los parámetros iniciales se ajustaron mediante un proceso de iteración, hasta obtener métricas de desempeño optimas. Es importante aclarar que los valores ingresados en los parámetros

número de curva (NC) y la capacidad disponible de agua en el suelo (AWC), se utilizaron como un multiplicador, es decir, cuando los valores asignados están entre cero y uno disminuye el valor asignado en la AHD.

#### **7.4.2 Validación de los parámetros de calibración hidrológicos.**

Para la estación La Don Juana se tomó un primer periodo de validación 01/01/2010 hasta el 31/12/2016 y finalmente un periodo de 01/01/2017 hasta el 31/12/2019.

En cuanto a la estación Aguas Claras se tomó un primer periodo de validación de 01/01/2012 hasta el 31/12/2016 y finalmente un periodo de 01/01/2017 hasta el 31/12/2019.

#### **7.5 Fase 5: Obtención de caudales medios**

Una vez calibrado y validado el modelo se procedió a correr el modelo con los parámetros ya establecidos en la calibración para la obtención de los caudales medios.

##### **7.5.1 Índice de aporte de caudal por área para cada subcuenca.**

Para la obtención de los aportes de caudal por área en cada subcuenca se realizó dividiendo el caudal de cada subcuenca entre su respectiva área.

## 8. Resultados

### 8.1 Fase I: Alistamiento de insumos

#### 8.1.1 Descarga de datos hidrometeorológicas plataforma Web DHIME.

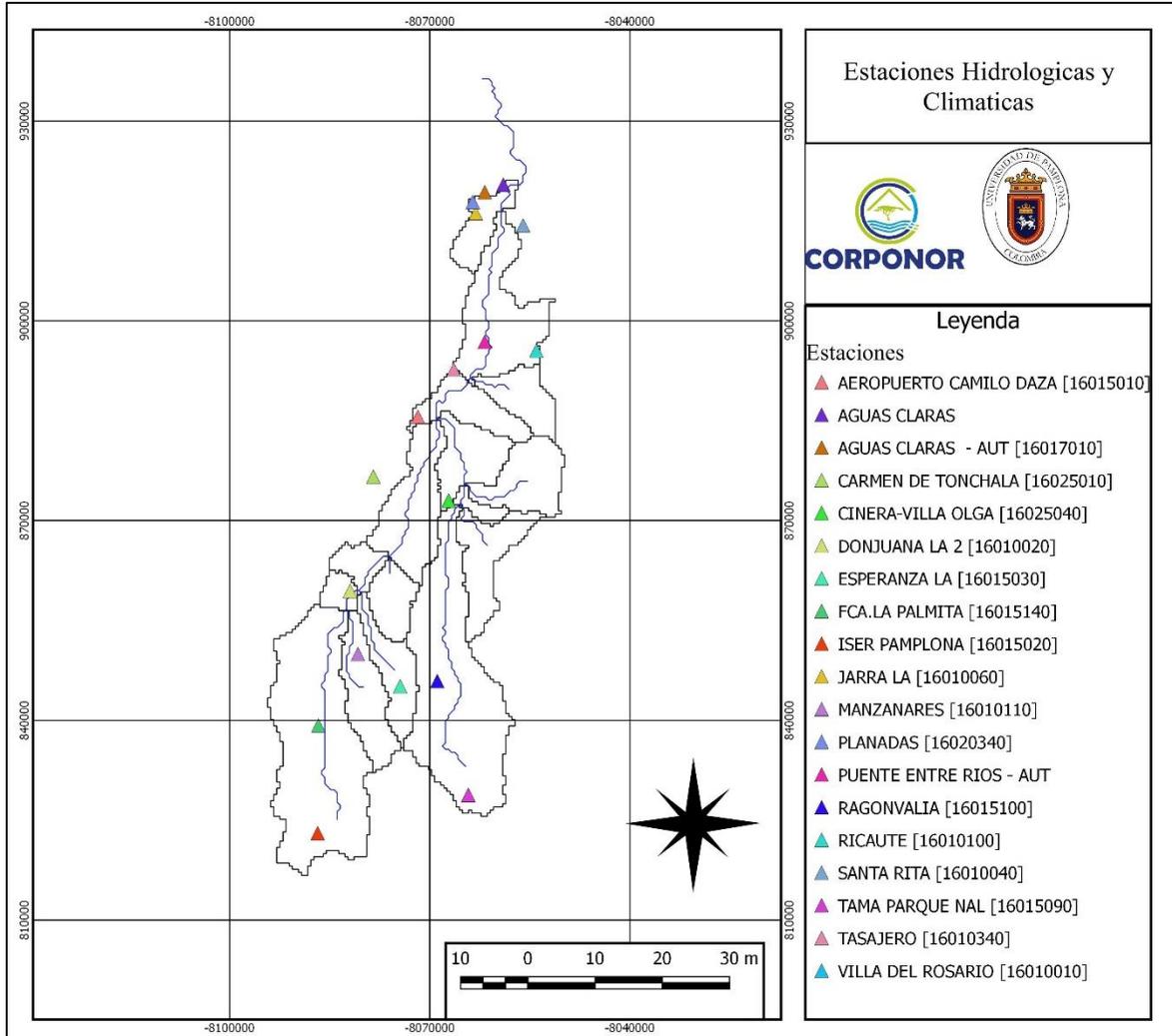
Como resultado de la consulta en el geoportal DHIME del IDEAM se adquirió información de 5 estaciones de temperatura, 17 estaciones pluviométricas y 2 estaciones limnigráficas. En la tabla 4 se especifican las características de cada una de las estaciones.

**Tabla 4.** Características de estaciones climáticas e hidrológicas.

	Código	Nombre	Estado	Latitud	Longitud	Municipio
<b>Temperatura</b>	16015020	Iser Pamplona [16015020]	Activa	7.37311	-72.645	Pamplona
	16015010	Aeropuerto Camilo Daza [16015010]	Activa	7.93028	-72.5092	Cúcuta
	16010010	Villa del Rosario [16010010]	Activa	7.81778	-72.4778	V. Rosario
	16025010	Carmen de Tonchala [16025010]	Activa	7.84889	-72.5661	Cúcuta
	16015030	Esperanza la [16015030]	Activa	7.56972	-72.5339	Ragonvalia
<b>Precipitación</b>	16015020	Iser pamplona [16015020]	Activa	7.37311	-72.645	Pamplona
	16015140	Fca. La palmita [16015140]	Activa	7.51736	-72.6441	Pamplonita
	16020110	Caldera la [16020110]	Activa	7.31694	-72.7183	Mutiscua
	16010110	Manzanares [16010110]	Activa	7.61278	-72.5908	Chinácota
	16010020	Donjuana la 2 [16010020]	Activa	7.69722	-72.6014	Bochalema
	16010010	Villa del Rosario [16010010]	Activa	7.81778	-72.4778	V. Rosario
	16010340	Tasajero [16010340]	Activa	7.99303	-72.4617	Cúcuta
	16010060	Jarra la [16010060]	Activa	8.20194	-72.4322	Cúcuta
	16025040	Cinera-villa Olga [16025040]	Activa	7.8177	-72.4686	Cúcuta
	16015030	Esperanza la [16015030]	Activa	7.56972	-72.5339	Ragonvalia
	16025010	Carmen de Tonchala [16025010]	Activa	7.84889	-72.5661	Cúcuta
	16010040	Santa Rita [16010040]	Activa	8.18556	-72.3683	Cúcuta
	16010100	Ricaurte [16010100]	Activa	8.01833	-72.354	Cúcuta
	16015100	Ragonvalia [16015100]	Activa	7.57667	-72.4839	Ragonvalia
	16015090	Tama Parque Nal [16015090]	Activa	7.42444	-72.4421	Herran
	16015010	Aeropuerto camilo daza [16015010]	Activa	7.93028	-72.5092	Cúcuta
	16020340	Planadas [16020340]	Activa	8.21694	-72.4361	Cúcuta
<b>Caudal</b>	16017010	Aguas claras - aut [16017010]	Activa	8.23361	-72.4172	Cúcuta
	16017020	La Donjuana - aut [16017020]	Activa	7.68797	-72.6055	Chinácota

*Fuente: propia.*

A continuación, en el mapa 2 se ilustra la ubicación de las estaciones climáticas e hidrológicas utilizadas para el modelo hidrológico.



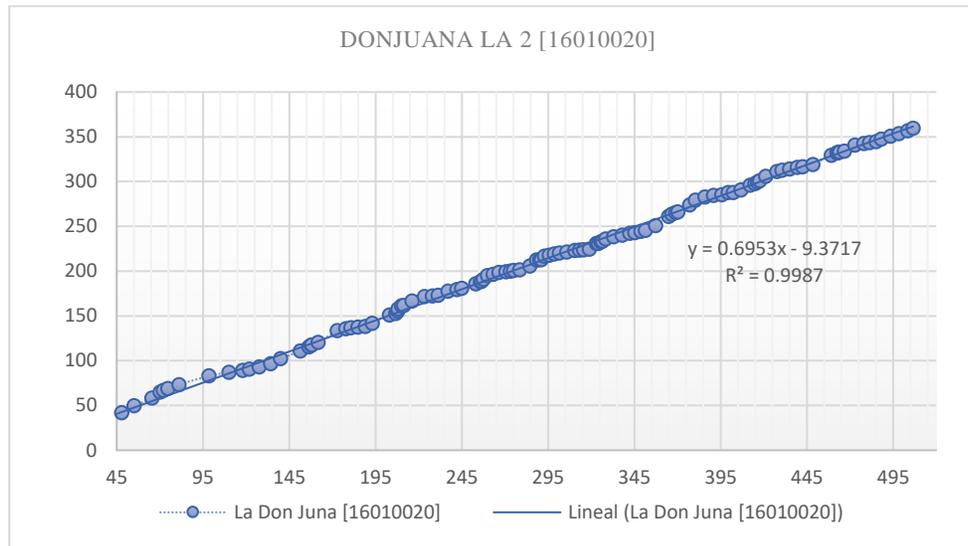
*Mapa 2. Ubicación de las estaciones climáticas e hidrológicas.*

*Fuente: propia*

## 8.2 Fase II: Ajuste de base de datos

### 8.2.1 Homogeneización de datos climáticos y análisis de consistencia.

Como resultado de la homogenización de los datos climáticos usando el método de curva doble masa, se obtuvo por cada estación la curva doble masa con su respectivo parámetro de ajuste R<sup>2</sup>, como se ilustra en la gráfica 1, las demás graficas se muestran en el anexo A.



**Grafica 1.** Curva doble masa precipitación estación [16010020].

**Fuente:** propia

### 8.2.2. Homogeneización y análisis de consistencia de datos hidrológicos.

Como resultado del ajuste y consistencia de datos hidrológicos utilizando la herramienta MATLAB online, y aplicando el modelo que mejor se ajustara a los datos de la serie propuestas y verificando su eficiencia y confiabilidad mediante el parámetro de R<sup>2</sup>, se obtuvo:

Para la estación Aguas claras el modelo que mejor se ajusto fue la función lineal polinómica de grado 8 con una robustez o residual absoluta LAR, un nivel de significancia de 95% y un R Cuadrado ajustado del 97.4% (grafica 2 y 3).

*Ecuación 3. Modelo lineal polinómico de grado 8*

*Fuente: propia*

$$f(x) = p1 * X^8 + p2 * X^7 + p3 * X^6 + p4 * X^5 + p5 * X^4 + p6 * X^3 + p7 * X^2 + p8 * X + p9$$

Coefficientes (con límites de confianza del 95%):

$$p1 = 2.083e-33 (5.89e-35, 4.107e-33)$$

$$p2 = -4.592e-27 (-1.206e-26, 2.872e-27)$$

$$p3 = 2.034e-21 (-8.59e-21, 1.266e-20)$$

$$p4 = 1.342e-15 (-6.618e-15, 9.301e-15)$$

$$p5 = -1.89e-10 (-6.252e-09, 5.874e-09)$$

$$p6 = -0,0009686 (-0,005378, 0,00344)$$

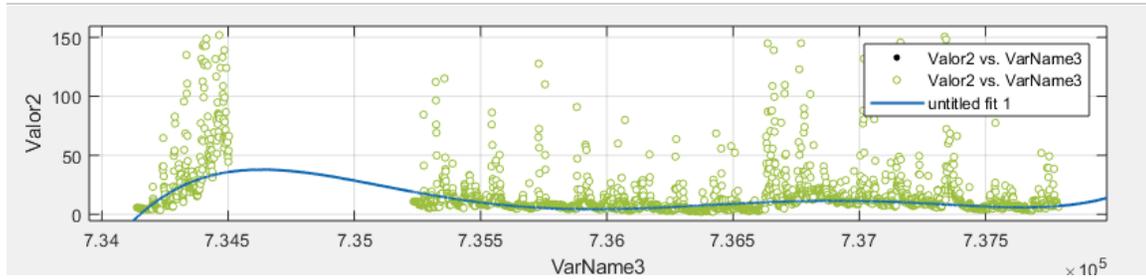
$$p7 = 3.318 (-2070, 2077)$$

$$p8 = 4.254e + 08 (-2.253e + 08, 1.076e + 09)$$

$$p9 = -1,286e + 14 (-2,256e + 14, -3,162e + 13)$$

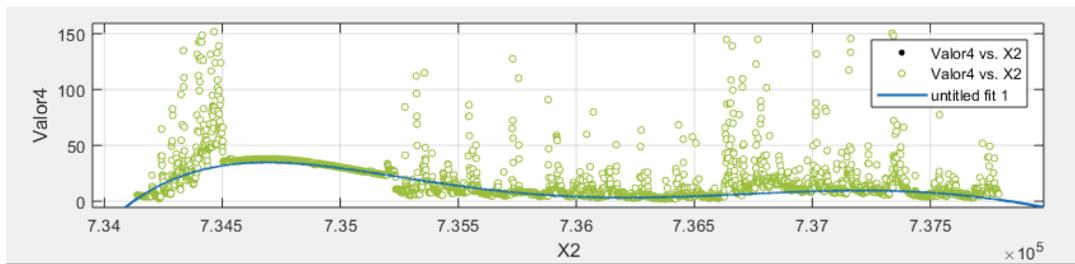
Bondad de ajuste:

R Cuadrado: 0.9741



**Grafica 2.** Modelo polinómico para el ajuste de la base de datos Agua Clara

**Fuente:** propia



**Grafica 3.** Serie ajustada implementando la función polinómica.

**Fuente:** propia

Para la estación La Don Juana el modelo que mejor se ajusto fue la función lineal polinómica de grado 6 con una robustez o residual absoluta LAR, un nivel de significancia de 95% y un R cuadrado ajustado del 98.2% (grafica 4 y 5).

**Ecuación 4.** Modelo polinómico de grado 6

**Fuente:** propia

$$f(x) = p1 * X^6 + p2 * X^5 + p3 * X^4 + p4 * X^3 + p5 * X^2 + p6 * X + p7$$

Coefficientes (con límites de confianza del 95%):

$$p1 = 3.482e-22 \text{ (} 2.767e-22, 4.197e-22 \text{)}$$

$$p2 = -9.528e-16 (-1.237e-15, -6.691e-16)$$

$$p3 = 6.753e-10 (2.018e-10, 1.149e-09)$$

$$p4 = 0.0003969 (-3.435e-05, 0.0008281)$$

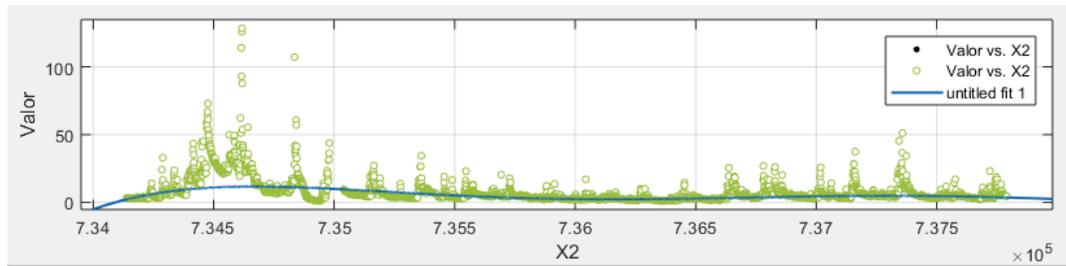
$$p5 = -805 (-1034, -575,8)$$

$$p6 = 4.098e + 08 (3.417e + 08, 4.778e + 08)$$

$$p7 = -7.15e + 13 (-8.03e + 13, -6.27e + 13)$$

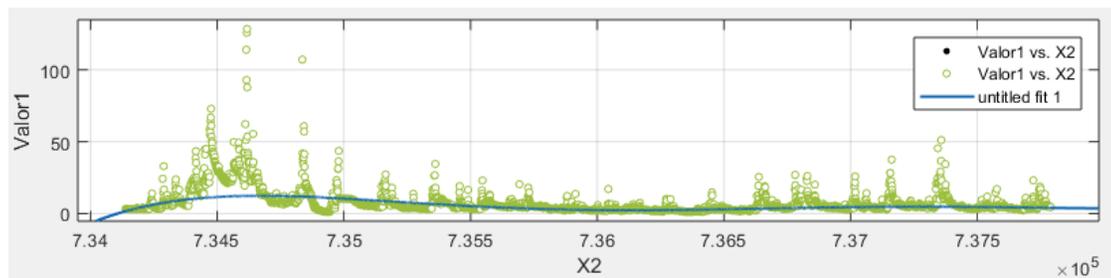
Bondad de ajuste:

R cuadrado: 0.982



**Grafica 4.** Modelo polinómico para el ajuste de la base de datos La Donjuana

**Fuente:** propia



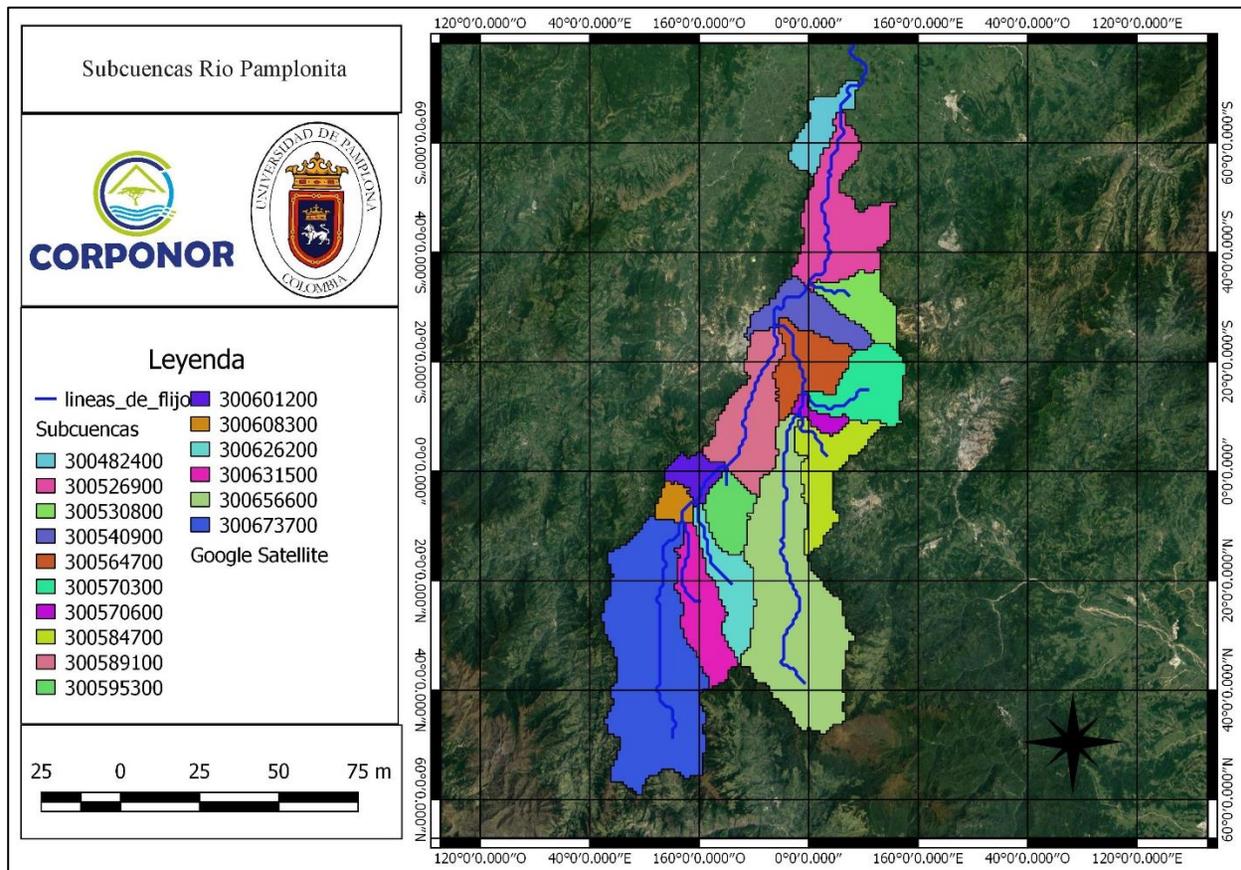
**Grafica 5.** Serie ajustada implementando la función polinómica.

**Fuente:** propia

### 8.3 Fase III: Obtención de información de entrada para programa Hydro-BID

#### 8.3.1 Identificación de la cuenca y subcuencas en QGIS.

Como resultado de la navegación en la base de datos AHD mediante el sistema de información geográfica QGIS, en el mapa 3 se observa las subcuencas que se tuvieron en cuenta para el análisis de caudales medios, cada subcuenca es identificada en la leyenda con su respectivo COMID. Obteniéndose 16 subcuencas en total, a partir del punto de cierre dado en la subcuenca 300482400.



*Mapa 3. Ubicación de subcuencas identificadas por COMID.*

*Fuente: propia.*

A continuación, en la tabla 5 se describen el número identificador único por cada subcuenca y su respectiva área.

**Tabla 5. Características de las subcuencas.**

COMID	AREA HA	% de cuenca	% acumulado
300608300	2605.5	1.2873	1.2873
300595300	6122	3.0247	4.3120
300673700	42554.6	21.0250	25.3370
300631500	10721.8	5.2973	30.6343
300601200	3770.2	1.8627	32.4971
300482400	5797.3	2.8643	35.3614
300589100	15099.3	7.4601	42.8215
300530800	7155.4	3.5353	46.3568
300656600	40301	19.9116	66.2683
300626200	8411.6	4.1559	70.4243
300584700	10632.6	5.2533	75.6775
300564700	9253	4.5716	80.2492
300570300	10587.6	5.2310	85.4802
300540900	8277.7	4.0898	89.5700
300526900	18582.2	9.1809	98.7509
300570600	1884.8	0.9312	99.6821
área total de subcuencas	201756.6		
área total de la cuenca	202400		
área faltante	643.4		
% faltante	0.3179		

*Fuente: propia.*

## 8.4 Fase IV: Calibración y validación del modelo

### 8.4.1 Parámetros de calibración hidrológicos.

#### 8.4.1.1 Parámetros de calibración inicial y final estación la Don Juana.

La calibración se realizó considerando el intervalo 01/01/2010 a 31/12/2019, obteniéndose los siguientes parámetros mostrados en la tabla 6.

**Tabla 6.** Parámetros iniciales y finales para la calibración de la estación La Don Juana.

Parámetro	Inicial	Final
Numero de curva (NC)	1	1.17
Contenido disponible de agua (CDA)	1	0.066
Coefficiente de recesión (r)	0.003	0.0091
Coefficiente de percolación (s)	0.01	0.00468
Factor de ET en temporada de cultivo	1	0.95
Factor de ET en temporada latente	1.5	3.198
Porcentaje cobertura impermeable	1	1
Umbral de temperatura	1	1
Factor de fusión	1	1

**Fuente:** Propia

y los siguientes estadísticos mostrados en la tabla 7

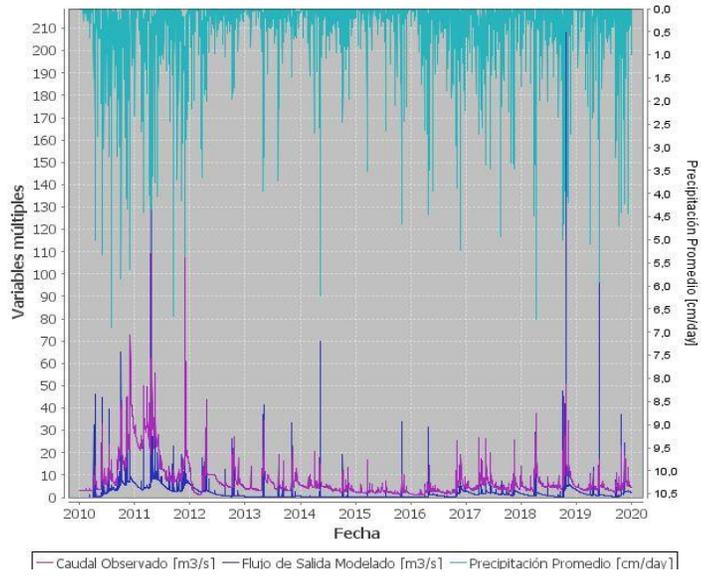
**Tabla 7.** Métricas de desempeño inicial y final estación la Don Juana.

Estadísticas	Métricas iniciales		Métricas finales	
	Valor diario	Valor mensual	Valor diario	Valor mensual
Volumen de error general	-58	-58.12	-15.25	-15.98
Correlación R	0.44	0.83	0.48	0.81
Correlación Modificada	0.37	0.43	0.37	0.71
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	-0.2	0.23	-0.44	0.62

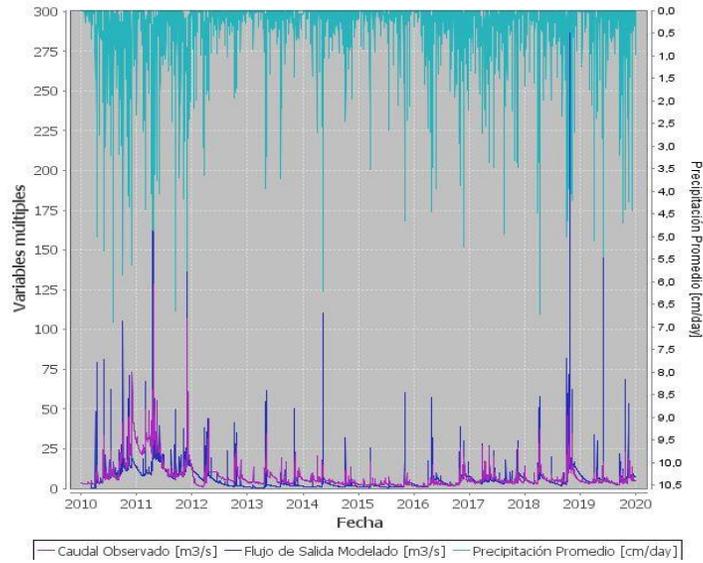
**Fuente:** propia

A continuación, en la gráfica 6 se muestra las series temporales de caudales, en la 7 la Curva de duración de flujo y en la 8 el mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo. Mostrando el antes y después de realizar la calibración.

**Resultados Diarios**

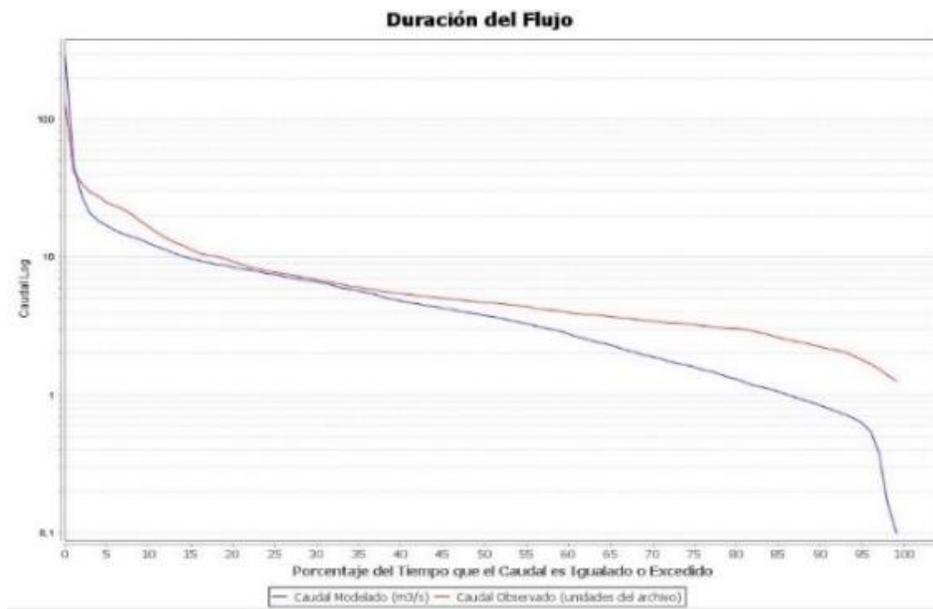
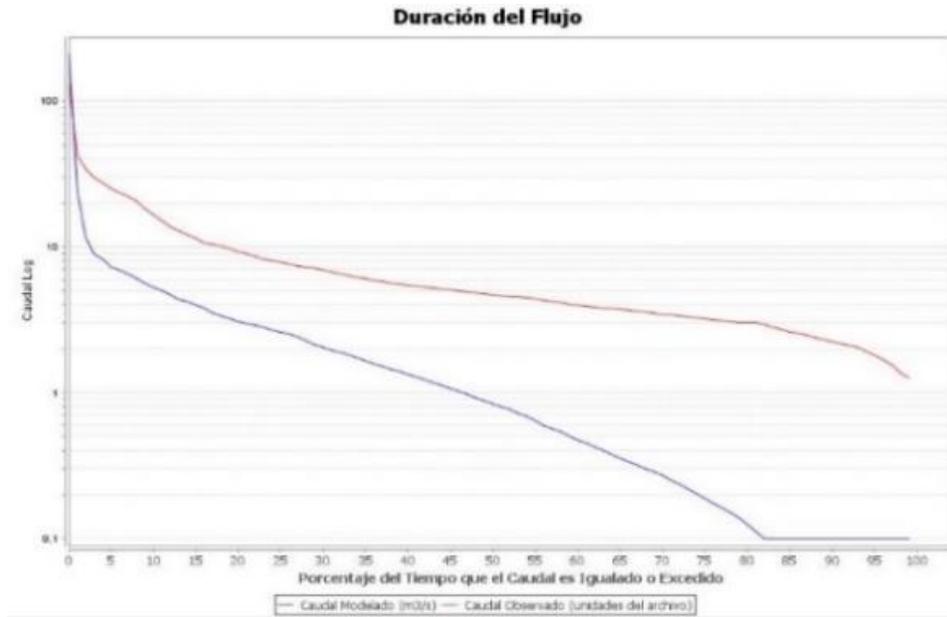


**Resultados Diarios**



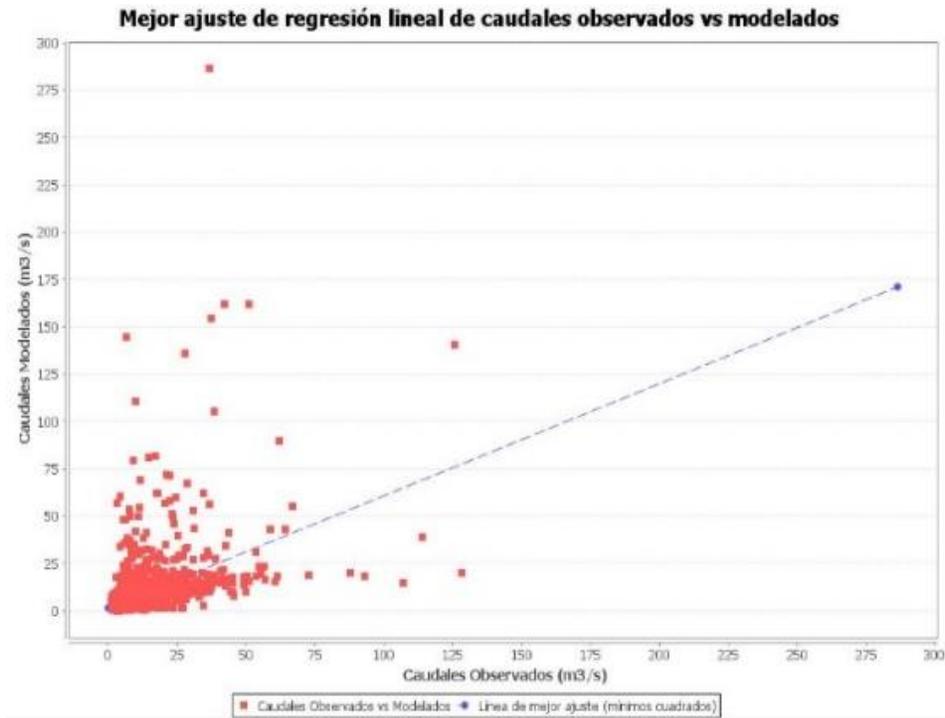
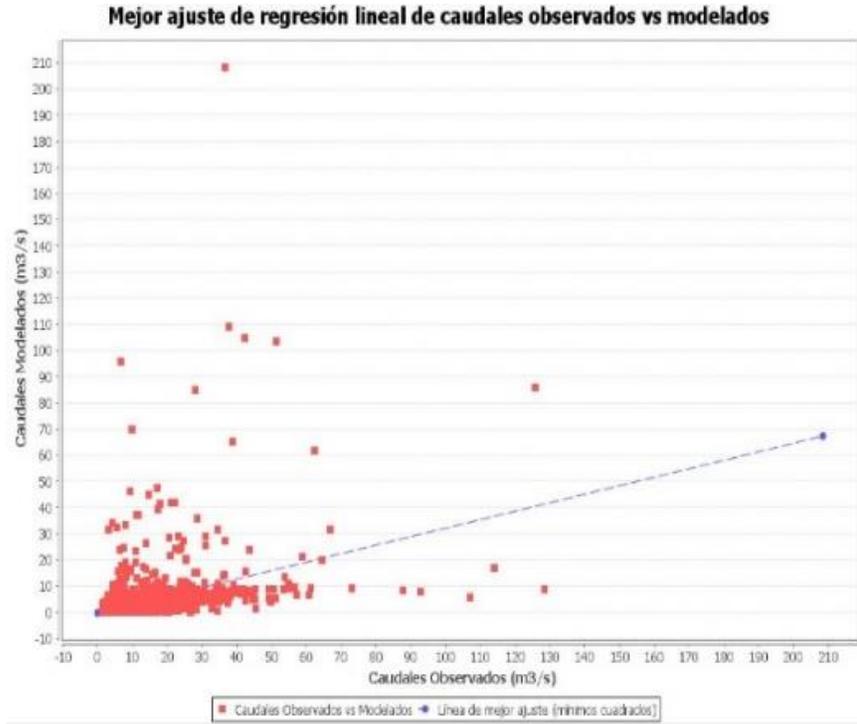
**Grafica 6.** Hidrograma de promedios de los resultados medios por día, antes y después de calibración

**Fuente:** propia



*Grafica 7. Curva de duración de flujo, antes y después de calibración.*

*Fuente: propia*



**Grafica 8.** Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, antes y después de calibración

**Fuente:** propia

**8.4.1.2 Validación de los parámetros de calibración hidrológicos estación La Don Juana.**

Utilizando los periodos de validación mencionados en la metodología y empleando como valor los parámetros hallados en el proceso de calibración, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 8.

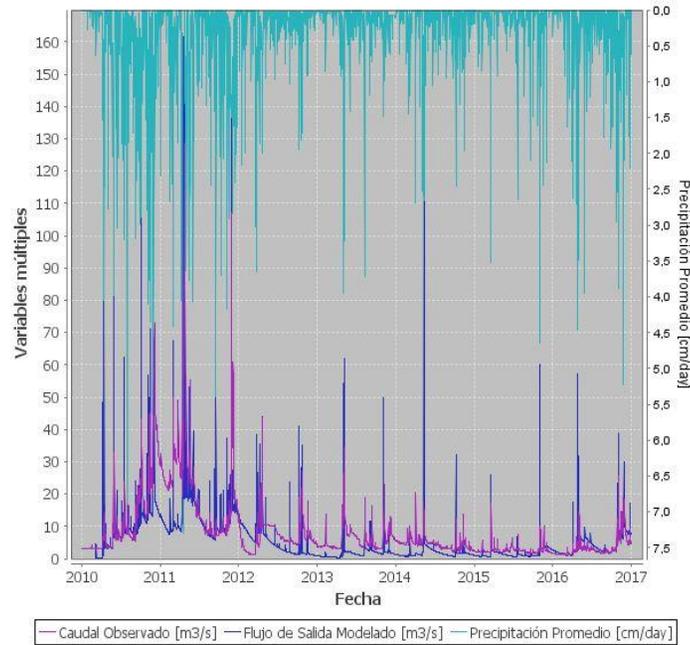
**Tabla 8.** Estadísticos obtenidos en el proceso de validación estación la Don Juana.

Periodo	01/01/2010 31/12/2016		01/01/2016 31/12/2019	
	Valor diario	Valor mensual	Valor diario	Valor mensual
Volumen de error general	-29.53	-28.27	20.71	-21.42
Correlación R	0.54	0.85	0.44	0.88
Correlación Modificada	0.51	0.68	0.16	0.57
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	-0.03	0.65	-5.25	0.21

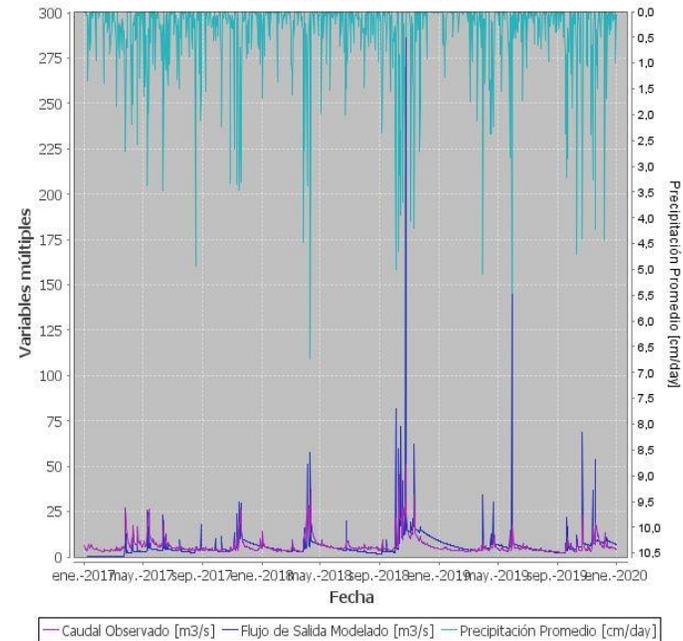
**Fuente:** propia

A continuación, en la gráfica 9 se muestra las series temporales de caudales, en la 10 la Curva de duración de flujo y en la 11 el mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para las dos validaciones.

**Resultados Diarios**

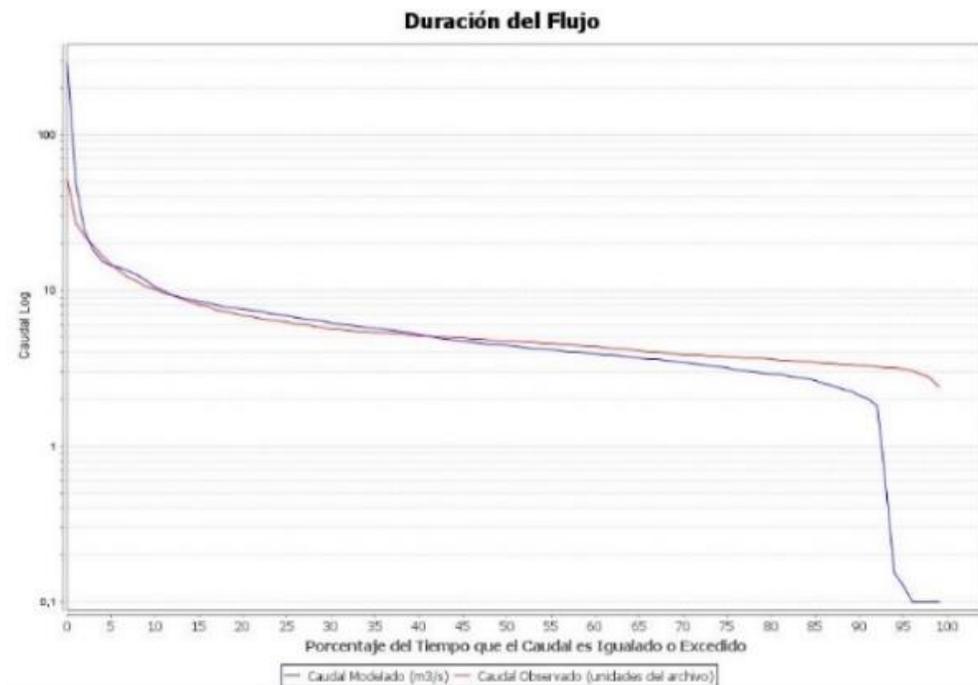
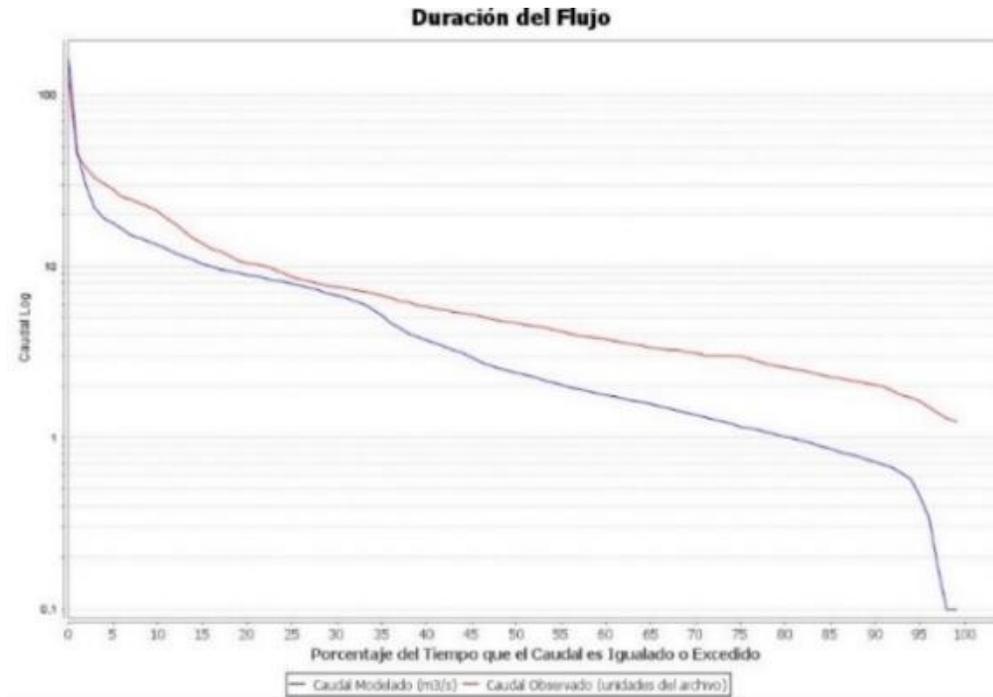


**Resultados Diarios**



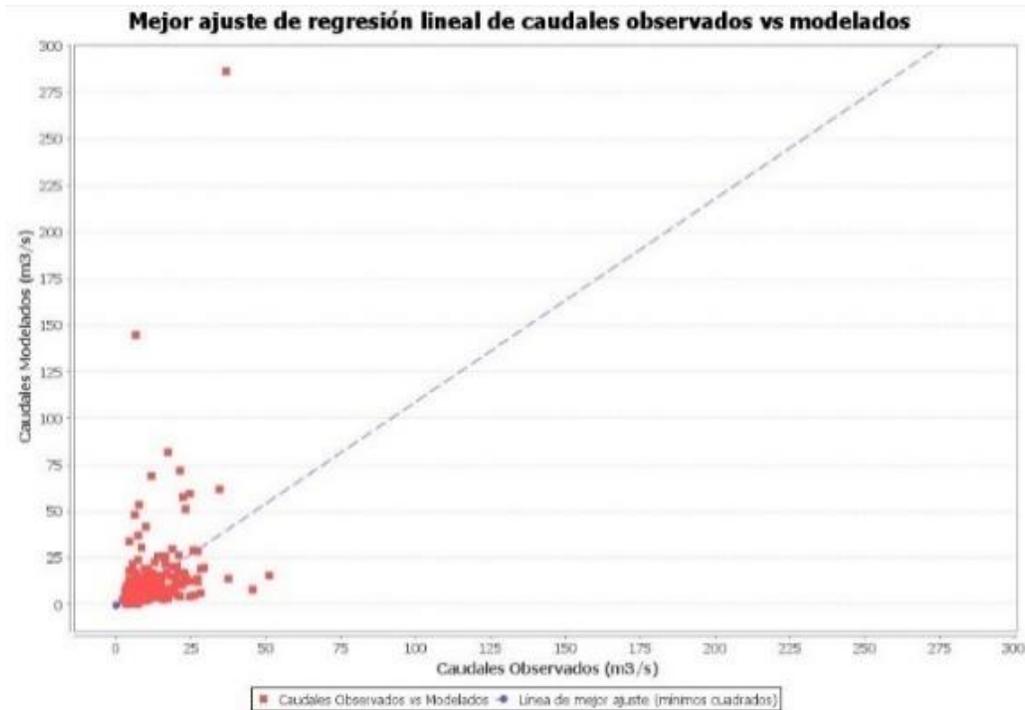
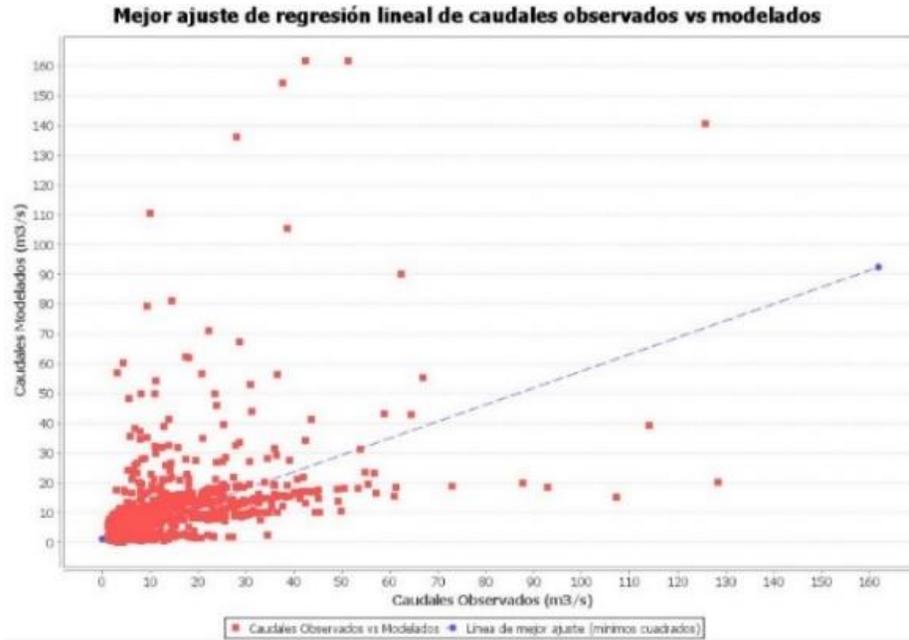
*Grafica 9. Hidrograma de resultados medios por día, para la validación de la estación Don Juana*

*Fuente: propia*



*Grafica 10. Curva de duración de flujo, para la validación de la estación La Don Juana.*

*Fuente: propia*



**Grafica 11.** Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, para la validación de la estación La Don Juana.

*Fuente:* propia.

## 8.4.2 Parámetros de calibración hidrológicos estación Aguas Claras.

### 8.4.2.1 Parámetros de calibración inicial y final estación Aguas Claras.

La calibración se realizó considerando el intervalo 1/1/2010 a 31/12/2019, obteniéndose los siguientes parámetros mostrados en la tabla 9.

**Tabla 9.** Parámetros iniciales y finales de calibración estación Aguas Claras

Parámetro	Inicial	Final
Numero de curva (NC)	1	0.00082
Contenido disponible de agua (CDA)	1	0.00036
Coefficiente de recesión (r)	0.001	0.017
Coefficiente de percolación (s)	0.005	0.1755
Factor de ET en temporada de cultivo	1.5	2.365
Factor de ET en temporada latente	1.5	3.97
Porcentaje cobertura impermeable	1	1
Umbral de temperatura	1	1
Factor de fusión	1	1

**Fuente:** propia

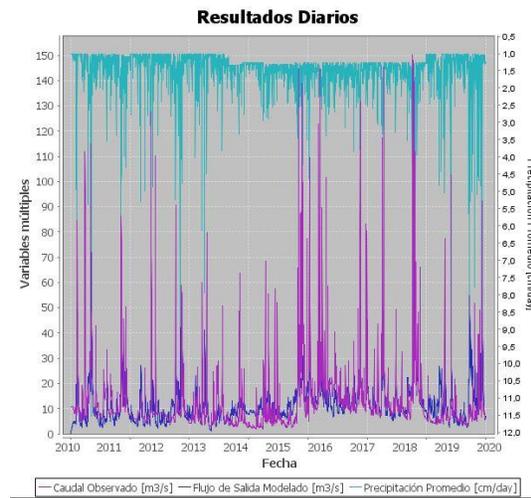
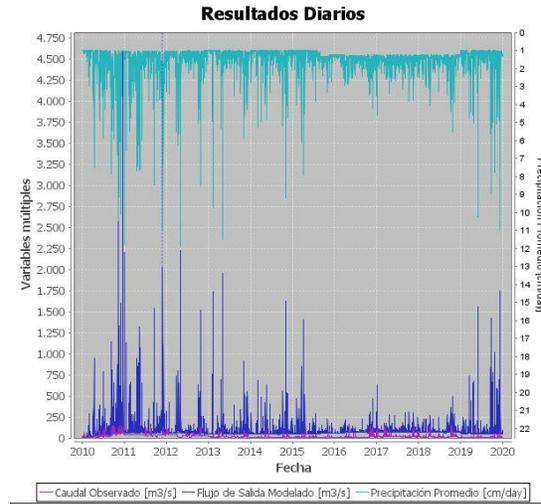
y los siguientes estadísticos mostrados en la tabla 10.

**Tabla 10.** Métricas de desempeño inicial y final estación Aguas Claras.

Estadísticas	Métricas iniciales		Métricas finales	
	Valor diario	Valor mensual	Valor diario	Valor mensual
Volumen de error general	459.25	457.9	-3.79	-3.72
Correlación R	0.12	0.44	0.54	0.69
Correlación	0.02	0.13	0.23	0.35
Modificada				
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	-82.68	-49.57	0.28	0.44

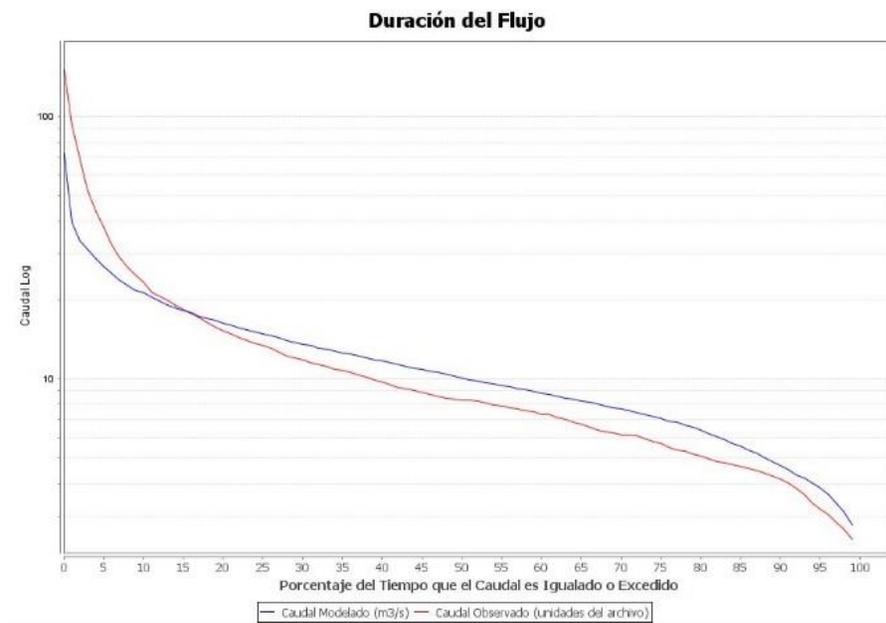
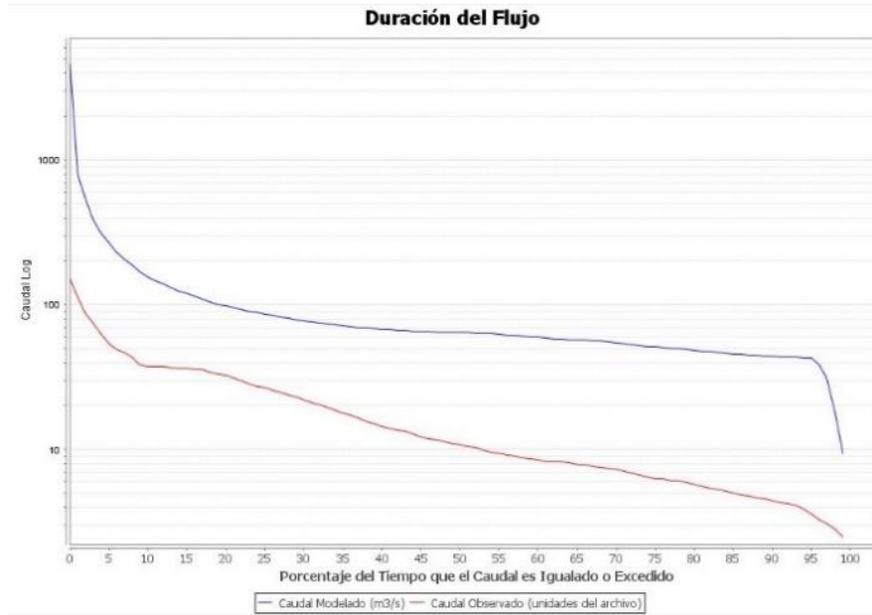
**Fuente:** propia

A continuación, en la gráfica 12 se muestra las series temporales de caudales, en la 13 la Curva de duración de flujo y en la 14 el mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo. Mostrando el antes y después de realizar la calibración.



**Grafica 12.** Hidrograma de promedios de los resultados medios por día, antes y después de calibración estación Aguas Claras.

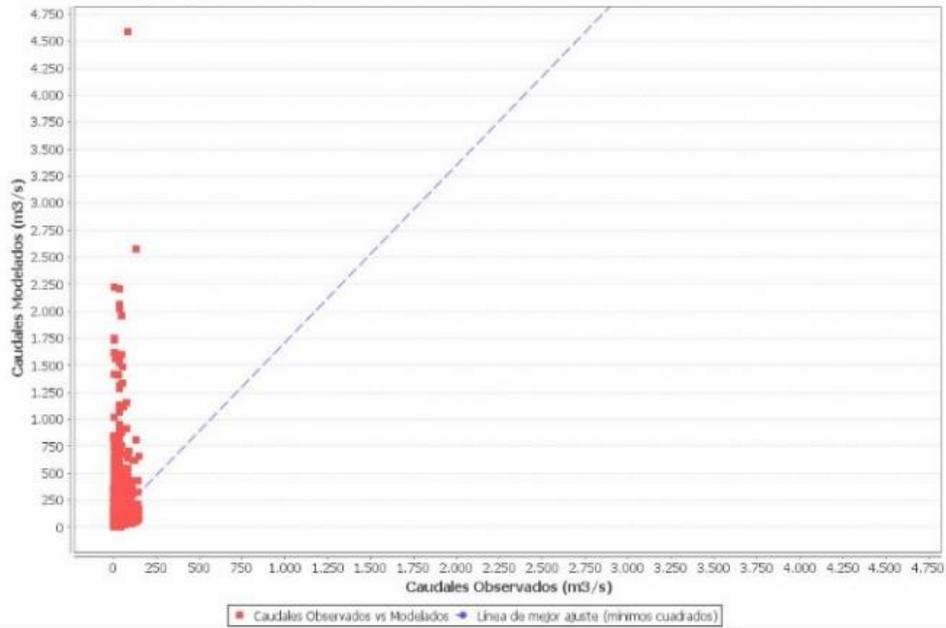
**Fuente:** propia



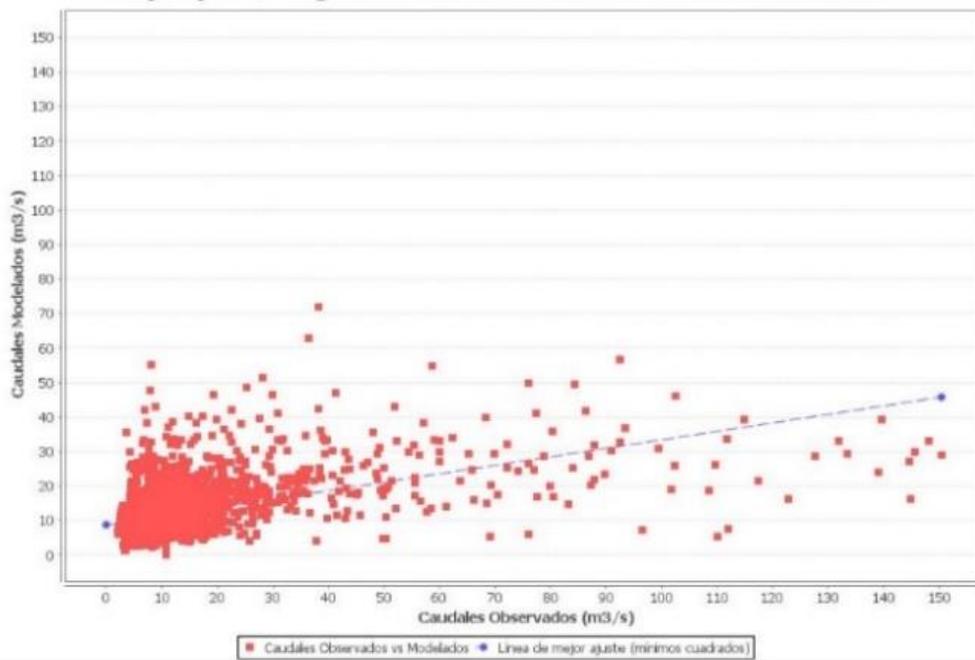
**Grafica 13.** Curva de duración de flujo, antes y después de calibración estación Aguas Claras.

**Fuente:** propia

**Mejor ajuste de regresión lineal de caudales observados vs modelados**



**Mejor ajuste de regresión lineal de caudales observados vs modelados**



**Grafica 14.** Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, antes y después de calibración estación Aguas Claras

**Fuente:** propia

**8.4.2.2 Validación de los parámetros de calibración hidrológicos estación Aguas Claras.**

Utilizando los periodos de validación mencionados en la metodología y empleando como valor los parámetros hallados en el proceso de calibración, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la Tabla 11.

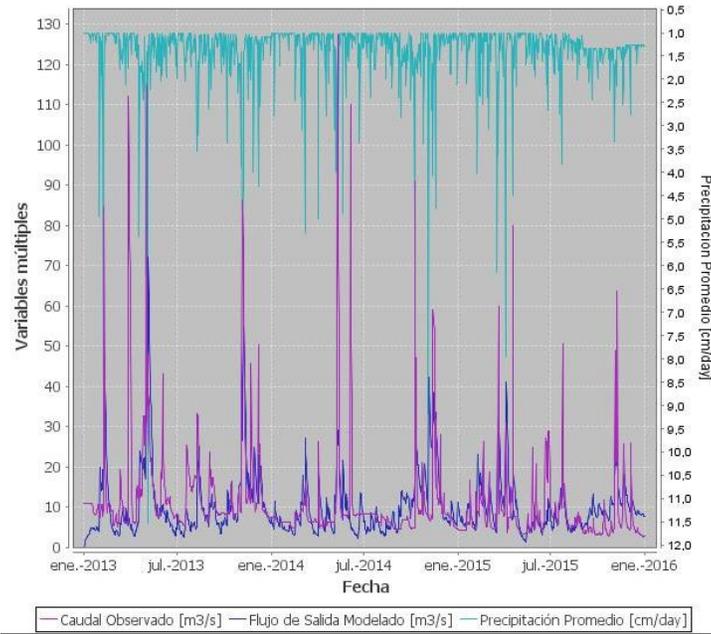
**Tabla 11. Métricas de desempeño en el proceso de validación estación Aguas Claras.**

Periodo de validación	01/01/2012 31/12/2016		01/01/2017 31/12/2019	
	Valor diario	Valor mensual	Valor diario	Valor mensual
Volumen de error general	-4.06	-4,23	5.93	6.41
Correlación R	0.54	0.69	0.53	0.66
Correlación Modificada	0.23	0.32	0.28	0.37
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	0.28	0.43	0.28	0.41

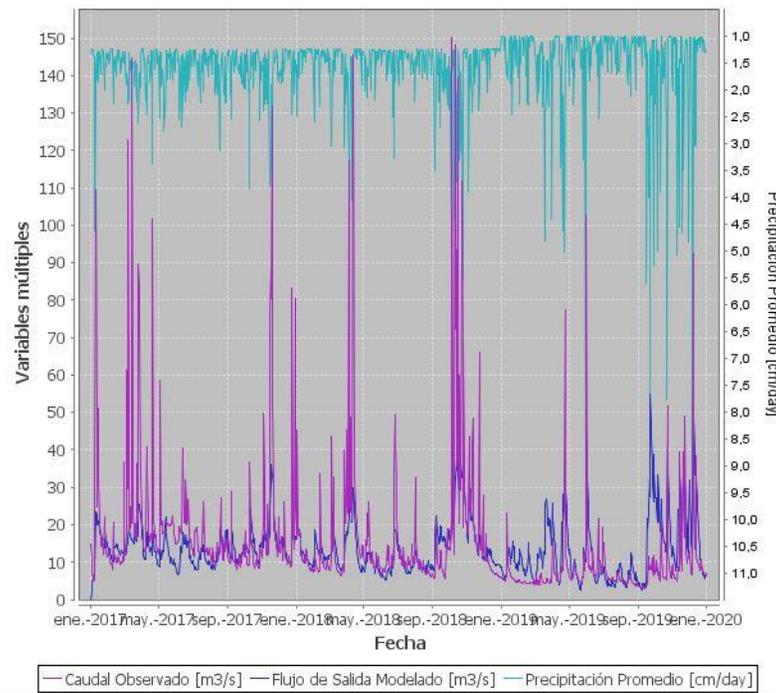
**Fuente: propia**

A continuación, en la gráfica 15 se muestra las series temporales de caudales, en la 16 la Curva de duración de flujo y en la 17 el mejor ajuste de regresión lineal de los datos observados versus los datos del modelo para las dos validaciones.

**Resultados Diarios**

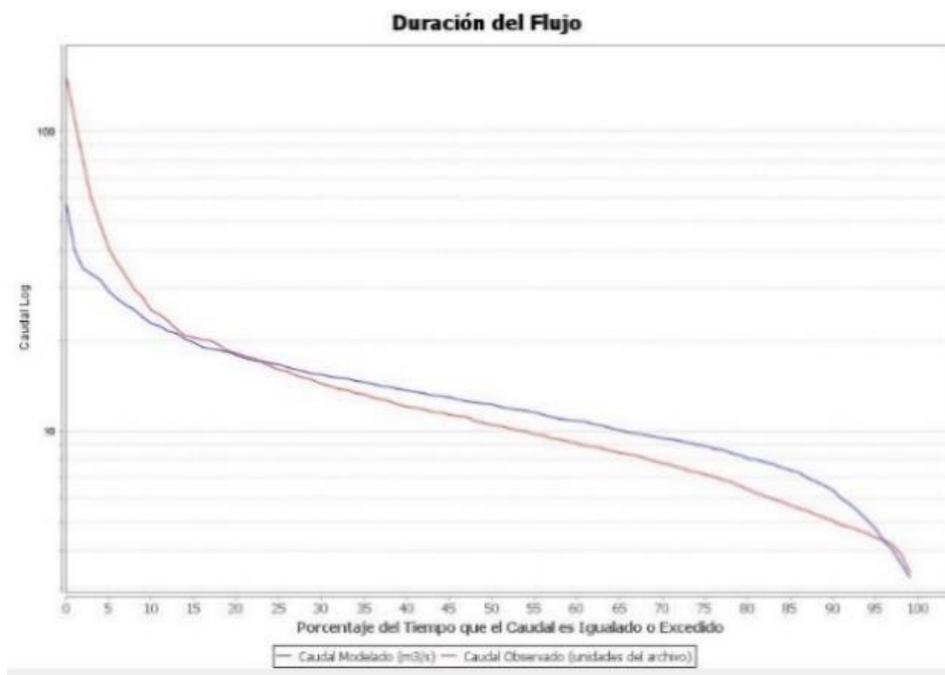
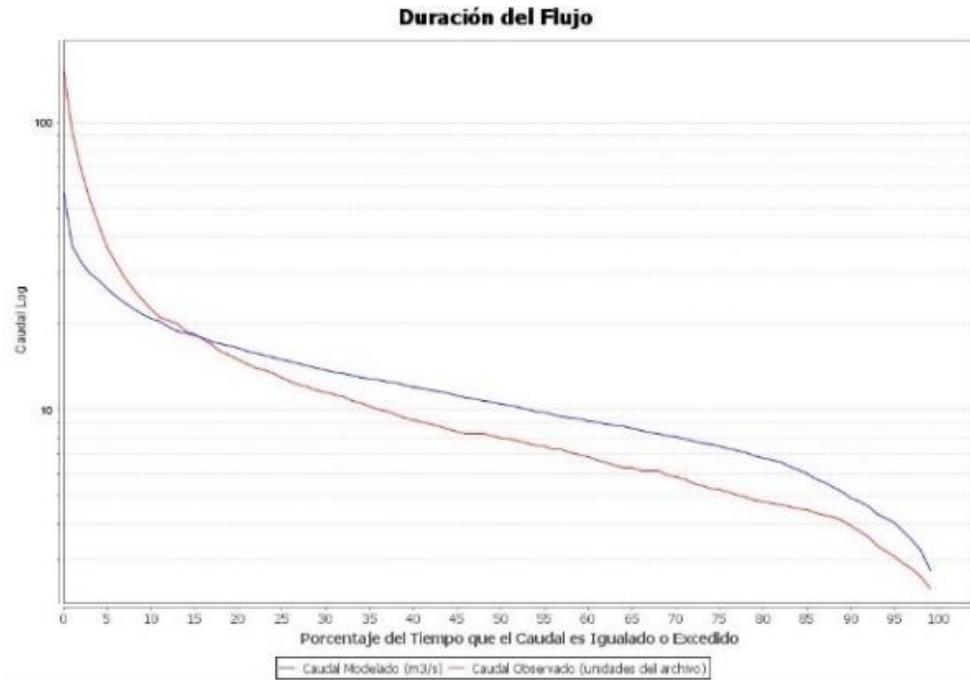


**Resultados Diarios**



**Grafica 15.** Hidrograma de resultados medios por día, para la validación de la estación Aguas Claras.

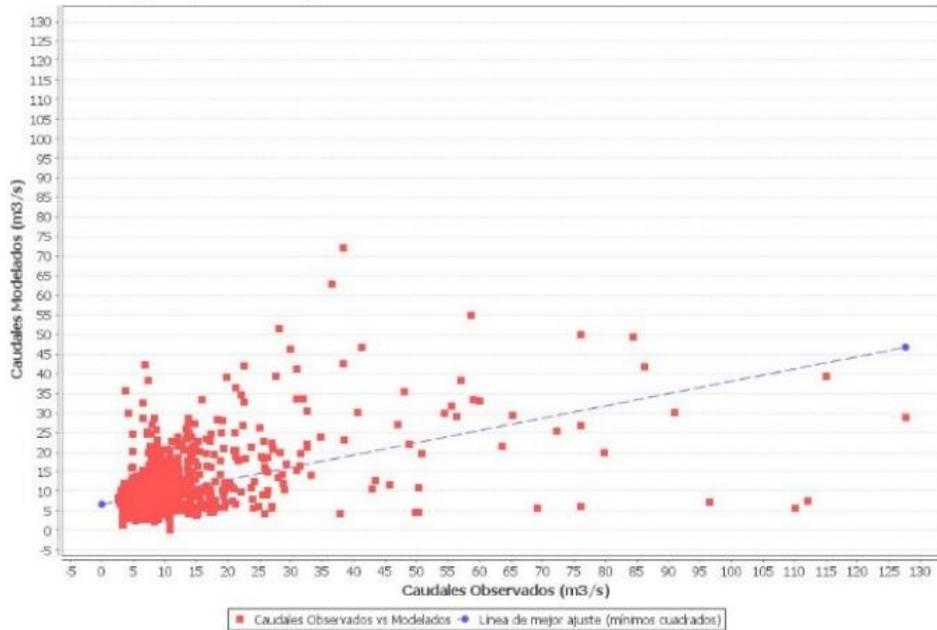
**Fuente:** propia



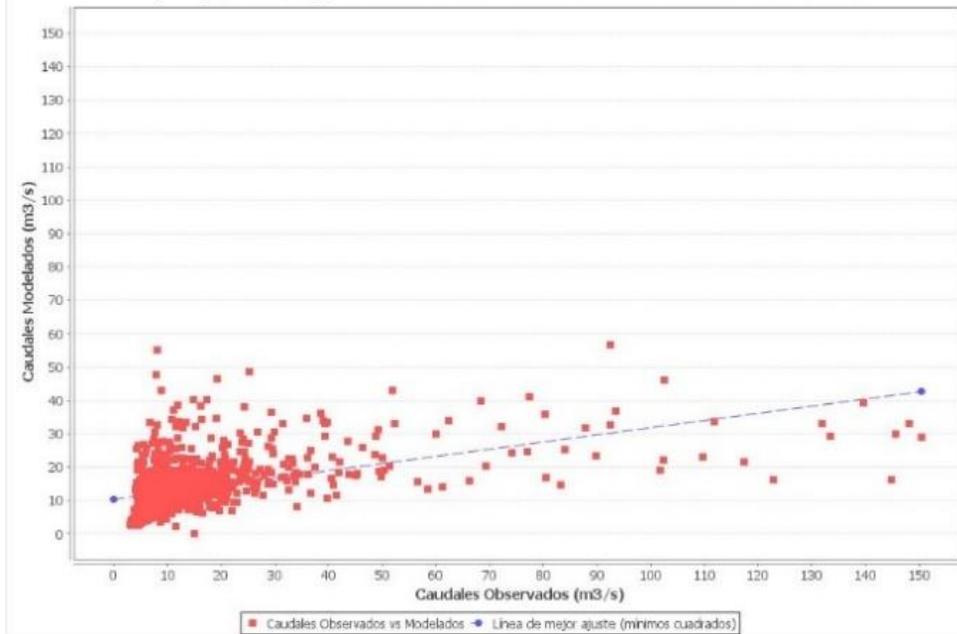
*Grafica 16. Curva de duración de flujo, para la validación de la estación Aguas Claras*

*Fuente: propia*

**Mejor ajuste de regresión lineal de caudales observados vs modelados**



**Mejor ajuste de regresión lineal de caudales observados vs modelados**



*Grafica 17. Gráfico de mejor ajuste de regresión lineal, para la validación de la estación Aguas Claras*

*Fuente: propia*

### 8.5 Fase 5: Obtención de caudales medios

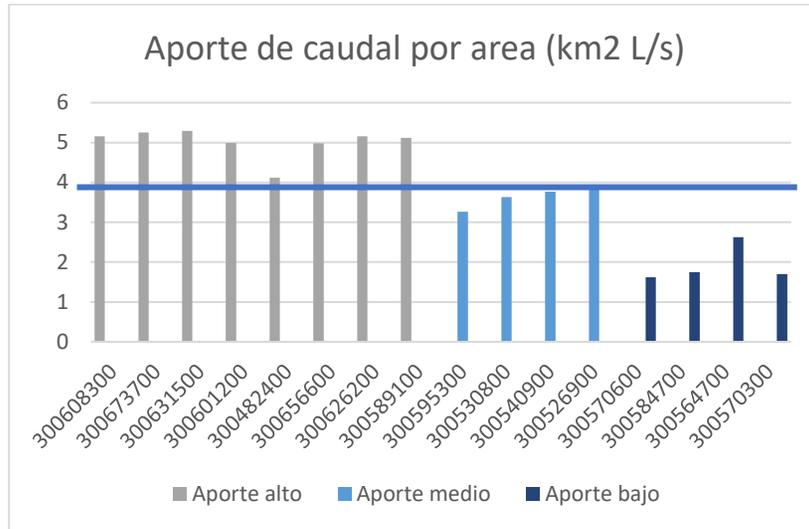
Finalmente, como resultado de la modelación hidrológica se obtuvo cada uno de los caudales medios por subcuenca, los cuales son mostrados a continuación en la tabla 12

Por otra parte, se muestra el indicador de aporte de caudal por área, tabal 12, con su respectivo comportamiento, grafica 17.

**Tabla 12.** Caudal e indicador de aporte de caudal por área.

COMID	AREA KM2	CAUDAL m3/s	cauda l/s	Indicador
300608300	558.819	2.882	2882	5.1573
300595300	61.22	0.2	200	3.26691
300673700	425.546	2.236	2236	5.25443
300631500	107.218	0.567	567	5.28829
300601200	680.637	3.396	3396	4.98944
300482400	2910.416	11.9823	11982.3	4.11704
300589100	892.85	4.567	4567	5.11508
300530800	71.554	0.26	260	3.63362
300656600	403.01	2.006	2006	4.97754
300626200	84.116	0.434	434	5.15954
300584700	106.326	0.186	186	1.74934
300564700	1619.44	4.252	4252	2.6256
300570300	105.876	0.18	180	1.7001
300540900	2595.067	9.784	9784	3.77023
300526900	2852.443	11.24	11240	3.94048
300570600	1421.034	2.296	2296	1.61572

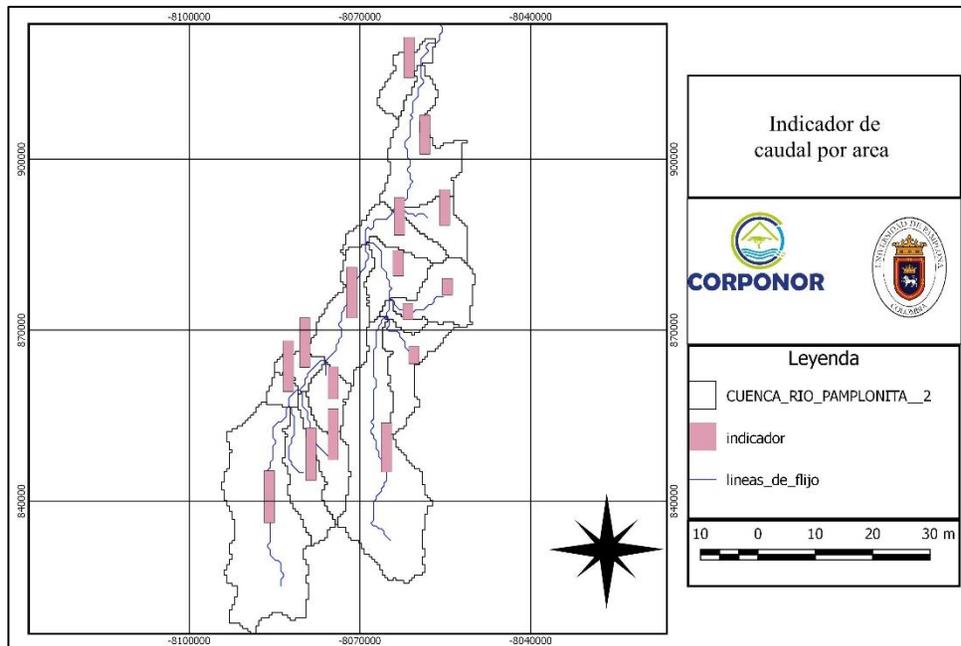
**Fuente:** propia



**Grafica 18.** Comportamiento de aporte de caudal por área.

**Fuente:** propia

De la misma forma en el mapa 3, se muestra el comportamiento del indicador de aporte de caudal por área en cada subcuenca.



**Mapa 4.** Indicador de aporte de caudal por área.

**Fuente:** propia

## **9. Discusión de resultados**

### **9.1 Sobre el ajuste de base de datos hidrometeorológicos**

Como resultado de la homogenización de los datos climáticos usando el método de curva doble masa, se observó que las pendientes no presentan variaciones significativas, evitando aplicar el coeficiente de ajuste. Este resultado se comprueba con el parámetro de ajuste R2, obteniéndose un nivel de significancia mayor al 95%.

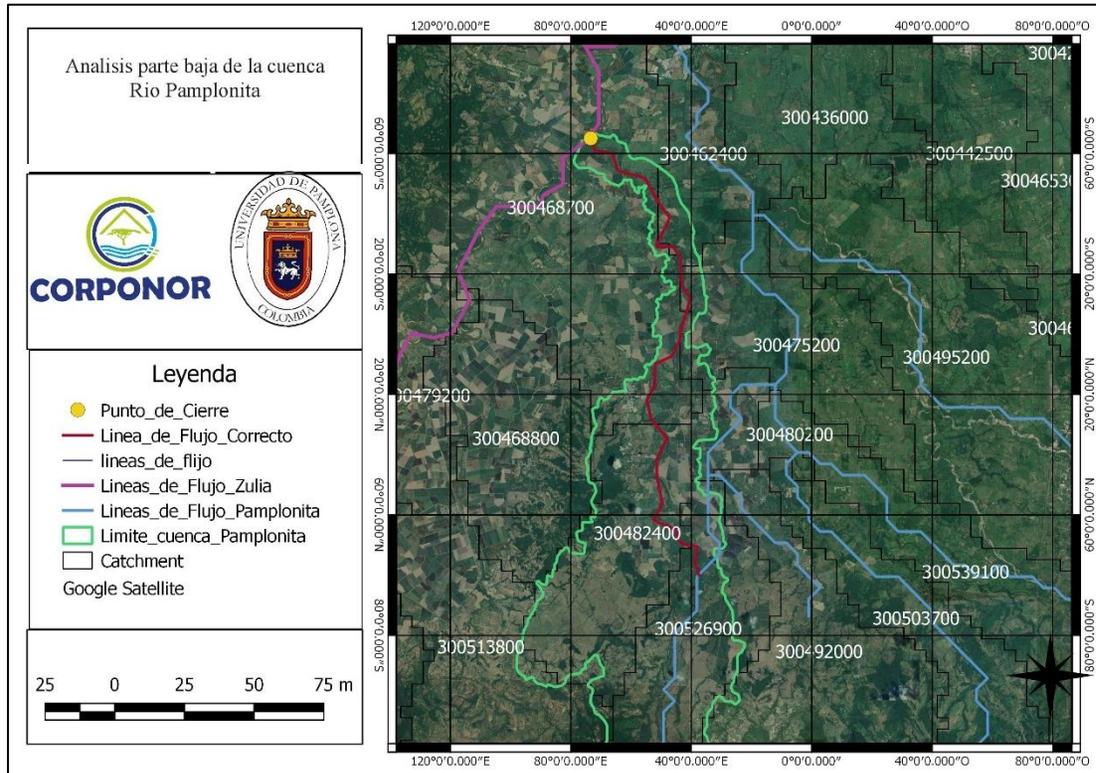
En cuanto a la homogenización y validación de los datos de caudal, se observó un desempeño óptimo ya que el parámetro de ajuste R2 consta de un nivel de significancia mayor al 95%.

### **9.2 Sobre la obtención de información de entrada para programa Hydro-BID.**

Para la delimitación de la cuenca río pamplonita realizando la respectiva navegación por la base de datos AHD, se omitió dos subcuencas en la parte baja de la cuenca identificadas con el COMID 300462400 y 300475200, dando el punto de cierre en la subcuenca 300482400, la razón de este procedimiento es explicado a continuación:

En el mapa 4 se presenta las subcuencas generadas en QGis para Hydro-BID, en donde la línea de color rojo indica la dirección de flujo del río Pamplonita, es decir actualmente en el software el flujo va de la cuenda identificada con el COMID 300526900 pasando por el 300482400 y 300475200 llegando al 300462400, debiendo pasar solo por el 300482400 y converger en COMID 300468700, además de una distribución de subcuencas inadecuada ya que las subcuencas deben estar acorde con el polígono delimitado de color verde, cabe aclarar que la delimitación mencionada fue realizada para la formulación del POMCA de esta cuenca, mediante recorrido en campo para la delimitación real de esta zona baja. En este sentido el error radica en que, en esta zona baja de la cuenca, presenta un relieve plano, dificultando al sistema

identificar la dirección de las líneas de flujo, la delimitación y distribución de las subcuencas partiendo desde imágenes satelitales.



*Mapa 5. Análisis parte baja de la cuenca Rio Pamplonita*

*Fuente: propia*

### 9.3 Sobre la calibración y validación del modelo

#### 9.3.1 calibración del modelo.

De manera inicial durante la calibración para la estación la Don Juana, se evidencio que los caudales modelos están subestimados, es decir en la gráfica 7 de duración de flujo se observa como el volumen simulado es menor al volumen observado, adicionalmente se puede observar la discordancia en los picos de caudal en la gráfica 6 de hidrograma medio diario. Para ello como primer paso se redujo el contenido disponible de agua o la cantidad de agua que puede ser almacenada en el suelo, las pérdidas por infiltración, el ET en temporada de cultivo y se aumentó

el número de curva (tipo de uso de suelo) y ET en temporada latente, todo lo mencionado con la finalidad de disminuir la infiltración y aumentar la escorrentía. Si bien esta variación mejoró considerablemente la diferencia en volumen, sin embargo, se observaron picos de caudales bajos, para ello se aumentó el coeficiente de recesión (R) ya que las aguas subterráneas cercanas a la superficie en un estado de saturación aportan agua al cauce, como es mostrados en la tabla 6 y en las gráficas 6, 7 y 8. Obteniendo unas métricas de desempeño dentro de los estándares establecidos, especialmente para los valores mensuales, tabla 7.

En cuanto a la calibración de la estación aguas claras, se observa una sobre estimación de los caudales simulados, es decir los caudales simulados son mayores a los observados, para ello se hizo necesario aumentar el coeficiente de percolación, disminuir el número de curva ya que este caracteriza el tipo de suelo y aumentar el ET en temporada de cultivo, y de esta forma aumentar la infiltración y disminuir el caudal. Para el ajuste de los caudales bajos se disminuyó el contenido disponible de agua y se aumentó el coeficiente de recesión  $r$ , debido a que CDA es el monto de agua que puede ser almacenado en el suelo afectando la infiltración hacia las aguas subterráneas, y el  $r$  al presentarse eventos de caudales altos en el río, se saturan las aguas subterráneas cercanas a la superficie contribuyendo a la escorrentía. Finalmente se observó algunos picos bajos de caudales donde se aumentó el factor ET en temporada latente, aumentando gradualmente los caudales altos, como es mostrado en la tabla 9 y graficas 12, 13 y 14. Obteniendo unas métricas de desempeño dentro de los estándares establecidos, especialmente para los valores mensuales, tabla 10.

### **9.3.2 validación del modelo.**

En cuanto a la validación de los parámetros hidrológicos se observó un ajuste adecuado, ya que las métricas de desempeño se encuentran dentro de los estándares óptimos, demostrando que

el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado, para períodos diferentes entre el período de calibración.

### **9.3.3 Sobre la sensibilidad de los parámetros de calibración de Hydro-BID.**

Durante las iteraciones de ajuste para la calibración se evidencio que los parámetros más sensibles al modelo son el Numero de curva (NC), ya que representa características del tipo de uso de suelo y representa la hidrología en el suelo, es decir la impermeabilización sujeta al mismo. Contenido Disponible de Agua (CDA) ya que es “el monto de agua que puede almacenarse en el suelo para ser usado por las plantas, afectando la infiltración hacia las aguas subterráneas. Coeficiente de recesión (r) ya que el agua subterránea cerca de la superficie contribuye a los caudales en los ríos después de un evento de grandes caudales debido a la saturación de los acuíferos subterráneos y el Coeficiente de percolación (s) debido al intercambio entre agua cerca de la superficie hacia las zonas más profundas del terreno y los acuíferos” (Nalesso & Coli, 2017).

## **9.5 Sobre obtención de caudales medios**

### **9.5.1 Parte alta.**

La parte alta de la cuenca hidrográfica presenta una relación de aporte de caudal por área muy similar entre subcuencas, Por otra parte, como se muestra en la gráfica 17 estas subcuencas constan de un aporte de caudal por área, alto, específicamente las subcuencas identificadas con el COMID 300673700, 300631500, 300626200 y 300656600. Lo mencionado se debe a que los factores de cobertura, uso del suelo, tipo de suelo, geomorfología y climatología de estas subcuencas son similares.

### **9.5.2 Parte media de la cuenca.**

En la parte media de la cuenca, donde se ubican las intercuenas 300608300, 300589100 y 300601200 presentan un comportamiento similar, con índices de aporte caudal por área alto, como se muestra en la gráfica 17, debido a que poseen un factor topográfico similar, pero difieren de cobertura y usos del suelo. La primera intercuenca mencionada consta de bosques secundarios, suelos de protección y suelo rural, por el contrario, en las intercuenas 300589100 y 300601200 se caracterizan por bosques densos, abiertos y suelos de uso urbano. Por otro lado, la subcuenca 300595300 presenta un aporte de caudal por área medio, debido a que esta zona consta de un uso de suelo urbano, bosques abiertos y baja vegetación. En la subcuenca 300584700 se observa un bajo índice de aporte de caudal por área, ya que presenta una cobertura vegetal de bosque seco y climatológicamente de índices seco.

### **9.5.3 Parte baja de la cuenca.**

En la parte baja de la cuenca hidrográfica, se observa en las subcuencas 300540900, 300530800, 300526900 un comportamiento de relación caudal área medio, grafica 17, debido a la presencia de baja cobertura y predominantemente bosques secos, zonas de uso de suelo urbana y suburbano. En cuanto a las subcuencas 300564700 y 300570300 constan de un aporte de caudal por área bajo ya que es una zona climatológicamente seca, con una cobertura vegetal de bosques seco y uso de suelo urbano. Finalmente, en la intercuenca de cierre 300482400 se observa un aporte de caudal por área alto, debido a que en esta zona de Puerto Santander presenta una atmosfera húmeda procedente de la zona venezolana del lago Maracaibo.

## **10. Conclusiones**

- Es de vital importancia contar con la mayor cantidad de estaciones meteorológicas ya que mejora en gran medida la modelación que utiliza Hydrobid para interpolar los datos climáticos, mientras más estaciones meteorológicas promedien los datos mejor serán los valores promedios asignados a cada subcuenca.
- La calidad de los datos descargados es primordial al momento de realizar un modelo hidrológico en Hydrobid, ya que de eso depende el proceso de calibración, de datos confiables y que representen los eventos climáticos verdaderos que se han presentado en la serie histórica de datos.
- La validación de los datos climáticos para comprobar su calidad es de gran importancia ya que, si los datos están dentro de los estándares óptimos permisibles, se tendrá una interpolación climática muy cercana a la realidad. Para el modelo realizado se obtuvo una validación de datos hidrometeorológicos con un nivel de significancia mayor al 95%, convirtiéndolo en insumo seguro para el modelo implementado.
- El conocimiento en campo del lugar de estudio es importante al momento de la delimitación de la cuenca, ya que esto ayuda a una adecuada delimitación acorde a la realidad, verificando que los polígonos de la base de datos AHD del BID estén acorde o ajustada al contexto de la cuenca hidrográfica en estudio.
- Es importante tener en cuenta los formatos y unidades establecidos por los requerimientos técnicos del programa, ya que esto disminuye las probabilidades de obtener error al momento de correr el modelo.

- Utilizando los datos de caudal observados de la serie hidrológicas ajustados mediante el programa Matlab, se obtuvo una calibración óptima, ya que los caudales simulados se aproximan a los observados. Por otra parte, las métricas de desempeño se encuentran en los rangos propuestos, especialmente para los datos mensuales.
- Al momento de la validación se demostró que los parámetros hidrológicos obtenidos de la calibración son óptimos, ya que el modelo puede hacer predicciones en períodos diferentes dentro del período de calibración.
- Con la modificación del punto de cierre de la cuenca se logró un mejor ajuste acorde a la realidad, ya que los parámetros tanto de calibración como de validación se encuentran dentro de los rangos óptimos establecidos.
- En las cuatro subcuencas ubicadas en la parte alta de la cuenca presentan un aporte de caudal por área alto, ya que las condiciones biofísicas de las subcuencas favorecen la regulación hídrica.
- La parte media de la cuenca presenta una variedad de regulación hídrica debido a las diferentes condiciones biofísicas entre subcuencas.
- En la parte baja, las subcuencas presentan diferentes aportes de caudal por área, una de ellas es influenciada por la atmósfera húmeda procedente de la zona venezolana del lago Maracaibo, tres de ellas con influencias de bosques secos y baja cobertura para un aporte de caudal por área medio, y finalmente una con aporte bajo de caudal por área, relacionada al uso de suelo, cobertura vegetal y condiciones climáticas.

## **11. Recomendación**

- Para futuros estudios de la cuenca del Rio Pamplonita es trascendental la corrección del shafle catchment y Flowline proporcionados por el BID, y mejorar la precisión de los resultados proporcionados por el modelo hidrológico.

## **12. Bibliografía**

- Bateman, A. (2007). Hidrología básica y aplicada. *Grupo de Investigacion En Transporte de Sedimentos*. <https://www.upct.es/~minaees/hidrologia.pdf>
- Bolívar Alexander, T. G. (2020). Plan de gestión de recurso hídrico para una microcuenca interandina usando el modelo hidrológico Hydro-BID. *Universidad Internacional SEK*. [https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4013/1/Bolívar Alexander Tandalla Guanoquiza.pdf](https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/4013/1/Bolívar%20Alexander%20Tandalla%20Guanoquiza.pdf)
- Cabrera, J. (n.d.). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Universidad Nacional de Ingeniería*. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Caja de Herramientas de Hidrología para POMCAS. (2010). *Cuenca del Rio pamplonita*. <https://sites.google.com/site/hydrotoolbox/casos-de-estudio/cuenca-rio-pamplonita>
- Centro de soporte Hydro-BID. (2018). *Variables de Calibración y rangos recomendados*.
- Congreso de la República de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*. <https://www.habitatbogota.gov.co/transparencia/normatividad/normatividad/ley-99-1993#:~:text=Descripción%3A,y se dictan otras disposiciones.>
- Cordova, R. J. R., & Rodriguez, I. I. (2015). El ciclo hidrológico y su significación ecológica. *Researchgate.Net*. [https://www.researchgate.net/publication/309203780\\_El\\_ciclo\\_hidrologico\\_y\\_su\\_significacion\\_ecologica](https://www.researchgate.net/publication/309203780_El_ciclo_hidrologico_y_su_significacion_ecologica)
- CORPONOR. (2010). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del rio Pamplonita. *Resumen Ejecutivo*.

[https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/22602/37-POMCH\\_Pamplonita\\_ajustado.pdf?sequence=1](https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/22602/37-POMCH_Pamplonita_ajustado.pdf?sequence=1)

CORPONOR. (2014). *Tomo III: Caracterización y diagnóstico de la cuenca del Río Pamplonita.*

[https://corponor.gov.co/publica\\_recursos/pomca/TOMO\\_III\\_DIAGNOSTICO.pdf](https://corponor.gov.co/publica_recursos/pomca/TOMO_III_DIAGNOSTICO.pdf)

Díaz, P. V. G., & Suárez, A. M. R. (2019). Modelación hidrológica para el pronóstico de sequías en la cuenca del río pamplonita bajo escenarios de cambio climático. *Universidad Santo Tomás.*

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/15306/2019pauladiaz.pdf?sequence=10&isAllowed=y>

Escurre, J., Moreda, F., Brantly, E., & Valdes, D. P. C. (2016). Estudio de caso Hydro-BID No. 3: Impacto de los eventos de El Niño en la carga de sedimentos en la cuenca Chancay-Lambayeque, Perú. *IDB.*

<https://publications.iadb.org/publications/english/document/Hydro-BID-Case-Study-No-3-Impact-of-El-Niño-Events-on-Sediment-Loading-in-the-Chancay-Lambayeque-Basin-Peru.pdf>

Faustino, J., & Jiménez, F. (2000). Centro agronomico tropical de investigación y encción area de cuencas y Centro agronomico tropical de investigación y encción area de cuencas y sistemas agroforestales. *Manejo de Cuencas Hidrograficas.*

<http://www.sidalc.net/REPDOC/A5762E/A5762E.PDF>

Fibras y Normas de Colombia. (2004). *Caudal: Definición y metodos de definición.*

<https://blog.fibrasynormasdecolombia.com/caudal-definicion-y-metodos-de-medicion/>

Gelvis, W. M., & Noreña, L. M. G. (2015). Proyecto de Investigación. *Universidad Francisco de Paula Santander*. <https://es.scribd.com/document/419109297/anteproyecto-metologia-de-la-investigacion-docx>

Gestor Normativo. (2002). *DECRETO 1729 DE 2002*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5534>

GreenFacts. (2020). Agua dulce. *Factes on Heath and the Enviroment*.

<https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/agua-dulce.htm#:~:text=Definición%3A,pero no en los océanos.&text=Más%3A,de mar o agua salobre>.

Ibáñez Asensio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2009). Morfología de las cuencas hidrográficas. *Universidad Politecnica de Valencia*.

[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfología de una cuenca.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfología%20de%20una%20cuenca.pdf)

IDEAM. (2012). *República de Colombia Precipitación Total*.

<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/1287468/V1.01+HM+Precipitacion.pdf/fcfae51a-853d-42c9-8d99-02d23766b9b6>

IDEAM. (2014). *Modelos hidrológicos*. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=En un modelo hidrológico%2C el,los componentes del ciclo hidrológico>.

Minambiente. (2007). Decreto 1323 de 2007. 2007.

[https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec\\_1323\\_2007.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2007/dec_1323_2007.pdf)

Minambiente. (2012). *Decreto 1640 de 2012*.

[https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2012/dec\\_1640\\_2012.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/decretos/2012/dec_1640_2012.pdf)

Minambiente. (2013). *Decreto 953 de 2013*.

<https://www.minambiente.gov.co/index.php/negocios-verdes-y-sostenibles/instrumentos-economicos/decreto-953-del-17-de-mayo-de-2013#:~:text=Mediante el Decreto 953 del,Pago por Servicios ambientales - PSA.>

Minambiente. (2018). *Decreto 1090 de 2018*.

<https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/decretos/7b-decreto 1090 de 2018.pdf>

Minambiente. (2020). *Gestión Integral del Recurso Hídrico. Agencia Nacional Del Agua*.

<https://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico#>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1972). *Decreto 2811 de 1974*.

[https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto\\_2811\\_de\\_1974.pdf](https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Decreto_2811_de_1974.pdf)

Moreda, F., Benjamin, S., Nalesso, M., Daussa, P. C. V., & Corrales, J. (2016). *Hydro-BID:*

*Nuevas Funcionalidades (Módulos de Simulación de Embalses, Transporte de Sedimentos y de Aguas Subterráneas).*

Moreda, F., Miralles, F., & Muñoz, C. R. (2014). *Hydro-BID: Un Sistema Integrado para la*

*Simulación de Impactos del Cambio Climático sobre los Recursos Hídricos. Parte 2. Banco Interamericano de Desarrollo.*

<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Hydro-BID-Un-sistema-integrado-para-la-simulación-de-impactos-del-cambio-climático-sobre-los-recursos-hídricos-Parte-2.pdf>

- Moreda, F., Serago, J., Escurra, J., Brantly, E., Valdés, P. C., & Daussa. (2017). Estudio de caso Hydro-BID No. 5: Impacto del cambio climático en las inversiones propuestas en agua en la cuenca del Chalpi, Ecuador. *IDB*.  
<https://publications.iadb.org/publications/english/document/Hydro-BID-Case-Study-No-5-Impact-of-Climate-Change-on-Proposed-Water-Investments-in-Chalpi-Basin-Ecuador.pdf>
- Nalesso, M. (2020). El Departamento de Santander en Colombia ya cuenta con HydroBID. *Agua, Saneamiento y Residuos Sólidos*. <https://blogs.iadb.org/agua/es/el-departamento-de-santander-en-colombia-ya-cuenta-con-hydrobid/>
- Nalesso, M., & Coli, P. (2017). Hydro-BID, Guía paso a paso. *BID*, 4.
- Ordoñez, J. J. G. (2011). Cartilla técnica, aguas subterráneas y acuíferos. *Sociedad Geográfica de Lima*. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/cuenca\\_hidrologica.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf)
- Pizarro, R., Manuel, S., Farias, C., & Jordan, C. (2005). Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. *Bosque*.  
[https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-92002005000200015](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002005000200015)
- Rineer, J., & Bruhn, M. (2014). Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe. *Modelo Integrado de Cambio Climático y Recursos Hídricos*.  
[http://sp.hydrobidlac.org/assets/site\\_32/files/base de datos hidrográficos para alc.pdf](http://sp.hydrobidlac.org/assets/site_32/files/base%20de%20datos%20hidrograficos%20para%20alc.pdf)
- Rodríguez, R., L, Greg Magninhugo, M., Menchi, Logo, H., & Cdang, D. (2012). Calor y Temperatura. *Apuntes Marea Verde*.

[https://www.apuntesmareaverde.org.es/grupos/cn/Temas\\_2/T9\\_2ESO\\_Calor\\_Temperatura\\_v2016.pdf](https://www.apuntesmareaverde.org.es/grupos/cn/Temas_2/T9_2ESO_Calor_Temperatura_v2016.pdf)

Sabater, S., & Elosegui, A. (2009). Conceptos y Técnicas en Ecología Fluvial. *Fundación BBVA*.

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=376923>

Sánchez, M. B. (2020). Parque Río Pamplonita Eje ambiental y recreativo de la ciudad de

Cúcuta. *Universidad Javeriana*.

[https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/49911/Parque Río Pamplonita.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/49911/Parque_Rio_Pamplonita.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015*.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=78153>

UNESCO. (2019). *Informe Mundial de Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos*

*hidrico*. <https://www.acnur.org/5c93e4c34.pdf%0A%0A>