

BLASTOISE, SOFTWARE DE CÁLCULOS HIDROLÓGICOS PARA LA
OBTENCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS MEDIANTE EL MODELO HEC - HMS

Jairo Alexander Chocontá Bejarano Código - 507394
Cristian Ricardo Guevara Carrillo Código - 504830



Universidad Católica de Colombia
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
Bogotá D.C., Colombia
2020

BLASTOISE, SOFTWARE DE CÁLCULOS HIDROLÓGICOS PARA LA
OBTENCIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS MEDIANTE EL MODELO HEC - HMS

Jairo Alexander Chocontá Bejarano Código - 507394
Cristian Ricardo Guevara Carrillo Código - 504830

Trabajo de Grado para optar por el Título de Ingeniero Civil

Asesor
Jesús Ernesto Torres Quintero, Ingeniero Civil Magíster (MSc) en recursos
hidráulicos.



Universidad Católica de Colombia
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
Bogotá D.C., Colombia
2020



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)
Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

NOTA DE ACEPTACIÓN

ING. JESÚS ERNESTO TORRES QUINTERO
Asesor de Proyecto

Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., diciembre de 2020

CONTENIDO

GLOSARIO.....	13
RESUMEN	15
ABSTRACT	15
INTRODUCCIÓN.....	16
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.....	17
1.1 LINEA DE INVESTIGACIÓN.....	17
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.2.1 Formulación del problema	17
1.2.2 Antecedentes	19
1.2.3 Pregunta de investigación.....	22
1.2.4 Alcances y limitaciones del estudio	22
1.3. Justificación.....	23
1.4 Objetivos	25
1.4.1 Objetivo general	25
1.4.2 Objetivos específicos	25
2. MARCO DE REFERENCIA.....	26
2.1 Marco conceptual.....	26
2.1.1 Conceptos utilizados para hidrología.	26
2.1.2 Conceptos relacionados con el desarrollo del software	36
2.2 Marco teórico	37
2.2.1 Primeras aproximaciones al concepto de estudio hidrológico.....	37
2.3 Marco geográfico	38
2.4 Marco demográfico	41
2.5 ESTADO DEL ARTE	42
2.5.1 Investigaciones internacionales.....	42
2.5.2 Investigaciones nacionales	44
3. METODOLOGÍA.....	48
3.1 Metodología abordada para el estudio hidrológico	48

3.2 Metodología abordada en el desarrollo del software BLASTOISE	49
4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA	51
4.1 FASE 1: Recolección de información.	52
4.1.1 Obtención del DEM	53
4.1.2 Delimitación de la cuenca	54
4.1.3 Caracterización morfométrica de la cuenca en el sistema SIG	55
4.2 FASE 2: Caracterización morfométrica Cuenca Alta del Río Partadó	56
4.2.1 Parámetros físicos de la cuenca	56
4.2.2 Parámetros de forma de la cuenca	58
4.3 Parámetros morfométricos de la cuenca	62
4.3.1 Parámetros de relieve	64
4.3.2 Parámetros de drenaje	75
4.3.3 Tiempos de concentración	78
4.3.4 Curva Número	81
4.4. Descripción de la cuenca hidrográfica.....	83
4.4.1 Estaciones climatológicas cercanas al Río Juradó	84
4.5. Análisis de precipitación y temperatura	84
4.5.1 Precipitación	85
4.5.2 Precipitación máxima en 24 horas	87
4.5.3 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia IDF	88
4.5.4 Hietogramas de precipitación	92
4.6 Temperatura	96
4.6.1 Temperatura media	97
4.7 Balance Hídrico.....	98
4.8 Evapotranspiración	99
4.8.1 Evapotranspiración Potencial	100
4.8.2 Evapotranspiración real	102
5. PRODUCTOS A ENTREGAR.....	105
6.1 FASE TRES: Resultados y validación de BLASTOISE	105
7. CONCLUSIONES.....	110
8. RECOMENDACIONES.....	112
9. TRABAJOS FUTUROS.....	113
BIBLIOGRAFÍA	114

ANEXOS	118
ANEXO 1. Datos de precipitación máxima en 24 horas de la Estación hidrometeorológica pluviométrica del departamento del Chocó CUPICA – 56010030.....	118
ANEXO 2. Aforo Río Partadó pequeña central hidroeléctrica pch Juradó.	119
ANEXO 3. Código de ecuaciones de parámetros de drenaje	120
ANEXO 4. Código de ecuaciones de parámetros de intensidad máxima para diferentes períodos de retorno	122
ANEXO 5. Código de ecuaciones de balance hídrico y ETP	126
ANEXO 6. Medición de serie de caudales medios mensuales desde el año 1972 hasta 1988.	137
ANEXO 7. Manual de Instalación.....	138
ANEXO 8. Manual del Usuario.....	141

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Componentes básicos hidrograma unitario	27
Ilustración 2. Geología del municipio de Juradó	28
Ilustración 3. Cobertura vegetal departamento del Chocó	31
Ilustración 4. Mapa hidrográfico departamento del Chocó	33
Ilustración 5. Localización de Juradó en Colombia	38
Ilustración 6. Localización de la cuenca del Río Partadó	39
Ilustración 7. Vista satelital del Río Partadó	41
Ilustración 8. Pirámide poblacional por rangos de edad Juradó	42
Ilustración 9. Proceso metodológico de las fases en la modelación hidrológica	49
Ilustración 10. Metodología en cascada usada en el desarrollo del software	50
Ilustración 11. Complementación de las dos metodologías	52
Ilustración 12. Delimitación del área de estudio.	53
Ilustración 13. Resultado de la búsqueda ALOS PALSAR con la clasificación DEM seleccionada	54
Ilustración 14. Selección DEM obtenida en ArcGIS	55
Ilustración 15. Obtención del Modelo Digital de Elevación	56
Ilustración 16. Mapa topográfico del Río Partadó	63
Ilustración 17. Modelo digital de elevación logrado.	64
Ilustración 18. Clasificación de los ríos según la curva hipsométrica	67
Ilustración 19. Interfaz de Menú de inicio de BLASTOISE	71
Ilustración 20. Interfaz de parámetros de drenaje	71
Ilustración 21. Interfaz de Balance Hídrico	72
Ilustración 22. Interfaz de IDF - Hietogramas	72
Ilustración 23. Interfaz de Submenú Hietogramas	73
Ilustración 24. Interfaz de Conexión IDEAM	73
Ilustración 25. Perfil del cauce Principal de la cuenca del Río Partadó	76
Ilustración 26 . Red de drenajes de la cuenca del Río Partadó	78
Ilustración 27. Clasificación del suelo por el método S.C.S.	81
Ilustración 28. Descripción uso del suelo por el método S.C.S.	82
Ilustración 29. Representación de la imagen de la cuenca del Río Partadó en HEC- HMS.....	105
Ilustración 30. Ingreso de CN obtenido con BLASTOISE	106
Ilustración 31. Exportar datos de precipitación a Excel	107
Ilustración 32. Pasando datos de precipitación obtenidos desde BLASTOISE a HEC - HMS.....	107
Ilustración 33. Caudal máximo del Río Partadó para un período de retorno de 50 años	108
Ilustración 34. Representación del hietograma de precipitación ejecutado en HEC - HMS.....	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización Morfométrica de la Red Hídrica	34
Tabla 2. Área de la cuenca hidrográfica del Río Partadó	57
Tabla 3. Perímetro de la cuenca hidrográfica del Río Partadó	57
Tabla 4. Longitud recta de la cuenca hidrográfica del Río Partadó	57
Tabla 5. Ancho de la cuenca hidrográfica del Río Partadó	58
Tabla 6. Índice de compacidad para la evaluación de la forma	59
Tabla 7. Índice de Graveluis de la cuenca del Río Partadó	59
Tabla 8. Clasificación del factor de forma	60
Tabla 9. Factor de forma de la cuenca del Río Partadó	61
Tabla 10. Clasificación del Índice de alargamiento	61
Tabla 11. Índice de alargamiento de la cuenca del Río Partadó	62
Tabla 12. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente	65
Tabla 13. Pendiente media de la cuenca del Río Partadó	66
Tabla 14. Elevación media de la cuenca del Río Partadó	67
Tabla 15. Clasificación del Río Partadó de acuerdo a la curva hipsométrica	68
Tabla 16. Requerimientos de Interfaces Externas	69
Tabla 17. Requerimientos Funcionales	70
Tabla 18. Longitud del cauce principal de la cuenca Río Partadó	75
Tabla 19. Punto de mayor elevación cauce principal del Río Partadó.	76
Tabla 20. Punto de menor elevación cauce principal del Río Partadó.	77
Tabla 21. Pendiente media del cauce principal de la cuenca Río Partadó	77
Tabla 22. Tiempos de concentración estimados con Excel	80
Tabla 23. Tiempos de concentración estimados con BLASTOISE	81
Tabla 24. Resultados de CN estimados con Excel	83
Tabla 25. Resultados de CN estimados con BLASTOISE	83
Tabla 26. Codificación e implementación del objetivo específico número uno	83
Tabla 27. Precipitaciones medias mensuales obtenidas estación Cupica	86
Tabla 28. Parámetros de ajuste Región pacífica	89
Tabla 29. Valores estimados de intensidad máxima para diferentes periodos de retorno con Excel	90
Tabla 30. Valores estimados de intensidad máxima para diferentes periodos de retorno con BLASTOISE.	91
Tabla 31. Valores estimados de intensidad máxima Método de Bloques Alternos con Excel	93
Tabla 32. Valores estimados de intensidad máxima Método de Bloques Alternos con BLASTOISE.	94
Tabla 33. Codificación e implementación de ecuaciones de tablas 30 y 32	95
Tabla 34. Temperaturas medias mensuales obtenidas estación La Teresita	97
Tabla 35. Resumen de temperatura media mensual de cada mes y precipitación ingresadas a BLASTOISE	99

Tabla 36. Factores de corrección de evapotranspiración mensual, dados por el método de Thorntwaite.....	101
Tabla 37. Resumen de resultados de ETP y balance hídrico	103
Tabla 38. Resumen de resultados de variables de índice de humedad e índice de aridez.....	104
Tabla 39. Codificación e implementación del objetivo específico número dos	104
Tabla 40. Valores de caudales máximos para tiempos de retorno con HEC – HMS	109

LISTA DE GRÁFICOS

Grafica 1. Caudales medios mensuales Río Partadó.....	46
Grafica 2. Curva de Duración de Caudales mensuales Multianuales Río Partadó	47
Grafica 3. Curva Hipsométrica del cauce principal cuenca del Río Partadó	68
Grafica 4. Precipitación total mensual Estación Cupica	87
Grafica 5. Precipitación Máxima en 24 Horas Estación Cupica.....	88
Grafica 6. Curvas IDF a partir de la Precipitación total mensual Estación Cupica, BLASTOISE	92
Grafica 7. Hietograma de Precipitación de la cuenca del Río Partadó	95
Grafica 8. Temperatura Media Estación La Teresita	98

AGRADECIMIENTOS

Por medio de estas líneas queremos reconocer y dar las gracias a las personas que de distintas formas nos aportaron de su ayuda, su tiempo y esfuerzo, lo cual fue indispensable durante el camino de culminar nuestra carrera.

Primeramente, a Dios, por servir de guía en todo el recorrido de nuestras vidas y ser la principal fuente de energía y persistencia contra tiempos difíciles.

A nuestras familias por apoyarnos en cada decisión, en cada nuevo proyecto y ser ellos quienes nos han inculcado los valores y principios que nos hacen crecer como personas. Gracias por contribuir con su acompañamiento en el desarrollo de este trabajo de grado.

Al ingeniero Jesús Ernesto Torres Quintero por compartirnos sus conocimientos como docente desde la asignatura de hidrología, y prestar su asesoría en este trabajo.

Agradecemos también a cada uno de los docentes que hicieron parte integral de nuestro proceso de aprendizaje, porque fueron un eje fundamental en nuestra formación como ingenieros civiles y a la Universidad Católica de Colombia por abrir sus puertas y darnos las metodologías de formación preparándonos como personas íntegras.

DEDICATORIA

Una muy especial dedicatoria a nuestras madres por ser el apoyo indispensable de nuestras vidas, por sus consejos, cuidados, el cariño y el afecto que nos brindan al vernos enfrentar cada obstáculo demostrándonos que nunca estamos solos. Merecen este y todos los esfuerzos que estén por venir en nuestra vida profesional.

A nuestros hermanos y a cada integrante de nuestras familias, por ser un ejemplo de sabiduría y por hacer posible la finalización de esta etapa de nuestras vidas prestando su ayuda, paciencia y acompañamiento.

GLOSARIO

API: Una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) define un conjunto de directivas y protocolos que pueden ser usados para desarrollar e integrar el software de las aplicaciones.

CAR: Las Corporaciones Autónomas Regionales son entidades encargada de manejar bajo la ley la administración del medio ambiente y los recursos naturales renovables encaminada al desarrollo sostenible del país. Son elementos corporativos de carácter público y las integran entidades territoriales.

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA: Es un sistema que consiste en un territorio irrigado por un conjunto de ríos, afluentes y subafluentes en el cual sus aguas fluyen todas hacia un mismo río, lago o mar.

CLASES(Programación): Una clase es una plantilla o una descripción de un conjunto de objetos similares, se compone con datos y métodos de las propiedades comunes del conjunto y sirven para abstraer datos y sus operaciones incorporadas.

CUENCA HIDROGRÁFICA: Una cuenca hidrográfica se puede entender como un territorio donde el agua drena a un mismo cuerpo de agua. Desde su nacimiento (cuenca alta), pasando por su parte media y la cuenca baja, este sistema forma un río principal y todos sus territorios asociados entre el origen del río y su desembocadura.

CURVAS IDF: La curva de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) son una relación entre la intensidad de una precipitación, intervalos de diferente duración correspondientes todos ellos al mismo período de retorno o frecuencia. Es una de las herramientas más utilizadas en la estimación de tormentas de diseño en sitios con falta de información de caudales y aforos.

HEC-HMS: Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System (HEC – HMS) es un software de simulación hidrológica destinado a estimar caudales máximos dadas condiciones extremas de lluvias, aplicando para este fin cálculo de hietogramas, pérdidas por infiltración, flujo base y escorrentía. Fue creado por el Centro de Ingeniería Hidrológica dentro del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos.

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales es el organismo gubernamental responsable de utilizar los datos y la información hidrológica, meteorológica y todo lo relacionado con el medio ambiente en Colombia.

MÉTODOS(Programación): Bloque de código que incluye una colección de instrucciones.

NÚMERO DE CURVA (CN): Es un método que desarrolló el S.C.S. que permite calcular la precipitación efectiva en función de características propias de la cuenca como son la topografía, la cubierta superficial y las propiedades hídricas del suelo.

OBJETOS(Programación): Dentro de la POO, un objeto es una entidad que contiene un estado y un comportamiento.

PARADIGMA(Programación): Forma de organizar los lenguajes de programación en función de acuerdo con sus características.

PERÍODO DE RETORNO (T): Es un concepto estadístico que intenta proporcionar un estimativo de ocurrencia de un evento determinado en términos de un período determinado. También se define como el intervalo de recurrencia promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud especificada.

POO: La programación orientada a objetos es un paradigma en el que los datos son encapsulados en objetos, los cuales tienen su propio comportamiento.

S.C.S.: El Soil Conservation Service (SCS) originalmente llamado Natural Resources Conservation Service (NRCS) es una dependencia del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) que posibilita información técnica a agricultores y propietarios de tierras.

RESUMEN

Esta investigación de enfoque cuantitativo presenta la elaboración de un software que busca servir de herramienta para calcular ecuaciones de hidrología usadas principalmente en los ríos donde hay escasez de datos de régimen de caudales. Este trabajo se desarrolló en C# desde el entorno de programación de Visual Studio y su aplicación se basó en seguir la metodología HEC – HMS simplificando parte del tratamiento matemático que se debe dar a los datos de precipitación y temperatura hasta ser usados en la simulación de la cuenca. Adicionalmente, se procura que la aplicación cuente con una interfaz más amigable y fácil de manipular para el usuario y presente resultados entendibles comparada con otras herramientas computacionales. Los resultados muestran que al utilizar el software en la cuenca del Río Partadó se logró simplificar el proceso de su caracterización hidrológica, con lo que se establece que es apropiado para su uso con los datos de otras cuencas. Dichos parámetros alcanzados en el programa permitieron hacer la simulación del modelo y encontrar el caudal máximo para diferentes períodos de retorno de la cuenca.

Palabras clave: Software, Hidrología, Cuenca hidrológica, Caudal, Río Partadó.

ABSTRACT

This research with a quantitative approach presents software that seeks to serve as a tool to calculate hydrology equations used mainly in rivers where there is a scarcity of flow regime data. This work was developed in C # from the Visual Studio programming environment. Its application was based on following the HEC - HMS methodology, simplifying part of the mathematical treatment that must be given to the precipitation and temperature data until they are used in the simulation of the basin. Additionally, it is intended that the application has a more user-friendly and easy-to-manipulate interface for the user and presents understandable results compared to other computational tools. The results show that by using the software in the Partado River basin, it was possible to simplify its hydrological characterization, thereby establishing that it is appropriate for use with data from other basins. These parameters reached in the program allowed to simulate the model and find the maximum flow for different return periods of the basin.

Keywords: Software, Hydrology, Hydrological basin, Flow, Partado River.

INTRODUCCIÓN

El estudio hidrológico de una cuenca es importante porque a partir del conocimiento de sus variables y propiedades espacio-temporales son el apoyo para tomar decisiones que generan el aprovechamiento razonable y sostenible de los recursos naturales para el diseño de obras de infraestructura que beneficien a una población, o para la resolución de problemas de inundaciones. Asimismo, para cuencas que no poseen un régimen de caudales, la modelación hidrológica juega un papel muy importante en su obtención gracias a otros parámetros basados en la precipitación y la temperatura. Por consiguiente, es beneficioso para ingenieros civiles, agrícolas o profesionales afines a la hidrología, contar con una herramienta automatizada que simplifique el tratamiento de los datos previos a ser utilizados en una modelación.

Este proyecto de investigación cuenta dentro de las generalidades con la línea de investigación y los antecedentes que enseñan trabajos avanzados sobre herramientas de hidrología que han tenido gran alcance a nivel regional para, desde este punto, poder analizar los vacíos que se plantean y ser tenidos en cuenta en la elaboración de un software con características funcionales similares. Dentro del problema y la justificación, este informe visualiza la caracterización de la cuenca alta del Río Partadó profundizando en las razones por las cuales es realmente útil estudiar los ríos que no poseen estaciones para el registro de caudales y la favorabilidad que este genera en las comunidades aledañas. Para abarcar los dos anteriores elementos, la investigación divide la metodología dos partes; la primera se basa en la programación mediante el desarrollo en cascada que trabaja secuencialmente desde los requisitos hasta la verificación; la segunda, está relacionada con hidrología y se aborda tres fases, obtención de los datos, delimitación de la cuenca y caracterización morfométrica de la cuenca del Río Partadó. Con lo anterior, se determinaron los parámetros de relieve, drenaje y tiempos de concentración, hasta lograr el balance hídrico y la evapotranspiración.

En el último capítulo se busca el programa más adecuado para crear el modelo hidrológico que según Estrada y Pacheco (2012) corresponde al modelo HEC-HMS por ser el más utilizado mundialmente al brindar ayuda de forma fácil en el procesamiento de los datos. Aquí se utilizan finalmente los resultados obtenidos con el software desarrollado a lo largo de la investigación y luego de haber realizado una disposición y recopilación de los mismos, son ingresados en la modelación donde se consiguen los caudales máximos para diferentes períodos de retorno del Río Partadó.

Con el desarrollo del presente proyecto se logra una herramienta digital de nombre BLASTOISE, utilizando C#, que sirve de ayuda para simplificar la resolución de

cálculos hidrológicos y así adquirir los datos a ser ingresados en la modelación HEC – HMS facilitando de esta manera el proceso de encontrar los caudales máximos por esta metodología. Además, se integran funciones que sirven para encontrar algunos de los parámetros morfométricos que son importantes en la caracterización de una cuenca en el menor tiempo posible y con resultados precisos y ordenados.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 LINEA DE INVESTIGACIÓN

Saneamiento de comunidades.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.2.1 Formulación del problema

Resolver problemas relacionados con inundaciones demanda un tratamiento desde diferentes enfoques en los que se estudian estrategias junto con esfuerzos de investigación coordinados por equipos de hidrólogos y disciplinas afines; sin embargo, Valverde [1] especifica que el principal factor para buscar la solución está en la información hidrológica, si dicha información es suficiente y su calidad es aceptable bajo la responsabilidad de la institución encargada de tomar los datos para el servicio hidrológico. Dentro de estos datos, el régimen de caudales son un conjunto de datos indispensables para el control de inundaciones tanto en corrientes que se piensen aprovechar en un futuro y ya estén instrumentadas, como en las que han sido poco o nada estudiadas.

En Colombia se cuenta con muy pocas estaciones hidrológicas para medir el comportamiento de cuencas tanto en áreas urbanas como semi rurales lo cual plantea un desconocimiento alarmante que genera una falta de estudios de control de inundaciones y planeación que puedan prevenir catástrofes para épocas invernales. Según Sedano, Carvajal y Ávila [2] se calculaba que, para Colombia en 2013 existía una superficie periódicamente inundable de 11 millones de hectáreas, que equivale a aproximadamente el 9.2% del territorio. También hay que tener en cuenta los efectos de los fenómenos ocurridos por el fenómeno de La Niña en el período de 2010-2011 se relacionaron en los datos de caudales medios presentados en los grandes ríos en la zona Andina Colombiana según Sedano et al.

En cuanto al fenómeno El niño – Oscilación Sur (ENOS), por ejemplo, en las cuencas torrenciales andinas del departamento del Valle del Cauca, se han aplicado variables macro climáticas “que han permitido establecer que este fenómeno tiene mayor correlación con el comportamiento de caudales que con la precipitación¹” [2]. A partir de estudios realizados con información de caudales se pueden establecer planes de gestión de los recursos hídricos que disminuyan pérdidas humanas y económicas que generan estos eventos extremos.

La problemática de la escasa información hidrológica y, en consecuencia, de caudales en los ríos es una de las debilidades presentes para el diseño y desarrollo de obras de infraestructura que incluye métodos para encontrar el caudal como elemento de diseño en las obras civiles que tienen relación con el aprovechamiento de los recursos hídricos ya sean represas, acueductos, canales, embalses o un drenaje pluvial, por mencionar algunos. Por ejemplo, la hidrología da a la ingeniería civil los métodos que examinan los registros de caudales medios y máximos de las corrientes de agua sobre dichas obras. Para el estudio de las obras de estabilización de control de erosión Quintero, y Botero [3] realizan un análisis presentado en los diseños de los tramos 2,3 y 4 de la vía Bogotá-Villavicencio y el viaducto allí localizado en los que fue necesario identificar varias cuencas y la obtención de caudales máximos con registros de información dados desde el IDEAM, los cuales fueron datos primordiales como parte de obras de mejoramiento por el deterioro ocasionado por el río Cáqueza.

Si bien ya existe software que cumpla con facilitar varios de estos cálculos de forma completa a través de diferentes funcionalidades, es difícil encontrar un programa de uso libre y que además no requiera recibir un curso completo con videos de gran duración, para después de mucho tiempo, por fin poder usar la herramienta, de manera sencilla. Un software que posea una interfaz capaz de familiarizar a sus usuarios en pocos minutos, pero sin perder calidad y veracidad en los resultados ahorrando procedimientos de introducción de datos tediosos o de resultados complicados de leer.

En la actualidad se cuenta con la herramienta HEC – HMS que es un software que realiza modelos hidrológicos, provee de simulaciones y es muy sencillo de usar con varias posibilidades de cálculo. También existe programas como TETIS, CHAC o SWMM, sin embargo, estos softwares requieren un tratamiento previo en los datos para generar la respuesta en un modelo hidrológico. En Colombia los proyectos asociados con cuencas que poseen poca información siguen este tratamiento que

¹ K. Sedano Cruz, Y. Escobar y Á. Ávila Díaz, «Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia.» Luna Azul, pp. 219-238, 2013.

consiste en recopilar información de entidades oficiales como la Corporación Autónoma Regional (CAR) o el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), y luego tratar de organizar esta información en bruto de forma manual en tablas (de Excel, por lo general) para luego, allí mismo, con parámetros morfométricos calculados desde un Sistema de Información Geográfica (SIG) como ArcGIS o Global Mapper para formular las hojas de cálculo hasta encontrar los parámetros que requiere HEC – HMS.

Estos precedentes son importantes para motivar a que se piense la manera de desarrollar algún tipo de herramienta o aplicativo que realice varias de estas tareas en concreto amigable a los tipos de metodologías impartidos por los docentes en los cursos de hidrología de la Universidad y que, al mismo tiempo, mediante su uso sea capaz de expresar y enseñar mejor la dinámica entre datos recopilados aún sin análisis e información ya organizada y entregada de forma adecuada y clara al ingeniero; si bien algunos equipos tienen instalados HYFA y SMADA para encontrar valores estadísticos y períodos de retorno, ya no resultan convenientes dado a que, además de ser poco conocidos, ambos poseen software muy desactualizado que sólo es compatible con Windows 98 o Windows XP por lo que únicamente es posible ejecutarlos mediante una virtualización con VirtualBox.

1.2.2 Antecedentes

Para este capítulo se tuvieron en cuenta estudios relacionados con el tema en cuestión y se dividieron en dos grandes subtítulos como son: caracterización y evaluación de cuencas hidrográficas, e investigaciones de modelaciones hidrológicas. La ventana de revisión de estas investigaciones oscila entre los años 2005 a 2020.

Estudios para la caracterización y evaluación de cuencas hidrográficas

En el año 2018 Peng, Gregory y Junyu [4] de la Universidad de Carolina del Sur quisieron examinar la respuesta de estaciones hidrológicas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El objetivo de ellos era simular inundaciones en cuencas de dicho lugar utilizando diferentes entradas de precipitación. Para esto, ellos utilizaron tres conjuntos de datos de precipitación obtenidos por métodos diferentes, el primero a través de medidores meteorológicos individuales, el segundo utilizó datos de Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP) y el tercero bajo el Modelo de Relaciones de Elevación de parámetros de Pendientes Independientes (PRISM). Los resultados logrados fueron el análisis de cómo dos cuencas hidrográficas de Carolina del Sur responden a las tres representaciones

mencionadas asumiendo fuertes lluvias.

Este estudio es importante y presenta relevancia porque puede dar pistas de las desventajas que implica una red escasa de estaciones pluviométricas porque llega a limitar la precisión de la simulación del flujo de la corriente lo que representa una limitación de los diferentes productos de precipitación para la simulación de inundaciones.

Se encontró una investigación de la Universidad Católica de Colombia en el que se desarrolló la caracterización morfométrica del cauce en la urbanización Ciudad Blanca que queda ubicada en San Gil, trabajando el modelo del cauce con las herramientas HEC – GEORAS y HEC – GEOHMS. Una vez caracterizada la cuenca encontraron el caudal pico y cotas de inundación del cauce seco en la urbanización y con dicha información lograron generar un modelo de inundación para el cauce donde determinaron que “en un período de retorno de 50 años no se evidencia un riesgo probable de inundación de las zonas con protección aledañas al cauce²” [5].

Finalmente se encuentra una investigación llevada a cabo en el norte de Ontario, Canadá por Darbandsari y Coulibaly (2020) en el que se caracterizaron minuciosamente siete modelos conceptuales agrupados para reproducir el hidrograma de precipitación para en las zonas para cuenca alta y baja cuando se cuenta con pocos datos. Los modelos se calibraron con cinco funciones que redujeron dicho procedimiento de evaluar los datos de entrada. Con este estudio se pudo descubrir que el modelo de mejor desempeño para simular el caudal diario en una cuenca hidrográfica con pocos datos es el MACHBV y le siguen SACSMA y GR4J con una confiabilidad también considerable. Con respecto a la simulación del caudal en la cuenca alta de los ríos los dos últimos modelos fueron superiores [6].

Investigaciones de modelaciones hidrológicas mediante datos de entrada

Un estudio que otorga relevancia al presente proyecto debido a que aporta pistas acerca de algunos de los trabajos realizados con el uso de la modelación con HEC-HMS es la investigación realizada por Carvajal, Arango y Jiménez [7] de la Universidad del Valle en el año 2007 con el objetivo de implementar herramientas

² E. A. Ortiz Higuera, Caracterización Morfométrica, Modelación Hidrológica Y Modelación Hidráulica Para La Cuenca Del Cauce En La Urbanización Ciudad Blanca, Del Municipio San Gil, Departamento De Santander, Mediante El Uso De Las Herramientas HEC-GEOHMS Y HEC-GEORAS, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2015.

informáticas matemáticas en la modelación hidrológica para estimar caudales promedios mensuales en la cuenca del Río Yumbo en el Valle del Cauca, Colombia. La metodología se basó en recolectar datos de lluvia junto con información morfométrica y de suelos con el uso del software HEC HMS. Los resultados a los que llegaron mostraban buena correlación de volúmenes calculados mediante la modelación con el software HEC HMS comparados con los observados en una estación hidrométrica. Por lo que se concluía que mediante esta metodología se podrían estimar caudales en fuentes que carezcan de estaciones.

Uno de los vacíos encontrados en el cálculo caudales mediante obtención de ecuaciones hidrológicas para su posterior modelación mediante programas como el Linear Perturbation Model o el HEC HMS es que las variables de entrada que piden estos modelos (incluido el HEC HMS) han sido mal calculadas en numerosas ocasiones en estos procesos y en segundo lugar se desconoce la formulación matemática de estos. Por lo que desde la experiencia de investigación de antecedentes se evidencia la falta de un software especializado en resolver cálculos hidrológicos que servirán como datos de entrada a dichos simuladores o incluso que entregue de forma rápida y organizada variables como períodos de retorno para otros estudios.

Vale la pena citar estudios previos realizados por la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia en donde Ubaldo Díaz, Daniel Guacaneme y Francys Alonso [8] presentan aplican el método HEC – HMS para estimar los caudales máximos de la Quebrada El Diamante en el año 2017 con el cual lograron caracterizar hidrológicamente dicha cuenca con el fin de conocer riesgos de inundación para poblaciones cercanas. También es importante resaltar el trabajo que fue tal vez el primero en usar la metodología HEC – HMS en la Universidad llevado a cabo por Edgar Gómez y Henry Castillo [9] en el año 2005 para la obtención de caudales máximos de la cuenca de Río Frío.

Para ambos trabajos, dentro de las limitaciones encontradas se presentan los mismos vacíos que ocasionan ciertas dificultades en la aplicación de dicha metodología y es que la tarea que lleva realizar los cálculos por las ecuaciones de hidrología para lograr los resultados de los diferentes parámetros de entrada para la modelación (tales como el variables morfométricas de la cuenca, obtención de tiempos de concentración y la obtención del número de curva multianual) resulta en un proceso trabajoso que requiere una cantidad considerable de tiempo, y que a su vez, requiere que los datos que van a ser ingresados para modelar sean confiables y consistentes. En este sentido, se van a utilizar estos limitantes o estos vacíos del conocimiento mencionados anteriormente para implementarlos dentro del diseño del software o para tenerlos en cuenta en el desarrollo del proyecto.

1.2.3 Pregunta de investigación

¿De qué manera se pueden calcular los parámetros de hidrología en la modelación de una cuenca con pocos datos para simplificar el proceso en la obtención de caudales máximos?

1.2.4 Alcances y limitaciones del estudio

Esta investigación de enfoque cuantitativo, busca a través del software proponer una herramienta para caracterizar las cuencas de los ríos; a continuación, se presentan los alcances y las limitaciones del estudio:

- Este proyecto se presenta como solución para realizar cálculos hidrológicos principalmente en cuencas donde hay escasez de datos como instrumento que facilite el proceso de realizar cálculos hidrológicos necesarios para modelar una cuenca en HEC – HMS.
- Se usa como modelo la información obtenida del Río Partadó, se aplica el software, se proyecta encontrar los caudales máximos del río en el departamento del Chocó asimilando los resultados en la modelación HEC – HMS. Una vez calibrado el software, se determinan los parámetros de ETP, balance hídrico (donde se utilizará un registro de precipitaciones de 17 años), tiempos de concentración, número de curva y curvas Intensidad-Duración-Frecuencia para realizar los hietogramas de precipitación.
- El proyecto para su creación toma elementos fundamentales de la ingeniería civil y de la ingeniería de sistemas, por lo que puede ser un insumo para la universidad en estas dos carreras.
- El estudio pretende abarcar la totalidad de los objetivos propuestos en el tiempo previsto para esta asignatura que son cuatro meses.

En cuanto a las limitaciones, debido a que el grupo de investigación está conformado por estudiantes de ingeniería civil, deben indagar conceptos poco conocidos para los autores dentro del campo de la programación, por lo que, el desarrollo del software plantea invertir más tiempo del previsto en elaborar los algoritmos necesarios en el cálculo de cada ecuación de hidrología.

- Otra de las limitaciones tiene que ver con la escasa información que se posee acerca de la cuenca del Río Partadó del que no se cuenta con suficiente bibliografía actualizada debido a que en este momento solamente se encuentra una sola estación en estado activo (CUPICA). Solo se cuenta con el estudio hidrológico de este río realizado por el ingeniero Jesús Ernesto Torres.
- La limitación encontrada dentro del software es que no se van a implementar bases de datos, por lo tanto, los datos entre formularios no van a quedar guardados independientes, es decir que, al realizar cálculos en un formulario, la matriz con los resultados deberá exportarse a Excel o de lo contrario al cambiar de formulario y después regresar al mismo menú se borrarán los datos. Al evaluarse la posibilidad de usar bases de datos se concluyó que no era conveniente debido a que su desarrollo requiere tiempo.

1.3. Justificación

Para un ingeniero es importante contar con herramientas digitales capaces de reducir el tiempo invertido en cálculos, obtención de datos estadísticos y de caudales cuando se utiliza la metodología HEC – HMS [10]. Si se cuenta con un programa que sea fácil y de forma dinámica en su utilización, al permitir ingresar los parámetros morfométricos, de precipitación, temperatura y de drenaje por medio de un manual de instrucciones de la metodología de los datos a ser ingresados por el usuario, así como los resultados y pasos siguientes para que el ingeniero, aún con el uso por primera vez del software, se podrán obtener los caudales de una corriente de forma satisfactoria. BLASTOISE no sirve necesariamente sólo en el caso de que el usuario requiera hacer un proyecto de una magnitud considerable en el estudio de un río como es el presentado en este trabajo; sino también, cuando se requiera hallar el balance hídrico de una cuenca, cálculo de Evapotranspiración real y potencial, velocidad, tiempos de concentración o finalmente períodos de retorno.

La razón de elegir en la investigación el Río Partadó, en primer lugar, es que se encuentra en el departamento del Chocó que por ser una región neotropical con un sistema de bajas presiones es una de las zonas con mayores precipitaciones en el planeta [11], lo que representa un hecho singular a la hora de analizar los caudales máximos porque se pueden obtener valores distantes comparados con los ríos de otras regiones del país. Asimismo, de acuerdo con el IDEAM (2020) este es un río que presenta escasez de información, por lo que resulta pertinente trabajar el río con la herramienta BLASTOISE. La cuenca cuenta con apenas una estación pluviométrica (CUPICA) y otra climática (LA TERESITA) [12]; esta última suspendida desde febrero de 2002. En los registros de precipitación (Ver Anexo 1)

no se logra de ninguna manera cubrir parte importante de su longitud por lo que con el desarrollo de este proyecto podremos demostrar que se pueden obtener caudales máximos haciendo un trabajo en conjunto creando un software de cálculos hidrológicos para la modelación HEC-HMS en lugares donde se tiene poca información sobre una cuenca de interés.

De modo que al realizar el estudio de determinación de caudales podemos brindar información hidrológica relevante para el diseño de importantes obras civiles importantes que estén relacionadas el recurso hídrico y que deban depender de un diseño de infraestructura basado en estudios previos del río, el cual posee un déficit en la prestación de servicios básicos de energía y agua potable para esta población vulnerable [13].

Adicionalmente, desde el ámbito educativo, hacer uso de este software en proyectos de trabajos de grado o de investigación en ríos que requieran cálculos de parámetros morfométricos va a propiciar una gran facilidad en el ingreso de datos dado a que su interfaz es más dinámica y amigable comparada con los recursos que cuenta actualmente la Universidad para realizar los mismos procedimientos. Además, en los cálculos hidrológicos como los parámetros de drenaje y los períodos de retorno puede crear incluso un mayor entendimiento de los procesos y ecuaciones en estudio debido al orden y dinámica en que la interfaz presenta los resultados.

Finalmente, Estrada y Pacheco concluyen sobre la importancia de los modelos hidrológicos de una cuenca ya que permiten tener un instrumento importante en la simulación de panoramas que se pueden presentar en un futuro próximo. En consecuencia, mapear las zonas más propensas a inundar poblaciones cercanas o a lo largo de un río utilizando eventos hidrológicos con diferentes períodos de retorno permite a los hidrólogos dar una representación conceptual completa de los procesos que en dicho fenómeno se ven involucrados [10].

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Elaborar un software de cálculos hidrológicos que simplifique la obtención de datos mediante fórmulas de hidrología para la caracterización de cuencas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Implementar el cálculo de los parámetros de drenaje para la modelación hidrológica dentro de las funcionalidades.
- Calibrar las ecuaciones básicas de hidrología para obtener la evapotranspiración y el balance hídrico a través del software.
- Aplicar los resultados del software BLASTOISE en la obtención de los caudales máximos por medio de la modelación HEC – HMS en la cuenca del Río Partadó.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Marco conceptual

2.1.1 Conceptos utilizados para hidrología.

Modelación hidrológica: La modelación hidrológica 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. Incluso, alertar a los servicios de protección civil y establecer protocolos de actuación ante posibles situaciones de peligro por intensas lluvias.

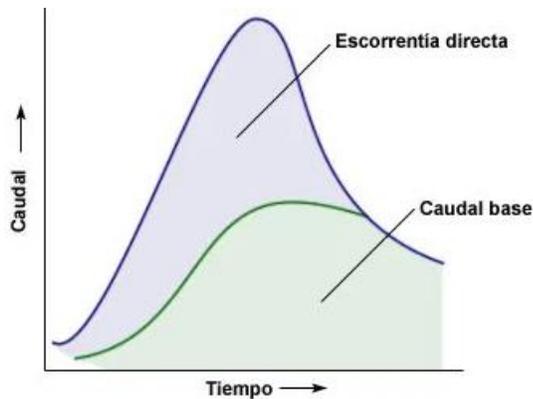
Estos sistemas facilitan el tratamiento de la información hidrológica gracias a que incluyen procedimientos diseñados para realizar la captura, almacenamiento, manipulación, análisis, modelación y presentación de datos georreferenciados. Con ayuda de los SIG la modelación hidrológica acelera su desarrollo y aplicación pudiendo actuar a modo de plataforma para la experimentación rápida de nuevas ideas y conceptos, a la vez que sus resultados pueden ser incorporados al proceso de toma de decisiones y en la ordenación del territorio [8].

Por lo tanto, un modelo hidrológico representa de manera simplificada la operación de un sistema físico real de una cuenca hidrográfica y el análisis de cada uno de los procesos del ciclo hidrológico (infiltración, evaporación, escorrentía, evapotranspiración), para simular el flujo y capacidad de almacenamiento de la misma durante distintos periodos de tiempo con el fin de diseñar estructuras que sean capaces de funcionar adecuadamente en escenarios críticos donde se presenten precipitaciones importantes que puedan poner en riesgo principalmente la vida de las personas, a su vez nos proporciona información tanto de lluvias como de caudales con el propósito de obtener datos reales, generando hidrogramas para la calibración de un modelo hidrológico base que pueda indicar el comportamiento de la cuenca.

Hidrograma unitario: El hidrograma unitario de una cuenca se define como el hidrograma de escurrimiento debido a una precipitación presentada con una altura

de exceso unitaria e intensidad constante durante un periodo determinado de tiempo que representa los cambios de caudal por unidad de escurrimiento, en otras palabras, muestra como la adición de una unidad de escurrimiento influirá en el caudal de un río con el tiempo y se utiliza para predecir el impacto de la precipitación sobre un caudal, para ello se tienen en cuenta las siguientes hipótesis base [8].

Ilustración 1. Componentes básicos hidrograma unitario



Fuente: Civilgeeks (2020).

Distribución uniforme: La precipitación en exceso tiene una distribución uniforme sobre la superficie de la cuenca y en toda su duración [14].

Tiempo base constante: Para una cuenca dada la duración total de escurrimiento directo o tiempo base es la misma para todos los eventos de precipitación con la misma duración de lluvia efectiva, independientemente del volumen total escurrido [14].

Linealidad o proporcionalidad: Este concepto dice que dentro de los hidrogramas de escurrimiento se cumple sus ordenadas con el período de tiempo base son proporcionales al volumen total de escurrimiento, también conocido como volumen total de lluvia efectiva. Esto conlleva a que dichas ordenadas sean proporcionales la una con la otra [14].

Superposición de causas y efectos: El hidrograma que resulta de un período de lluvia dado puede superponerse a hidrogramas resultantes de períodos lluviosos procedentes [14].

En la parte oriental del municipio se presentan formaciones pertenecientes a la Unidad Geomorfológica Cuenca del Atrato-San Juan, de edad Terciaria, en contacto fallado con los basaltos de la Serranía del Baudó. Las rocas que conforman la Unidad Geotectónica de la Serranía del Baudó, en el municipio de Nuquí, son de edad Cretácica, Terciaria y Cuaternaria [15].

Suelos del paisaje de montaña denudacional: El paisaje de montaña denudacional, en el municipio de Nuquí está constituido por la vertiente occidental de la serranía del Baudó, con alturas que no sobre pasan los 700 msnm. El eje de la serranía del Baudó forma el divorcio de las aguas entre las cuencas del río Baudó y el océano pacífico, esta serranía continúa paralelamente a la costa pacífica hasta unirse a la serranía del Darién, que es considerada como un sistema independiente limitando con la república de Panamá [16].

Suelos del paisaje de montaña estructural: Los suelos del paisaje de montaña estructural se localizan en el flanco oriental de la serranía del Baudó, cuyos materiales geológicos constitutivos de este paisaje son: areniscas calcáreas, calizas de carácter arrecifal, rocas ricas en sílice, limolitas calcáreas, calizas y margas. La montaña estructural tiene tipos de relieve que sobresalen por acción de procesos tectodinámicos que determinaron su levantamiento [16].

Suelos del paisaje de lomerío denudacional: El paisaje de lomerío denudacional ocupa pequeñas extensiones localizadas sobre la serranía del Baudó y parece haber sido una antigua planicie marina, ligeramente elevada y retrabajada por los agentes externos, especialmente el agua, para configurar las formas actuales; este consiste de una sucesión monótona de lomas y colinas de lomos alargados y redondeados, cuyo relieve no sobre pasa los 50 y 100 msnm, el grado de disección es variable. En algunas áreas se presentan lomas y cuevas conformadas por areniscas y conglomerados, que tienen algún grado de buzamiento y son de mayor altura que el resto de lomas y colinas; en otras áreas la antigua planicie marina no ha sido retrabajada totalmente por lo que quedan superficies relictas de relieve plano que constituyen geoformas denominadas terrazas fluvio marinas, los materiales geológicos dominantes de este paisaje son las arcillolitas y limolitas, en menor proporción las areniscas, calizas y conglomerados. Las arcillolitas permanecen en áreas de bajo relieve debido a que tienen menor resistencia a la erosión [16].

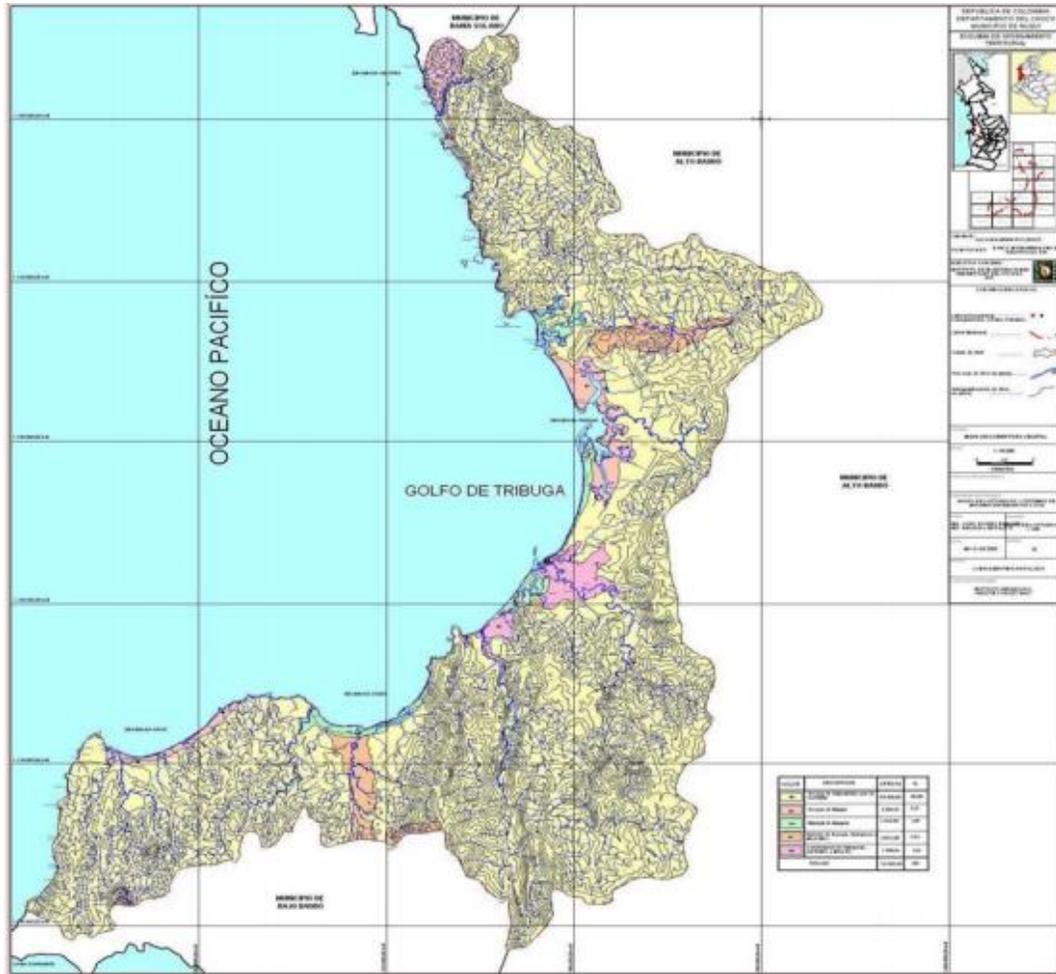
Suelos del paisaje de valle: El paisaje de valle comprende las áreas depresionales alargadas y generalmente estrechas de fondo plano, flanqueadas por dos zonas de

pendiente regular, que tiene como eje el curso de un río, esta asociación se localiza en los valles Inter mónicos de los ríos que descienden de la serranía del Baudó; el clima que se presenta en estas zonas es cálido muy, húmedo y pluvial, con alturas menores a 1000 msnm y precipitaciones entre 4000 y 8000 mm anuales, su temperatura promedio anual mayor de 24°C y de acuerdo con Holdridg, esta unidad corresponde a zonas de vida de bosque muy húmedo tropical y bosque pluvial tropical [16].

Suelos de planicie fluvio marina: El paisaje de planicie fluvio marina corresponde a las áreas planas que limitan con el océano pacífico y que han tenido en su formación influencia marina y fluvial. Los tipos de relieve que conforman este paisaje son la plataforma costera y los planos de marea, los cuales involucran básicamente las playas marinas en el primero y las marismas y manglares en el segundo, esta unidad se localiza principalmente en el océano pacífico ocupando la posición de terrazas con cimas planas y alargadas dentro del paisaje de planicie fluvio marina, en alturas que no superan los 30 metros, con clima cálido muy húmedo, precipitaciones entre 4200 y 6800 mm anuales y una temperatura promedio de 26°C [16].

Vegetación: Los tipos de cobertura vegetal de los suelos en el municipio de Juradó en el departamento del chocó se describen a continuación:

Ilustración 3. Cobertura vegetal departamento del Chocó



Fuente: Sociedad geográfica de Colombia. IGAC (2002).

Bosque pie de montaña: Corresponde a los bosques zonales que se desarrollan a una altitud de 800 msnm con características correspondientes a las condiciones ambientales imperantes para esa altura donde el crecimiento de los bosques es lento debido a que las condiciones climáticas son más críticas por lo que hay periodos vegetativos más cortos y suelos menos profundos y aluviales, ocupando posiciones topográficas pertenecientes a colinas y estribaciones de serranías.

Matorral de mangle: Es un arbusto o árbol leñoso, perteneciente a las rizoforáceas. Tiene tallos de tres a cuatro metros altura, aunque a veces alcanza unos 15 metros o más. Sus ramas largas y extendidas dan vástagos que descienden hasta tocar el

suelo y arraigar en él. Tiene hojas pecioladas, opuestas, enteras, elípticas, obtusas y gruesas; flores axilares de cuatro pétalos amarillentos; fruto seco de corteza coriácea, pequeño y casi redondo y muchas raíces externas.

Bosque de manglar: Este bosque es un área biótica o bioma, formado por árboles muy tolerantes a las sales existentes en la zona intermareal cercana a la desembocadura de cursos de agua dulce en latitudes tropicales y subtropicales. Así, entre las áreas con manglares se incluyen estuarios y zonas costeras [15].

Clima: El clima en el municipio de Juradó está determinado por las condiciones climáticas generales de la región, que, a su vez, están determinadas por su ubicación en la zona de convergencia intertropical (ZCIT), presentando una distribución de la precipitación monomodal, generando dos períodos: uno de precipitación abundante de abril a noviembre y otro, con precipitaciones menos pronunciadas, entre diciembre y marzo. La temperatura anual oscila entre los 25°C y 27°C, con una precipitación anual comprendida entre los 5000 y 7000 mm anuales y humedad relativa media por encima del 85%, los valores de brillo solar varían entre 52 y 100 horas mensuales, siendo el mes de mayor brillo el de febrero y el de menor noviembre. La nubosidad oscila entre 5 y 7 octas de nubes en todo el municipio, la evapotranspiración en el municipio alcanza sus valores más altos entre los meses de julio a septiembre con registros de 132 a 137 mm mensuales, presentándose el resto del año valores entre 117 y 130 mm mensuales.

Hidrografía: El sistema hidrográfico del departamento del chocó se caracteriza por ser uno de los más abundantes en ríos y quebradas del país, debido principalmente, a que es una de las regiones de Colombia con los mayores niveles de precipitación y su dinámica fluvial incide directamente sobre la vegetación, el uso del suelo, la vida productiva y económica de la gente, siendo esta una de las más importantes en materia de biodiversidad en el mundo.

Ilustración 4. Mapa hidrográfico departamento del Chocó



Fuente: Sociedad geográfica de Colombia. IGAC (2002).

La red hídrica existente en el municipio de Juradó se compone de varios afluentes de primer orden de origen independiente unos de los otros, las más relevantes son las quebradas Marciano, Agua caliente, Chaquí, Antacorí en su cabecera municipal y los ríos Arusi, Arusicito, Coquí, Panguí, Nuquí, Tribugá, Chorí, Jurubirá, san pichí, joví y la quebrada del Chicui a nivel departamental [15].

Tabla 1. Caracterización Morfométrica de la Red Hídrica

Rio	Área Ha	Longitud Km	Ancho Km	Coordenadas	
				X (m)	Y (m)
San Pichi	15,89	6,07	0,034	976.524,19	1.153.477,99
Jurubirá	43,75	22,51	0,037	976.428,03	1.151.106,89
Chorí	104,31	22,83	0,050	992.091,27	1.139.753,82
Tribugá	50,22	9,28	0,028	983.798,50	1.127.491,51
Nuquí	60,95	32,02	0,030	979.840,44	1.102.137,14
Panguí	75,30	24,67	0,052	976.670,20	1.099.194,14
Coquí	35,34	11,09	0,020	972.365,62	1.106.169,25
Joví	37,48	17,16	0,038	959.340,62	1.103.748,52
Arusí	33,67	47,19	0,028	955.264,21	1.101.359,48
Arusicito	13,52	14,27	0,025	954.199,85	1.099.366,69
Chicul	10,36	7,66	0,020	973.828,65	1.111.632,26

Fuente: Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico.

Cuenca del río Arusí: Este río nace en las estribaciones del cerro Janano y se localiza en la parte occidental del municipio, presenta un recorrido de sur a norte hasta su desembocadura en el océano pacífico al occidente de la población de Arusí. Durante su recorrido recibe las aguas de las quebradas Agua clara y Agua clarita, además de otras corrientes menores [16].

Cuenca del río Arusicito: Es afluente del río Arusí, su recorrido es en sentido de sur a norte recibiendo aguas de las quebradas Los canales y Dos bocas con una longitud aproximada de 14.27 kilómetros [16].

Cuenca del río Coquí: Parte de su recorrido por el municipio es de sur a norte y durante el mismo recibe las aguas de las quebradas Barbudera, El bongo, El Veneco, Galván, Agua y Lano, para luego entregarlas al océano pacífico [16].

Cuenca del río Joví: Al igual al anterior este río aporta sus aguas al océano pacífico recibiendo antes las aguas de las quebradas El Aguacate, Antaral y el Saltico, además de otras corrientes menores [16].

Cuenca del río Panguí: El río Panguí tiene su nacimiento al sur del departamento en límites con el municipio del Bajo Baudó, haciendo su recorrido desde el sur hacia el norte hasta su desembocadura en el océano pacífico al oriente de la población

de panguí, en su trayecto se encuentra con grandes aportantes como lo son las quebradas Aguafriecita, Agua fría, El Chorro, Dominico, Guadual, Guadualito, Boquitas, Dos bocas, Munino y Zequiel [16].

Cuenca del río Nuquí: El río Nuquí nace en el sur del municipio, limitando con el área del Bajo Baudó, hace su recorrido desde el sur hacia el norte recibiendo las aguas del río Ancachy y de las quebradas El Marciano, Agua caliente, El Chaquí, además de otras corrientes menores, desembocando en el océano pacífico cerca a la cabecera municipal de Nuquí [16].

Cuenca del río Tribugá: El río Tribugá es una corriente menor que está ubicada al oriente de la población de Tribugá, este nace en la parte alta del cerro Copidijo y recibe las aguas de las quebradas El Tigre, El Tigrecito, Agua blanca y El Potrero [16].

Cuenca del río Chorí: Al igual que el río Tribugá, esta es una corriente menor que nace en la frontera que separa a los municipios de Nuquí y el Alto Baudó. Su recorrido lo hace en sentido oriente – occidente recibiendo las aguas provenientes de las quebradas La Tatabrera, El Venado, La Mundúquera, El Jagua y Enrique [16].

Cuenca del río Jurubirá: El río Jurubirá tiene uno de sus nacimientos en la parte alta del cerro Copetepava, convirtiéndose en unos de los afluentes más cercanos al océano pacífico, transportándose entre un sistema de lomeríos encañonados donde recibe las aguas de las quebradas Dos Bocas, La Sierra, La Isla y El Natal [16].

Estación Climatológica Ordinaria (CO): Lugar destinado a registrar temperaturas y precipitaciones extremas e instantáneas. Debe contar por obligatoriedad con los dispositivos para tal fin los cuales son el pluviómetro, pluviógrafo y psicrómetro [17].

Estación Climatológica Principal (CP): Es una estación provista para observaciones del tiempo atmosférico actual, su cantidad, visibilidad, tipo, altura de las nubes, estado del suelo, precipitaciones, temperatura del aire, humedad, viento, radiación y brillo solar, evaporación y otros fenómenos especiales [17].

Estación Pluviográfica (PG): Es la estación encargada de registrar la precipitación programada de forma automática brinda datos de cantidad, intensidad y duración y período en que ha ocurrido la lluvia. Actualmente ha sido reemplazada en varios lugares por pluviógrafos de registro diario [17].

Estación Pluviométrica (PM): Este tipo de estación como su nombre indica, hace uso del pluviómetro que es un dispositivo medidor de lluvia que arroja datos de cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas [17].

Estación Meteorológica: Es el sitio donde comúnmente se miden los parámetros meteorológicos de temperatura por medio de un termómetro y geotermómetro para el suelo, un barómetro para la presión atmosférica y el pluviómetro. También cuenta un higrómetro, heliógrafo y veleta para medir humedad relativa, horas de luz solar y dirección del viento respectivamente [17].

2.1.2 Conceptos relacionados con el desarrollo del software

Software hidrológico HEC – HMS: Es un software

Para simular la respuesta hidrológica de una cuenca, el software hidrológico HEC-HMS utiliza los siguientes componentes: modelos de la cuenca que representen la cuenca física en si misma a través de ecuaciones matemáticas que logren describir los procesos físicos que se producen en la cuenca como flujos base, transformación de lluvia en caudal y las pérdidas del sistema, por otro lado, los modelos meteorológicos que permiten modelar eventos de precipitación y evapotranspiración con el objetivo de conocer la respuesta de la cuenca ante estos fenómenos, especificaciones de control y datos de entrada. Una simulación calcula la transformación de lluvia a caudal en el modelo de la cuenca, dada la entrada del modelo meteorológico. Las especificaciones de control definen el periodo de tiempo durante el cual se realizará la simulación y el intervalo de tiempo a utilizar [18].

De acuerdo a esto, un sistema de modelamiento hidrológico está diseñado para simular los procesos de lluvia – escorrentía presentados en cuencas dendríticas para ser aplicable dentro de áreas geográficas susceptibles a inundaciones y grandes avenidas, con el fin de resolver o prevenir la mayor cantidad de contingencias ocasionadas por situaciones de emergencia generadas a partir de la ocurrencia de periodos con precipitaciones importantes en algunas regiones del país [19].

Programación Orientada a Objetos POO: En la programación orientada a objetos la estructura y ordenamiento de los programas gira alrededor de los objetos [20]. Se define como un “un paradigma que se utiliza actualmente en programación, y está permitido por ciertos lenguajes (como C#) o aplicado por ellos (como Java). En

OOP, los datos y las operaciones sobre ellos se juntan (encapsulan) en una definición de clase utilizada para generar (definir) objetos de este tipo de clase en particular³ [21].

2.2 Marco teórico

2.2.1 Primeras aproximaciones al concepto de estudio hidrológico.

Los primeros estudios acerca del concepto del ciclo hidrológico y las bases para establecer los orígenes de la hidrología cuantitativa se remontan a Pierre Perrault, en Francia quien después de declararse en bancarrota en la década de 1670's se convierte en científico aficionado y publica el libro *origin of springs* (traducido como el origen de los manantiales). Este libro es importante porque como dice Hubbart [22] desarrolló el concepto del ciclo hidrológico, contabilizando correctamente la disposición de lluvia por evaporación, transpiración, recarga de agua subterránea y escorrentía.

Su principal objetivo fue transformar a la hidrología de ser una disciplina cualitativa a una más cuantitativa y lo logró gracias a experimentos hidrológicos en los que estima el caudal aguas arriba del Río Sena que resultó en un descubrimiento empírico. Llegó a la conclusión (revolucionaria en ese momento) de que la precipitación podría ser una de las variables más adecuadas para obtener el caudal de manantiales y ríos.

2.2.2 Teorías aplicadas en hidrología para la morfometría de cuencas

Tiempos de concentración: Es considerado como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre superficialmente desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida [27]. Para su cálculo se pueden emplear diferentes ecuaciones que se relacionan con otros parámetros propios de la cuenca.

“Ramser y Kirpich lo definen como el tiempo al pico TP, Viessman lo define como el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa. Este último valor es el punto de modulación del

³ A. Drozdek, «OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING AND REPRESENTATION OF OBJECTS,» STUDIES IN LOGIC, GRAMMAR AND RHETORIC, p. 293/, 2015.

hidrograma después del caudal pico. Témez lo define como la diferencia entre el tiempo de finalización de la precipitación efectiva⁴ [23].

Curva Número: La curva número es un indicador hidrológico que nos proporciona una idea de cómo determinar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica a partir de la clasificación del uso de suelo y de las características físicas del territorio como el tipo de suelo, la densidad y clase de cobertura vegetal existente, así como por el grupo hidrológico del mismo.

Para estimar el número de curva se emplearon los criterios utilizados por el Soil Conservation service (SCS) de Estados Unidos; cómo se evidencia en la Ilustración 19. Lo anterior teniendo en cuenta que estos criterios se aplican para diferentes condiciones de humedad, en este caso se utilizó la condición II y III las cuales están asociadas a suelos en estado de humedad normal y muy húmedo donde se presentan crecidas máximas y grandes caudales.

2.3 Marco geográfico

Ilustración 5. Localización de Juradó en Colombia

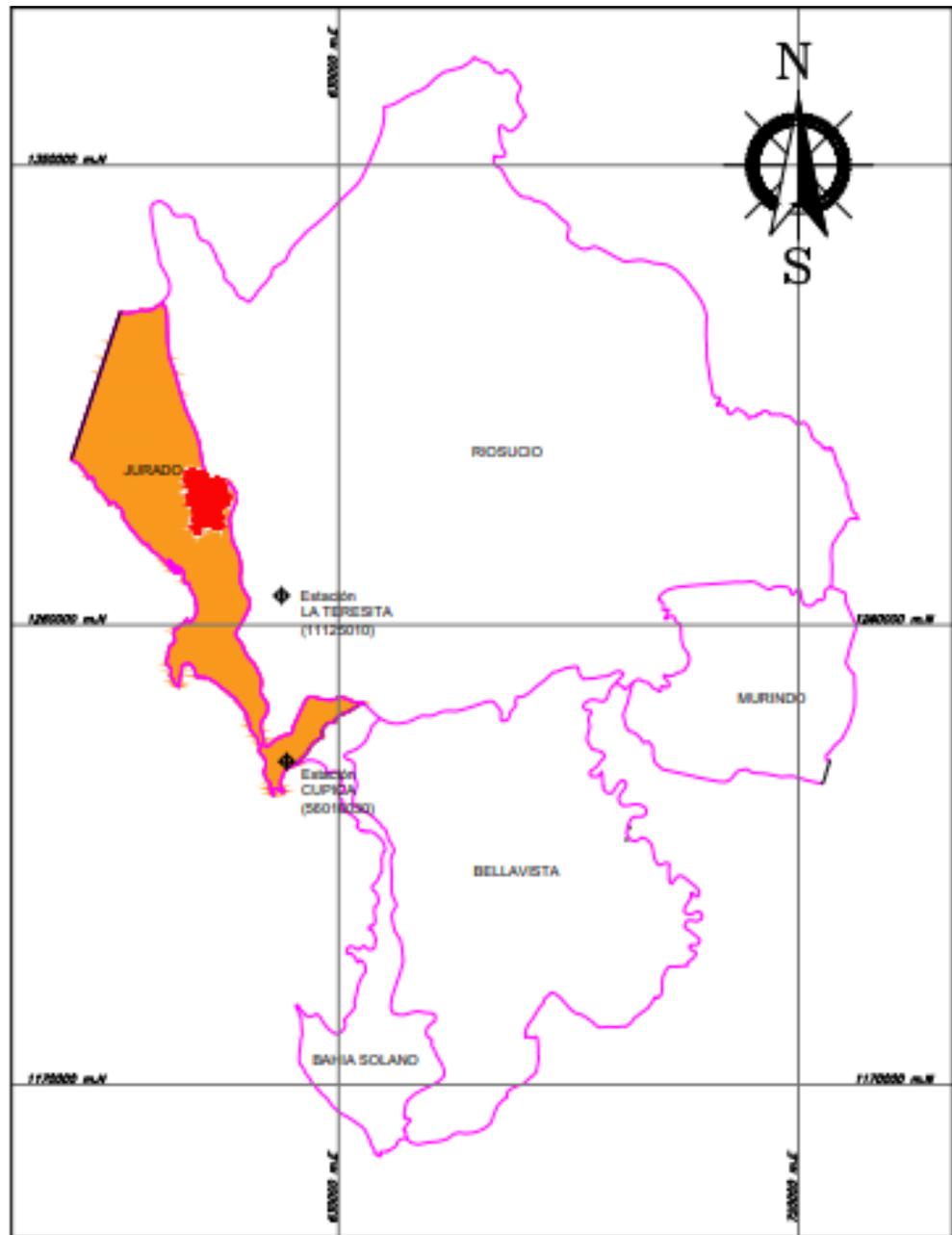


Fuente: Wikipedia (Chocó).

⁴ G. Monsalve Sáenz, HIDROLOGÍA EN INGENIERÍA, Bogotá D.C.: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.

El municipio de Juradó está ubicado a 95 km de Bahía Solano sobre la costa norte del pacífico colombiano, limita geográficamente por el norte con la República de Panamá, por el sur con el municipio de Bahía Solano, por el occidente con el Océano Pacífico y por el oriente con el municipio de Río sucio, y cuenta con una extensión total de 1352 kilómetros cuadrados.

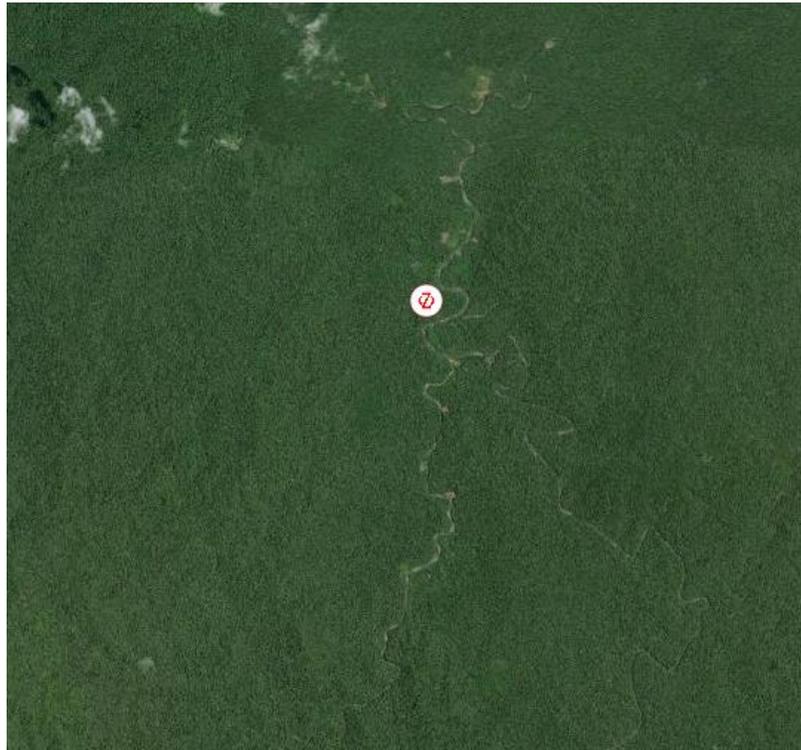
Ilustración 6. Localización de la cuenca del Río Partadó



Fuente: Autores.

La cabecera municipal de Juradó está localizada a 07° 06' 41" de latitud norte y 77° 46' 17" de longitud oeste, a orillas del Océano Pacífico en un territorio insular que determinan la desembocadura de los ríos Juradó y Partadó, los cuales luego de unirse, se separan para desembocar en dos bocanas de acceso al mar (Boca vieja y Boca nueva), conformando así un pequeño islote. Con una altura menor a los cinco metros sobre el nivel del mar y a una distancia aproximada en línea recta de 320 kilómetros de Quibdó, capital del departamento del Chocó [24].

Ilustración 7. Vista satelital del Río Partadó

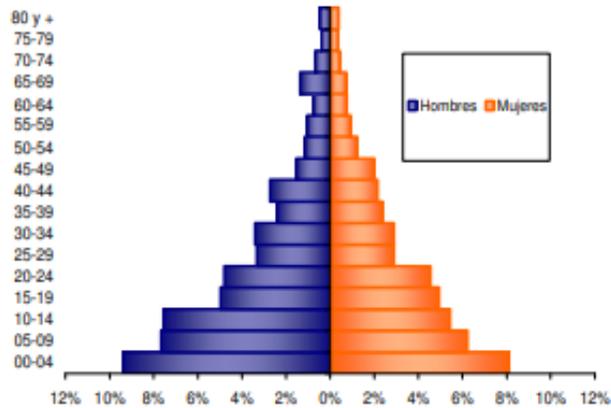


Fuente: IDEAM. dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/

2.4 Marco demográfico

Según la Ficha municipal elaborada por la Dirección de Desarrollo Territorial del Departamento Nacional de Planeación DNP, tomando como fuente la información del DANE para el año 2015, el municipio de Juradó cuenta con una población de 5322 habitantes, la cual representa el 1,2% de la población total del departamento, de esta el 44% (2369), reside en la cabecera municipal, mientras el 56% (2953), lo hace en la zona rural.

Ilustración 8. Pirámide poblacional por rangos de edad Juradó



Fuente: Plan de desarrollo municipio de Juradó (2015).

En relación al género del total de la población 2.639 son mujeres mientras que 2.661 corresponde a población masculina; esta ficha establece también que la población potencialmente activa del municipio es de 3.725 individuos. En relación a la clasificación étnica, establece este mismo documento que de la población 4.275, se auto reconocen como afrocolombianos y 1214 son indígenas [24].

2.5 ESTADO DEL ARTE

2.5.1 Investigaciones internacionales

En el presente capítulo se pretende mostrar un resumen de la información más relevante consultada en la web, trabajos de investigación y en diferentes bases de datos sobre la utilización del modelo HEC – HMS para la determinación de caudales máximos de una cuenca hidrográfica con distintos periodos de retorno así como de softwares desarrollados para realizar cálculos hidrológicos obtenidos a través de las precipitaciones ocurridas en la zona donde se ubica la cuenca, y también sobre los estudios de diferentes cuencas ya realizadas y analizadas satisfactoriamente con el fin de identificar las investigaciones teóricas y metodológicas seguidas en trabajos anteriores que podrían ser una herramienta para el desarrollo de este trabajo de grado.

Un ejemplo aplicativo interesante para la modelación HEC-HMS es la investigación

de Wałęga [25] para simular un evento de inundación por precipitación en el Río Stobnica – Polonia (afluente del Río Wislok) en el que se estudió el evento de inundación en 1998 causado por una lluvia constante. Para simular este evento se compararon cuatro modelos hidrológicos: hidrograma unitario instantáneo geomorfo-climático de Nash - GcIUH_Nash, Snyder 's hidrograma unitario sintético con la determinación de parámetros por modelos de regresión - Snyder_reg, método estándar - Snyder_stand e hidrograma unitario instantáneo de Clark - IUH_Clark. Como conclusión de esta simulación se comprobó que el segundo y tercer modelo mencionados dan los mejores resultados. Como recomendación el autor señala aplicar HEC - HMS no solamente para reconstruir estos eventos de inundación, sino también para analizar cuencas con diferentes características con datos mucho más extensos.

Para Halwatura y Najim (2013) en cuencas hidrográficas donde no se cuente con datos fiables para comprobar el modelo HEC-HMS se puede dar enfoques para calibrar y validar la simulación. En su investigación, para generar datos del Río Attanagalu en Sri Lanka, calibraron tres enfoques con datos históricos de precipitación diaria de veinte años obtenidas de cinco estaciones pluviométricas encontradas dentro de la cuenca de captación Attanagalu Oya y datos de evaporación mensual de una estación agrometeorológica en conjunto con datos de un estudio en Dunamale de 2005 a 2010. Dos de los métodos fueron el de pérdida de número de curva del servicio de conservación de los suelos (SCS), y el método de pérdida constante (utilizando los hidrogramas unitarios de Snyder y Clark). Se llegó a la conclusión de que el método del hidrograma unitario de Snyder presenta mayor confiabilidad como modelo para calibrar y validar cuencas que necesiten datos confiables.

Los ingenieros cubanos Estrada y Pacheco (2012) en su artículo: Modelación hidrológica con HEC – HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba [10] muestra que a través de la caracterización hidrometeorológica de las condiciones climáticas y geológicas de la cuenca Las Coloradas, junto con el análisis hecho de precipitación – escorrentía desde un modelo digital de elevaciones obtenido previamente por georreferenciación, se puede calcular el flujo base y la propagación del cauce para estimar los hidrogramas y se determinaron los parámetros de entrada que necesita procesar el software en cuanto a los eventos de precipitación que posiblemente podrían generar algún tipo de inundación, generados por las precipitaciones ocurridas durante un período determinado de tiempo con el fin de simular el comportamiento de un sistema hídrico ante un evento de precipitación. Con ello se realizaron alrededor de 896 simulaciones, de las cuales 46 de ellas resultaron satisfactorias debido al cumplimiento de los valores admisibles para caudal máximo y tiempos de retención.

Estrada y Pacheco, concluyen sobre la importancia de los modelos hidrológicos e hidráulicos de una cuenca porque permiten tener un instrumento importante en la simulación de panoramas que se pueden presentar en un futuro próximo [10]. En consecuencia, mapear las zonas más propensas a inundar poblaciones cercanas o a lo largo de un río utilizando eventos hidrológicos con diferentes períodos de retorno permite a los hidrólogos dar una representación conceptual completa de los procesos que en dicho fenómeno se ven involucrados.

En términos de software se encontró un estudio relacionado con el desarrollo de un software cuyo propósito es “la adquisición y análisis de datos hidrológicos (precipitaciones y caudales)”. Vargas, Beskow y Leitzke (2019). A partir de las problemáticas encontradas respecto al manejo y análisis de las series hidrológicas, este equipo trabajó en la elaboración del Sistema de Adquisición y Análisis de Datos Hidrológicos (SYHDA) el cual tiene la regulación de flujo de caudales y pruebas de distribuciones de probabilidad que permite estimar dichos parámetros principalmente. SYHDA logró que incorporar las principales bases de datos hidrológicas de Brasil permitiendo su uso para cualquier usuario de disciplinas afines. Los investigadores reportaron respuestas positivas como resultado del uso del software en investigaciones relacionadas con hidrología estadística [26].

De acuerdo con los estudios mencionados anteriormente, se tiene que el acoplamiento y sincronización de los modelos hidráulicos e hidrológicos permiten mapear con mayor precisión el área inundada estimada, proporcionado así una información más detallada sobre los daños por inundación, las posibles acciones de mitigación que se deberían adoptar o contemplar en una posible contingencia, advertencias o alertas tempranas en circunstancias donde no se cuenta con el tiempo suficiente para realizar la evacuación de una población, como también la comparación entre la extensión de las zonas inundadas con su extensión estimada, conociendo así posibles daños socioeconómicos.

2.5.2 Investigaciones nacionales

El software HEC – HMS es un modelo hidrológico que utiliza los caudales pico en la salida de una cuenca, resultado de las precipitaciones presentadas en un determinado tiempo para modelar posibles eventos de inundación que permitan proyectar obras e infraestructuras hidráulicas más eficientes y funcionales que sean capaces de sobrellevar adecuadamente situaciones de peligro ocasionadas por lluvias intensas; por esta razón, es necesario conocer y analizar la información estadística muestreada, procesada y avalada por el IDEAM. Debido a que Colombia es un país rico en el recurso hídrico, resulta relevante estudiar bajo modelaciones los ríos a nivel nacional con falta de información de caudales y aforos por las

razones ya mencionadas.

En este sentido se menciona el informe de Gamba y González (2015) realizaron curvas de crecimiento hídrico para diferentes caudales máximos instantáneos existentes en la cuenca del Río Magdalena con base en la selección de la mejor distribución de probabilidad que mejor se ajustara a las condiciones morfológicas de la cuenca hidrográfica, en este caso trabajaron con la distribución hidrológica GEV (método de momentos ponderados) ya que fue la que mejor se ajustó al comportamiento de los datos probabilísticos que previamente habían recopilado dentro del estudio por medio de otras distribuciones probabilísticas como la PEARSON TIPO III (método de momentos) y LOG PEARSON TIPO (método Sam), comparando estos valores de promedio y desviación estándar entre todas las probabilidades determinando con mayor exactitud los caudales máximos con diferentes tasas de retorno [27].

Después de determinar la distribución que mejor representa los valores encontrados del caudal máximo en la cuenca, y de generar las curvas IDF intensidad - duración - frecuencia por el método regionalizado, que consiste básicamente en seleccionar las estaciones de influencia en el área de estudio del cauce obteniendo de ellas los valores de precipitación máxima en 24 horas de los últimos años y por medio de la interpolación con los polígonos de Thiessen, identificaron la cobertura vegetal y el tipo de suelo presente en la cuenca, al igual que los hidrogramas de caudales y los hietogramas de precipitación neta e infiltración para encontrar los caudales máximos a través de las simulaciones hechas en el software utilizado en el desarrollo de este estudio.

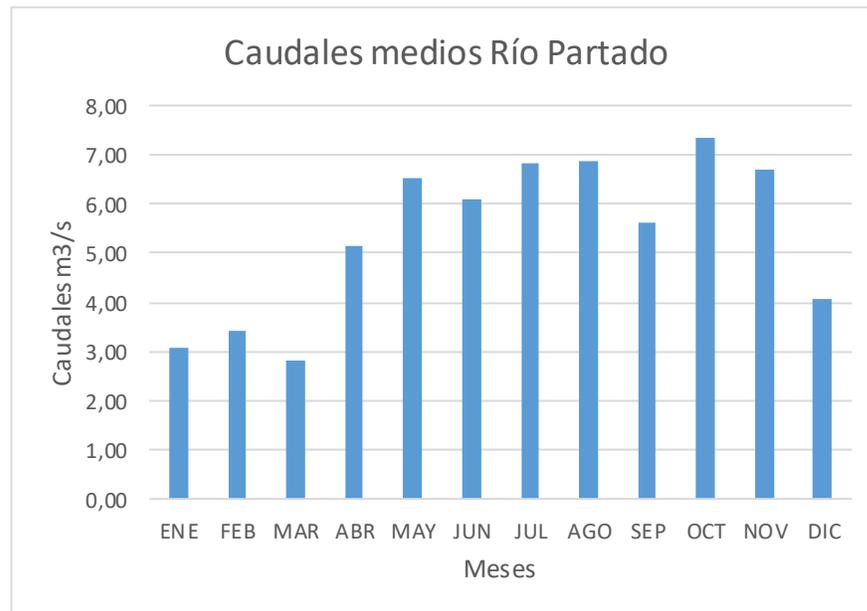
Como resultado de esta investigación se estiman los rendimientos de los caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos de retorno en el Río Magdalena, prediciendo el comportamiento de estos durante diferentes intervalos de tiempo, por medio del Test Chi cuadrado, que determina las ecuaciones características de cada uno de los caudales máximos instantáneos a diferentes periodos de retorno, para las curvas de rendimiento hídrico caudal vs área y caudal vs drenaje.

Estudio hidrológico e hidráulico en ejecución sobre el Río en estudio

El informe realizado por el ingeniero Jesús Torres, facilitó los datos de los estudios correspondientes para complementar este trabajo de grado. Gracias a estos aportes se logró determinar la curva de duración de caudales mensuales multianuales del Río Partadó para tener una noción cercana a los valores de Caudales medios y

complementar el estudio del río con los resultados de precipitaciones encontrados por los autores para aplicar la metodología HEC -HMS. La firma CRA fue la encargada de realizar el estudio de prefactibilidad del diseño de una pequeña “central hidroeléctrica Juradó” midiendo los caudales medios mensuales desde el año 1972 hasta 1988 (Ver Anexo 6). Antes de encontrar la curva, en la Gráfica 1 se representan los caudales medios del Río Partadó obtenido por la serie de caudales medios ya mencionada.

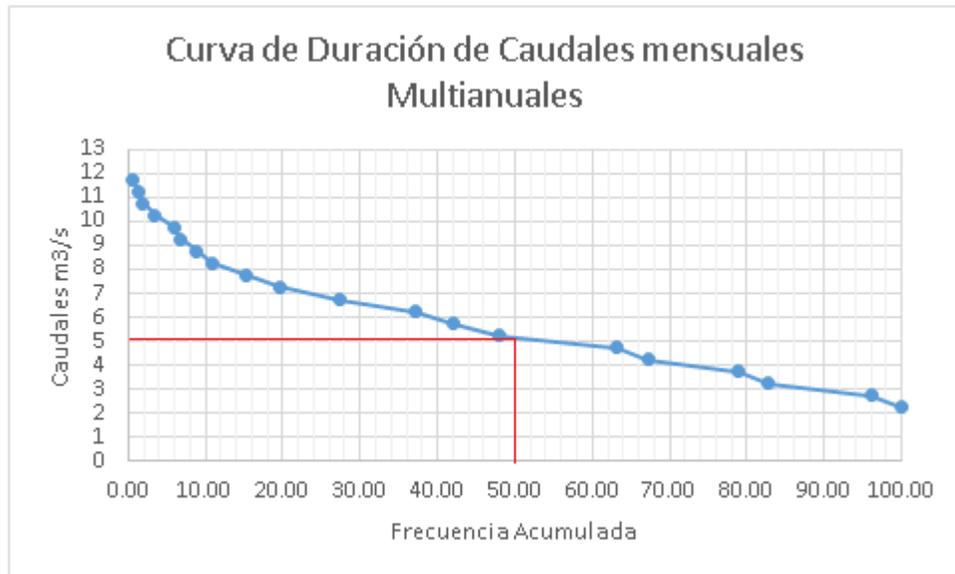
Grafica 1. Caudales medios mensuales Río Partadó



Fuente: Autores.

El régimen hidrológico puede resumirse gráficamente realizando la curva de duración de caudales CDC (magnitud de caudales vs frecuencia o porcentaje de excedencia). Para generar la curva se utilizaron series mensuales de caudales medios del Anexo 6, provenientes de la estación La Teresita localizada en la parte alta del Río Truandó, lo anterior dado a que este río posee un régimen de lluvias similar al de la cuenca alta del Río Partadó. De los mismos datos se presenta un caudal mínimo de 2.5 m³/s. En la Gráfica 2 se estima que con la curva de duración de caudales generada se presenta un caudal medio de 5 m³/s como se evidencia en la Grafica 2.

Grafica 2. Curva de Duración de Caudales mensuales Multianuales Río Partadó



Fuente: Autores.

Finalmente, los antecedentes anteriormente mencionados se relacionan con el software, metodologías y herramientas empleadas para la estimación de los caudales máximos que nos permite entender dos cosas, una es que, en Colombia, especialmente en el pacífico colombiano, zona de interés de nuestra investigación, abunda en gran medida la oferta hídrica gracias a su posición geográfica y la otra, que se requiere un manejo inteligente y eficiente de estos afluentes. Es por ello que por medio de la implementación de este proyecto se pretende dar a conocer con precisión, toda la información básica necesaria respecto al comportamiento de las cuencas hidrográficas existentes en la región, identificando los parámetros de interés que usualmente son utilizados en el diseño de estructuras hidráulicas, con el fin de gestionar adecuadamente el recurso hídrico y poder formular obras ingenieriles sustentables articuladas con el cuidado del medio ambiente, garantizando el acceso y la cobertura de la prestación de servicios básicos como el agua potable y la energía eléctrica a las poblaciones más vulnerables que habitan esta zona del país y que no cuentan con estos recursos.

Además de lo anteriormente descrito, al revisar investigaciones de orden nacional e internacional relacionadas con la problemática, se evidencian algunos vacíos, que se tendrán en cuenta, los cuales se encuentran en el subcapítulo de Antecedentes en el presente trabajo.

3. METODOLOGÍA

El paradigma de investigación que se usó en este trabajo será positivista, teniendo en cuenta la definición de Cohen [28] que asume que en este paradigma el investigador está separado del estudio y los objetos, la realidad es objetiva y es de carácter científico. En este caso, los investigadores no fueron directamente a realizar estudios de aforo en el río, sino que a través de otras fuentes se analizaron los datos, se hizo un tratamiento de los mismos con ecuaciones de hidrología y posteriormente calibrar estas ecuaciones dentro del software.

Por consiguiente, el enfoque de la investigación fue cuantitativo, debido a que se trabajó con un lenguaje de programación orientado a objetos y documentos para analizar los datos. Como lo menciona Hernández-Sampieri: “se destaca el desarrollo de programas computacionales... .. además mejoraron los procesos y se crearon programas electrónicos que facilitan la tabulación de datos; asimismo, ahora se manejan con mayor propiedad los marcos epistemológicos⁵”. [29]

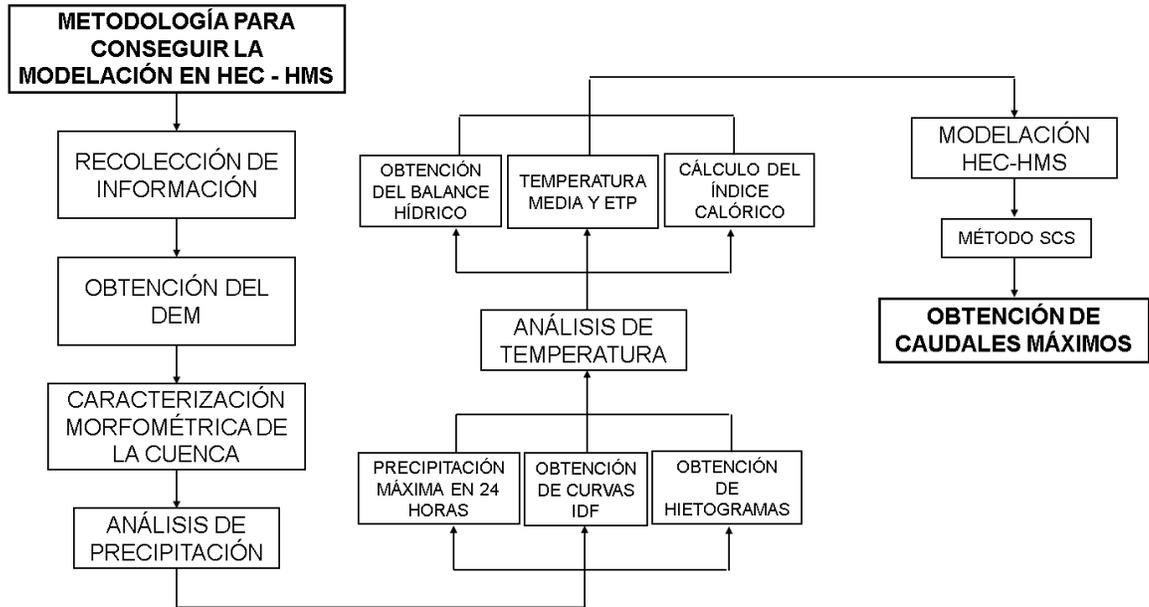
Teniendo en cuenta que este estudio cuenta con elementos metodológicos de la ingeniería civil y programación el desarrollo estuvo dividido en dos partes como se mostrará en las Ilustraciones 9 y 10.

3.1 Metodología abordada para el estudio hidrológico

Para llevar a cabo esta metodología se construye el siguiente esquema con el propósito de establecer las etapas para alcanzar los objetivos específicos relacionados con el estudio hidrológico y la caracterización de la cuenca para conseguir la modelación en HMS. De acuerdo con esto, primero se presenta la metodología usada en ingeniería civil dividida y resuelta por etapas.

⁵ R. H. Sampieri, C. F. Collado y M. d. P. Baptista Lucio, Metodología de la Investigación, vol. Sexta Edición, México D.F.: McGRAW Hill Education, 2014.

Ilustración 9. Proceso metodológico de las fases en la modelación hidrológica



Fuente: Autores.

3.2 Metodología abordada en el desarrollo del software BLASTOISE

- En la ejecución del proyecto se decide implementar la metodología en cascada porque se considera la que mejor define cada una de las etapas de desarrollo además de que posee un enfoque metodológico riguroso y concreto al ordenar las etapas del proceso de desarrollo de software. A continuación, se reúnen las razones por las cuales se aplica el método de evolución en cascada:
- La metodología en cascada tiene la ventaja de que cada etapa de realización está bien definida, por tanto, en este caso es el método más rápido para el desarrollo de esta herramienta para ingeniería civil.
- Se eligió la Metodología Cascada debido a que es el más utilizado para diseño de software, permite identificar el proceso de cada uno de los desarrollos por etapas las cuales deben seguirse de manera consecutiva y ordenada para garantizar que el objetivo se cumpla.

- Esta metodología obliga a los investigadores a ser organizados en cada una de las fases las cuales no se pueden mezclar; y aunque parezca complejo, es más sencillo de lo que parece y el resultado final es un producto de calidad.
- Sin embargo, una de las desventajas es el tiempo que se requiere, ya que es un ciclo largo y no permite devolverse a las fases anteriores en caso de necesitar nuevas incorporaciones.

El anterior esquema plantea el enfoque metodológico que se da en el desarrollo de este tipo de proyectos, que también se aplica en este proyecto en el Río Partadó al ejecutar el tercer objetivo específico. Con esta representación esquemática presentada se visualiza la información y se da una noción de los requerimientos que se deben cumplir al aplicar el modelo en cascada.

Ilustración 10. Metodología en cascada usada en el desarrollo del software



Fuente: Elaboración propia con datos de ionos.es.

La metodología en cascada fue propuesta a finales de 1970 por Winston Royce y se caracteriza por ordenar detalladamente las etapas del proceso para el desarrollo del software, donde no se puede dar inicio a una etapa si no se ha completado la anterior [30]. Esta investigación aplica este método en cinco fases las cuales logran abarcar los requerimientos, diseño, codificación y pruebas del software cada una de ellas relacionada con un objetivo específico para llevar a cabo su desarrollo. A continuación, se describe esta metodología y la forma en que se pretende desarrollar el software:

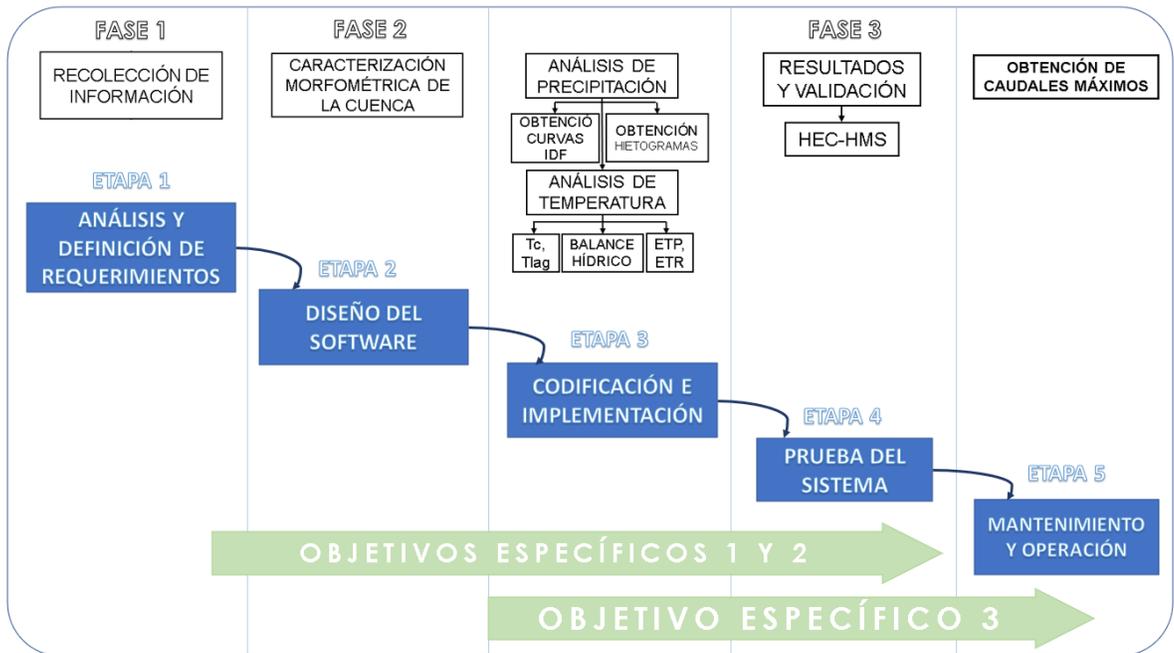
4. DESARROLLO DE LA PROPUESTA

A partir de la fase de *caracterización morfométrica de la cuenca* (Ver Ilustración 9) se combinaron las dos metodologías (Ilustración 11), tanto del estudio hidrológico como la del desarrollo del software porque se consideró que las etapas de ambas metodologías son pertinentes y con la suficiente relación como para su desarrollo en forma paralela ya que los datos que se recolectaban para el proceso hidrológico servían de prueba (una vez programadas las ecuaciones) para iterar y probar la aplicación de BLASTOISE con el modelo en cascada.

El desarrollo de la propuesta se trabaja con el modelo en cascada de la siguiente manera:

- La base principal es la elaboración de los parámetros de hidrología aplicados al Río Partadó y en consecuencia a medida que se recopile la información se generarán las funcionalidades de software una vez llegada la etapa de codificación e implementación.
- El desarrollo del software se construye por “etapas” siguiendo la secuencia en cascada. Relacionando las ya ejecutadas por el paso anterior como punto de partida para las fases de programación (Ver Ilustración 11).
- Para hacer una distinción de fácil comprensión para el lector los procesos hidrológicos se denominan “FASES” y luego se hace la resolución de programación en “Etapas”.
- Los aspectos anteriores se detallan y desarrolla en el mismo orden que se muestra en la Ilustración 11.
- Las “FASES” van a ser los títulos principales del desarrollo y las “Etapas” simplemente se nombran a medida que se considere como finalizada antecesora.

Ilustración 11. Complementación de las dos metodologías



Fuente: Autores.

4.1 FASE 1: Recolección de información.

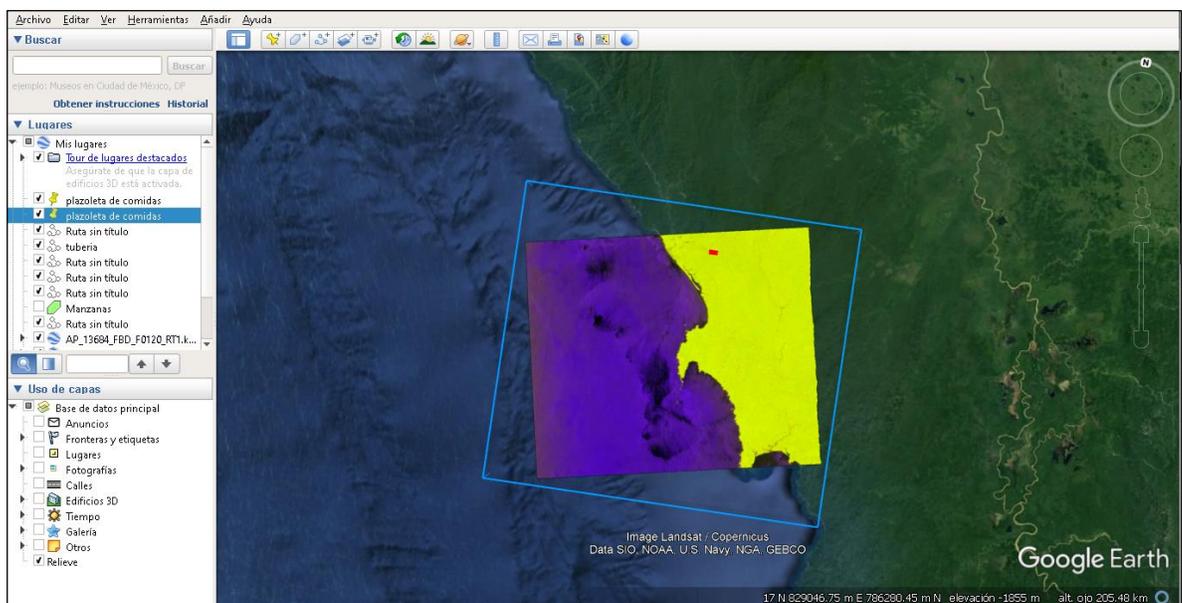
Uno de los primeros pasos en la realización del proyecto que se realizó fue encontrar y obtener digital y físicamente la cartografía, mapas topográficos, mapas satelitales, y todo tipo de información de la cuenca del Río Partadó. Para describir lo anterior, se enuncian los archivos y registros buscados para tal fin:

1. Plancha de la cuenca realizada con AUTODESK MAP 2012 para las planchas digitales de la fuente hídrica a una escala 1:25000.
2. Las planchas se georreferencian con el sistema MAGNA-SIRGAS en el datum MAGNA COLOMBIA OESTE para corregir y rectificar información.
3. Formatos de representación vectorial Shapefile traídos del IGAC desde su sistema de datos.
4. Tratar la información digital del modelo de terreno con corrección radiométrica con los mapas de cobertura ALOS PALSAR de la NASA con 12.5 metros por pixel.
5. Comprobar los datos de las planchas con la información de sensores manteniendo la misma área de referencia.
6. Dada una exploración topográfica del mismo lugar de estudio, comparar y corroborar información en físico con la información digital.

4.1.1 Obtención del DEM

La página utilizada para poder descargar el DEM fue Alaska Satellite Facility con el instrumento Palsar del satélite avanzado de información terrestre-1 (ALOS). En este sitio web se crea una cuenta y selecciona el área que va a ser nuestro objeto de estudio (los modelos encontrados tienen 12.5 metros de precisión).

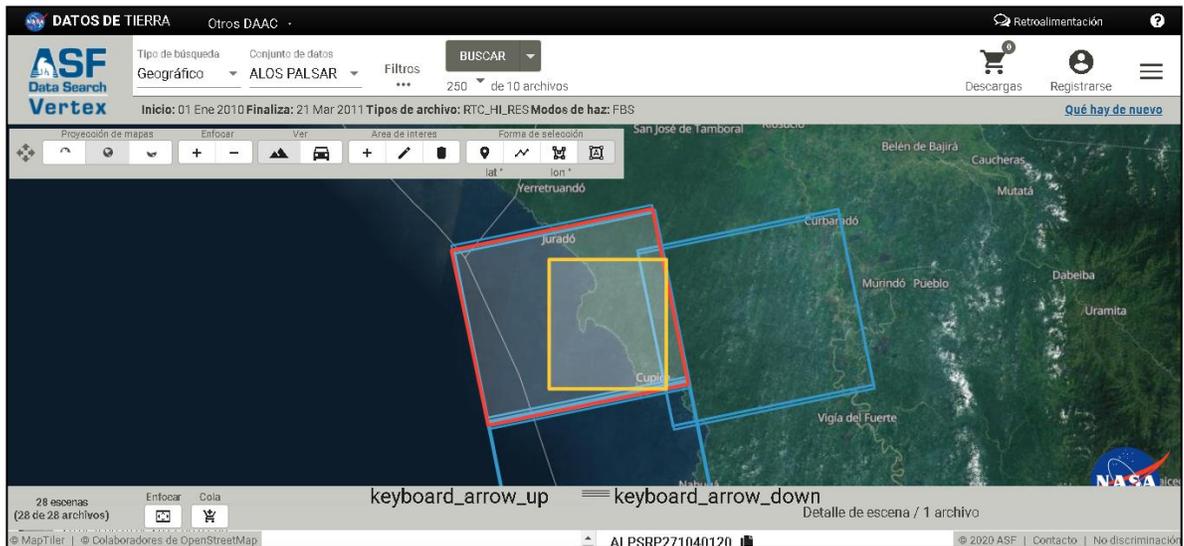
Ilustración 12. Delimitación del área de estudio.



Fuente: Autores.

Con el área ya seleccionada se procede a visualizar el dataset de ALOS PALSAR para que la página automáticamente haga la búsqueda y se dirija al área seleccionada.

Ilustración 13. Resultado de la búsqueda ALOS PALSAR con la clasificación DEM seleccionada



Fuente: Autores.

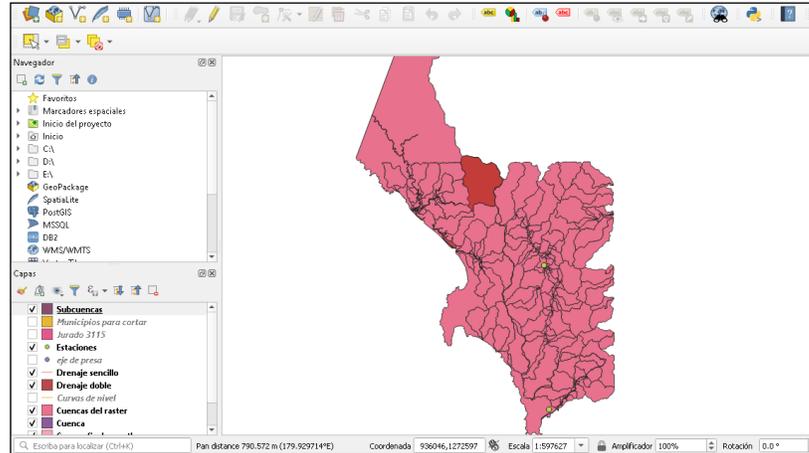
Ya encontradas las escenas hay que modificar los datos de búsqueda en la herramienta “more” y editar los datos de tipo de archivo seleccionando “Hi-Res Terrain Corrected” y el tipo de modo marcando FBS (los cuales almacenan archivos del mismo tipo donde están los DEM que nos interesan) para finalmente obtener nuestra clasificación o filtro que necesitamos.

4.1.2 Delimitación de la cuenca

La cuenca del río se delimitó usando el programa ArcGIS y QGIS mediante la cartografía básica digital obtenida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi se realizaron los pasos para obtener la cuenca en estudio.

4.1.3 Caracterización morfométrica de la cuenca en el sistema SIG

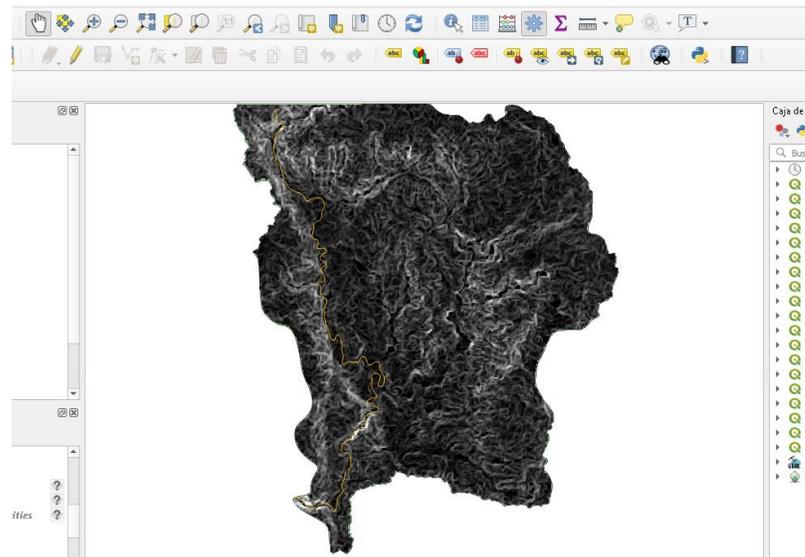
Ilustración 14. Selección DEM obtenida en ArcGIS



Fuente: Elaboración propia.

Con la delimitación de la cuenca en ArcGIS (lograda con la información geográfica detallada en los pasos anteriores) se hizo el cálculo de los parámetros morfométricos obteniendo así el área de la cuenca, el perímetro de la cuenca, la pendiente y la longitud de la misma. En esta parte se representaron líneas divisorias y se calcularon varios de los parámetros morfométricos con ayuda de ArcGIS a partir de la cartografía conseguida del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, con planchas digitales a una escala de 1:25000.

Ilustración 15. Obtención del Modelo Digital de Elevación



Fuente: Autores.

4.2 FASE 2: Caracterización morfométrica Cuenca Alta del Río Partadó

En una cuenca hidrográfica parámetros como la longitud y pendiente de los ríos que hacen parte del sistema de drenaje determinan la respuesta de todo el conjunto ante la presencia de periodos de lluvia intensa. Los siguientes parámetros se calculan con ecuaciones tomadas del informe del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del Río La Vieja [31].

4.2.1 Parámetros físicos de la cuenca

Área de drenaje de la cuenca (A_c): Es el área plana (o área en proyección horizontal) del área de drenaje de un sistema de escorrentía y que se encuentra dirigido a un mismo cauce. Dentro del área de drenaje se considera también el punto de concentración el cual se puede entender como el lugar que recolecta toda la escorrentía. El área de drenaje de la cuenca del Río Partadó se presenta en la Tabla 4 [31].

Tabla 2. Área de la cuenca hidrográfica del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Área en km²
Cuenca Río Partadó	74.04

Fuente: Autores.

Perímetro de la cuenca (P): Los límites de la cuenca están definidos gracias a su perímetro, es por esto que es un parámetro importante. El perímetro depende de la superficie y por tal razón da información sobre la forma de la cuenca. Normalmente se representa con la letra P. Por lo anterior es un insumo fundamental para el cálculo de los parámetros de forma de la cuenca, en la Tabla 3 se muestra el perímetro de la microcuenca del río Partadó [31].

Tabla 3. Perímetro de la cuenca hidrográfica del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Perímetro en km
Cuenca Río Partadó	47.03

Fuente: Autores.

Longitud de la cuenca (L): La longitud de la cuenca es una longitud horizontal medida a lo largo del cauce o en dirección paralela [31]. El Río Partadó posee una longitud de 14.8 Km y se detalla en la tabla 6.

Tabla 4. Longitud recta de la cuenca hidrográfica del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Longitud en km
Cuenca Río Partadó	14.8

Fuente: Autores.

Ancho de la cuenca (W): El ancho de una cuenca hidrográfica se obtiene de dividir su área de drenaje entre su longitud. El río en estudio abarca un ancho W de 5.0 Km (ver Tabla 7).

Tabla 5. Ancho de la cuenca hidrográfica del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Longitud en km
Cuenca Río Partadó	5.0

Fuente: Autores.

4.2.2 Parámetros de forma de la cuenca

La manera de obtener la forma de una cuenca hidrográfica y los fenómenos localizados en su misma región (fisiografía) es gracias a factores geológicos. Es bien sabido en hidrología que, para interpretar cuantitativamente la forma de la cuenca, se tiene que confrontar y examinar su geometría con la de figuras geométricas conocidas como lo son: el círculo, el óvalo, el cuadrado y el rectángulo, generalmente [31].

Índice de compacidad o de Gravelius (Kc): El índice de compacidad es la división entre el perímetro de la cuenca en estudio respecto al perímetro de un círculo de su misma área [31]. Este parámetro es adimensional y brinda una idea de la forma de la cuenca porque **describe en rasgos iniciales la escorrentía y la forma que tendrá el hietograma de precipitación** resultante de una lluvia sobre la cuenca [32].

$$K_c = \frac{P_{cuenca}}{2\pi \left(\frac{A_{cuenca}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Dónde:

P: Perímetro de la cuenca en (Km).

Ac: Área de drenaje de la cuenca en (km²).

Sin tener en cuenta el área estudiada se debe dar un valor Kc de 1 para cuencas idealizadas con forma exacta de un círculo. Un valor de Kc nunca podrá estar debajo de 1. Como se mencionó anteriormente, se puede plantear que la cuenca tiene tendencia a reunir fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento si el valor da cercano a 1 (uno), como se puede intuir entre más pequeño sea el Kc, lo cual quiere decir que entre más bajo el Kc mayor será la concentración de agua [31], y del mismo modo valores mayores a 1.5 tienen su propia categoría. Estas clasificaciones se muestran en la Tabla 8.

Tabla 6. Índice de compacidad para la evaluación de la forma

Clase	Rango	Descripción
Kc 1	1 a 1.25	Forma casi redonda a oval – redonda.
Kc 2	1.25 a 1.5	Forma oval – oblonga.
Kc 3	1.5 a 1.75	Forma oval – oblonga a rectangular – oblonga.
Kc > 1.75	>1.75	Rectangular.

Fuente: Elaboración propia con datos de Revista Universitaria de Geografía (2018) [33].

El coeficiente de compacidad de la cuenca hidrográfica del Río Partadó es de 1.53, lo que indica una forma Oval – Oblonga a Rectangular – Oblonga según la Tabla 8.

Tabla 7. Índice de Gravelius de la cuenca del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Índice de Gravelius	Clasificación
Cuenca Río Partadó	1.53	Forma oval – oblonga a rectangular – oblonga.

Fuente: Autores.

Factor de forma (Kf): El parámetro de factor de forma Kf es adimensional y se define como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud (L)

de la misma. Da indicios de la tendencia que posee la cuenca a crecidas, rápidas y muy intensas o lentas y sostenidas, si sus valores tienden a valores extremos pequeños o grandes, ver tabla 10. [31].

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Dónde:

L: Longitud de la cuenca en (Km).

A: Área de drenaje de la cuenca en (km²).

Tabla 8. Clasificación del factor de forma

Valores de Kf	Características
< 1	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas
= 1	Forma cuadrada
> 1	Tiende a ser achatada, tendencia a ocurrencia de avenidas

Fuente: Elaboración propia con datos del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja [31].

El caso en estudio del Río Partadó posee un factor de forma de 0.34, que por estar significativamente debajo de 1 se clasifica con tendencia a ser alargado en vez de circular y con baja susceptibilidad a las avenidas. Descrito esto, el Río Partadó no tiende a presentar crecidas súbitas en el caso de existir lluvias intensas simultáneamente en toda o en gran parte de su superficie.

Tabla 9. Factor de forma de la cuenca del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Factor de forma	Clasificación
Cuenca Río Partadó	0.34	Tiende a ser alargada, baja susceptibilidad a las avenidas

Fuente: Elaboración propia con datos del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja [31].

Índice de alargamiento (IA): Este índice define si la cuenca es alargada cuando su valor es muy elevado a la unidad. Se obtiene calculando la división de entre la longitud del cauce de la cuenca respecto al ancho mayor de ella. [31].

$$I_A = \frac{L}{A_n}$$

Dónde:

L: Longitud de la cuenca en (Km).

An: Ancho máximo de la cuenca en (km).

Tabla 10. Clasificación del Índice de alargamiento

Valores del Índice alargamiento	Características
IA > 1	Cuenca alargada.
IA < 1	Cuenca achatada y por lo tanto el cauce principal es corto.

Fuente: Elaboración propia con datos del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja [31].

Basándose en la clasificación tenida en cuenta en la Tabla 12, como el índice de alargamiento de la cuenca del Río Partadó es de 2.96, quiere decir que es una

cuenca alargada con una forma similar a una espiga en su sistema de drenaje. Con esta forma el sistema es capaz de recibir fuertes precipitaciones sin generar una crecida de enormes dimensiones.

Tabla 11. Índice de alargamiento de la cuenca del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Índice de alargamiento	Clasificación
Cuenca Río Partadó	2.96	Cuenca alargada.

Fuente: Elaboración propia con datos del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja [31].

4.3 Parámetros morfométricos de la cuenca

De acuerdo con Gaspari (2012) una modelación hidrológica para saber la captación y el movimiento de agua de lluvia requiere de forma indispensable del análisis de las características morfométricas la cuenca hidrográfica en estudio las cuales vienen dadas mediante los parámetros trabajados en este estudio los cuales son el relieve, la forma y el drenaje [34]. Una vez calculados estos atributos naturales de las cuencas hidrográficas, permiten realizar una comparación correspondiente contra otras estudiadas en otros proyectos de manera exacta una porción de su propia superficie con otras ya estudiadas. Hecha la comparación esta también permite interpretar la funcionalidad hidrológica y definir estrategias en proyectos que se deseen trabajar con relación a la misma.

Ilustración 16. Mapa topográfico del Río Partadó



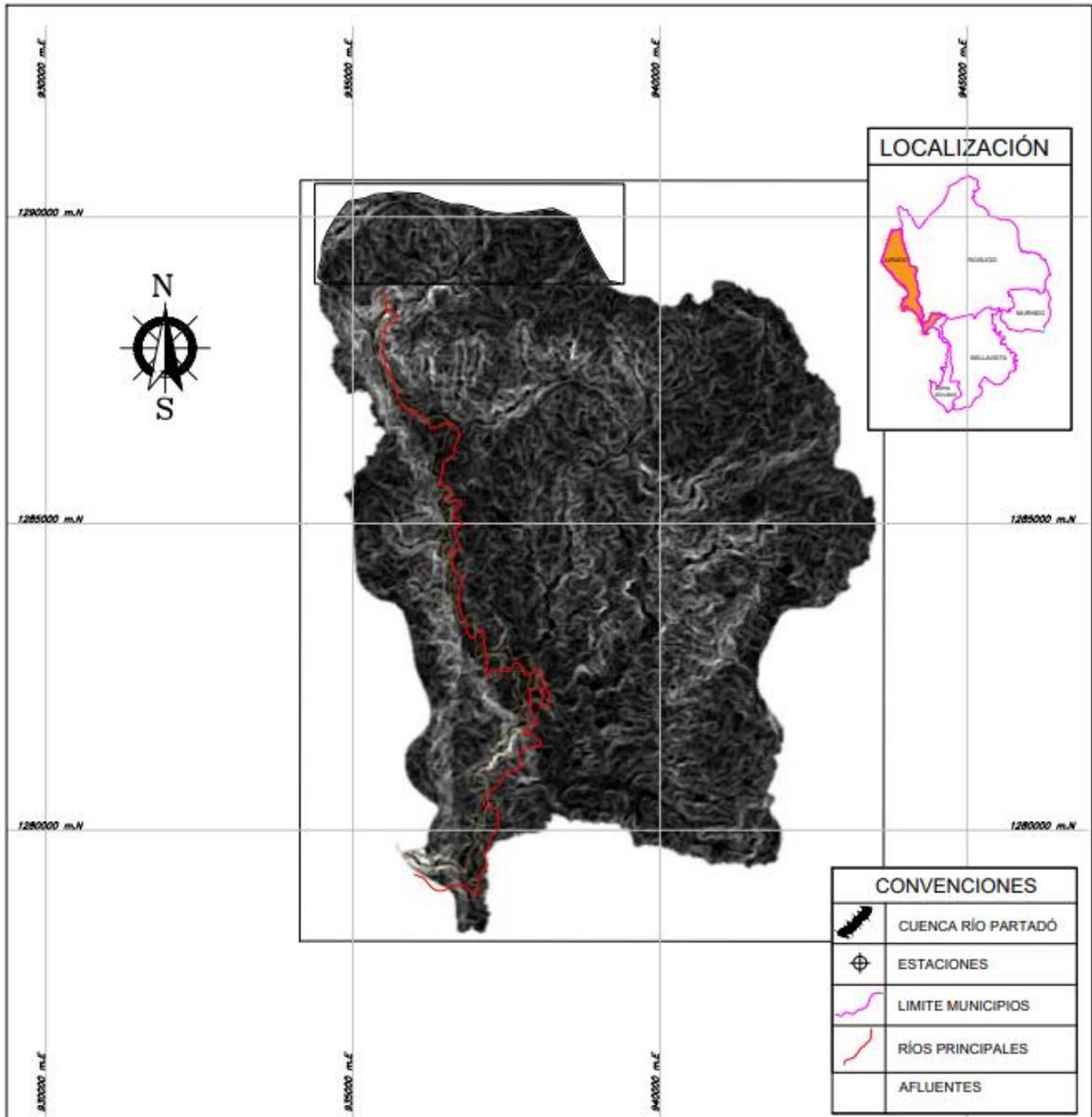
Fuente: IDEAM. dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/

La caracterización morfométrica se comprobó con las divisorias de aguas calculando las propiedades más importantes bajo la cartografía básica suministrada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). Dichos parámetros fueron revisados por el sistema de información geográfica establecida por la misma entidad (SIG) y a su vez con datos suministrados por el IDEAM.

A continuación, se presenta el cálculo de los parámetros morfométricos de la cuenca del río Partadó ubicado en el municipio de Juradó, a partir de los insumos como el modelo digital del terreno, la red de drenajes y la delimitación de la cuenca abastecedora de los centros poblados aledaños. En este proceso se calculan los tiempos de concentración, el porcentaje de impermeabilidad y el número de curva ya que estos son empleados en el modelo hidrológico para determinar los caudales máximos por medio del software HEC-HMS.

4.3.1 Parámetros de relieve

Ilustración 17. Modelo digital de elevación logrado.



Fuente: Autores.

Pendiente media de la cuenca: La pendiente es la variabilidad de la inclinación de una cuenca, su análisis es fundamental para especificar el comportamiento de la cuenca respecto al movimiento de las capas del suelo producido por fenómenos como la erosión o sedimentación, puesto que, en zonas escarpadas o fuertemente

accidentadas ocurren con mayor frecuencia problemas de degradación entretanto en áreas planas surgen generalmente problemas de drenajes y sedimentación. La pendiente se tiene en cuenta porque de ella depende el comportamiento de la cuenca debido a que afecta de una mayor o menor manera el escurrimiento de aguas lluvias. La anterior información se caracteriza con el uso del suelo y la red de drenaje. El escurrimiento y su magnitud debidas a la pendiente afectan el tiempo que tarda en formarse una creciente en el cauce principal [31].

En cuencas con pendientes fuertes existe la tendencia a la generación de crecientes en los ríos en tiempos relativamente cortos, estas cuencas se conocen como torrenciales, igual que los ríos que la drenan. En la Tabla 14 se encuentra la clasificación conforme a la pendiente [31].

Tabla 12. Clasificación de las cuencas de acuerdo con la pendiente

Pendiente Media %	Tipo de Relieve
0 - 3	Plano
3 - 7	Suave
7 - 12	Medianamente accidentado
12 - 20	Accidentado
20 - 35	Fuertemente accidentado
35 - 50	Muy fuertemente accidentado
50 - 75	Escarpado
> 75	Muy escarpado

Fuente: Elaboración propia con datos del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del Río La Vieja [31].

Para estimar la pendiente media de la cuenca se tiene en cuenta lo expuesto en el criterio de Alvord, el cual trabaja con líneas longitudinales medias que pasan por las curvas de nivel [32]. Así, se obtiene la pendiente media de la cuenca ponderando la pendiente calculada para cada franja en función de su área, a través de la siguiente ecuación.

$$S_m = \frac{L * D}{A}$$

Donde:

Sm: Pendiente media de la cuenca

D: Diferencia entre curvas de nivel

L: Longitud total de las curvas de nivel

A: Área de la cuenca

A continuación, se muestra en la Tabla 15 el resultado obtenido para la pendiente de la cuenca del Río Partadó, al igual que su clasificación.

Tabla 13. Pendiente media de la cuenca del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Pendiente Media %	Clasificación
Cuenca Río Partadó	20.05 %	Fuertemente accidentado

Fuente: Autores.

Elevación media de la cuenca: La elevación media es importante en zonas montañosas donde participa el escurrimiento y dentro de otros diferentes aspectos que también actúan en el régimen hidrológico [32]. La elevación media es el cambio altitudinal que interviene sobre el clima de la cuenca, y por consiguiente sobre el mismo régimen hidrológico. A partir de aquí sirve como punto de partida para caracterizar zonas ecológicas y climatológicas dentro de distintos lugares de la cuenca. Aquí se trabaja con la curva hipsométrica porque esta define la relación entre la altitud y las áreas que quedan sobre esa misma altitud. Esta curva, en conjunto con datos de precipitación sirven para zonificar lugares según la pluviometría y da la relación entre elevación y precipitación [31].

La elevación media de la cuenca del Río Partadó se puede observar en la Tabla 16 y puede calcularse como:

$$H_{media} = \frac{\sum Area * A_{<. mediai}}{\sum Area}$$

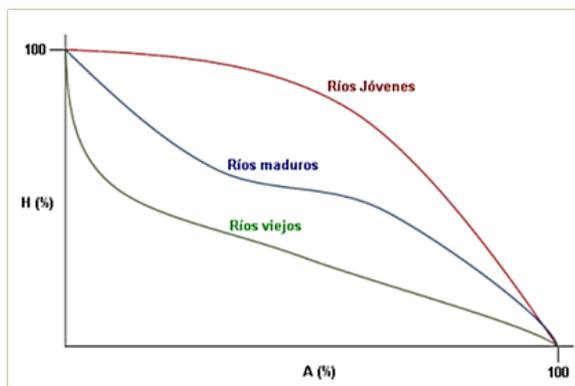
Tabla 14. Elevación media de la cuenca del Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Elevación media de la cuenca m.s.n.m
Cuenca Río Partadó	434.0

Fuente: Autores.

Curva hipsométrica: Como se venía mencionando dentro de la definición de elevación media de la cuenca, la función hipsométrica determina el valor de la altitud media en m.s.n.m. de forma gráfica y analítica. La curva hipsométrica se conoce también como la representación gráfica del relieve medio de la cuenca y para dibujarla se ubican en el eje de las abscisas están las áreas acumuladas en porcentajes o en kilómetros cuadrados, y alcanzan en el eje de las ordenadas las cotas respectivas.

Ilustración 18. Clasificación de los ríos según la curva hipsométrica



Fuente: Planes de ordenación y manejo de cuencas hidrográficas.

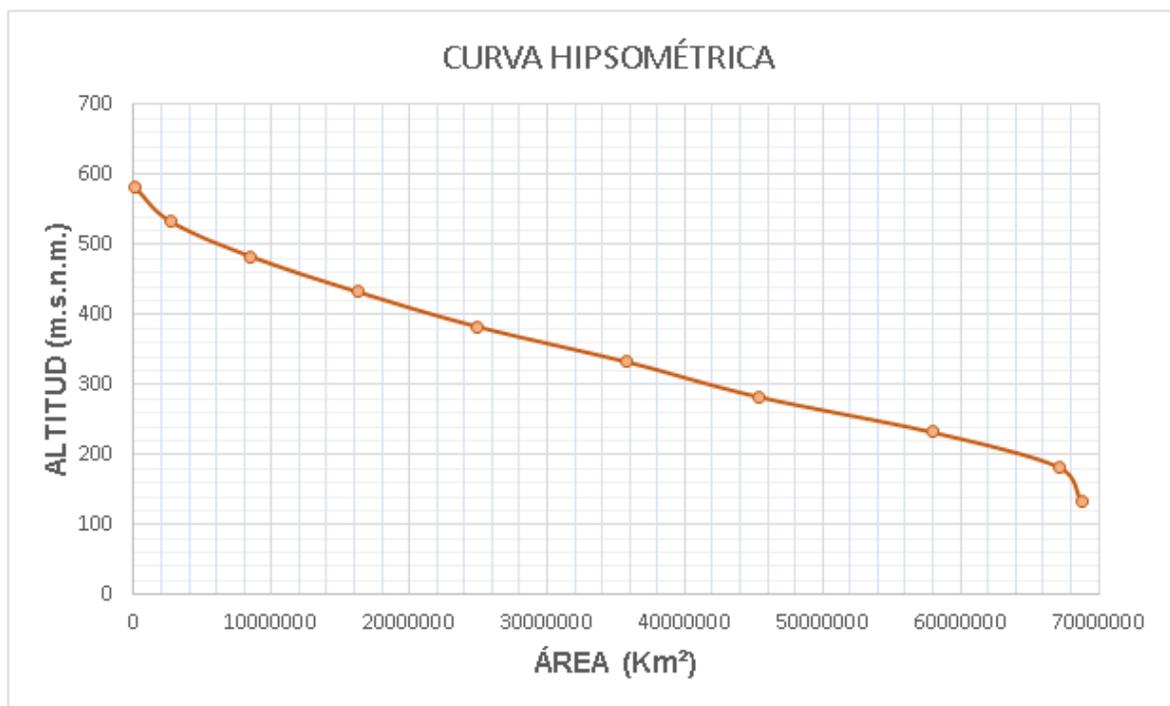
En la Tabla 17, se presenta la clasificación del Río Partadó de acuerdo a la curva hipsométrica generada para la cuenca donde se ubica este rio, de la cual se obtuvo, según la curva mencionada, es un **río viejo** (ver Grafica 3).

Tabla 15. Clasificación del Río Partadó de acuerdo a la curva hipsométrica

Cuenca Hidrográfica	Clasificación del Río
Cuenca Río Partadó	Río viejo

Fuente: Autores.

Grafica 3. Curva Hipsométrica del cauce principal cuenca del Río Partadó



Fuente: Autores.

La curva hipsométrica es un criterio de cómo varía el escurrimiento a medida que avanza la variación del territorio de la región, y esto es un fundamental para caracterizar zonas ecológicas y climatológicas.

ETAPA UNO DEL MODELO EN CASCADA: Análisis de los requerimientos

En esta primera fase se encuentra la especificación de levantamiento de requerimientos del software los cuales se identifican y analizan bajo la revisión del documento estándar de la norma IEEE 830. Este documento guía a seguir una serie de procedimientos para la determinación de los requisitos a tener en cuenta en el desarrollo tales como interfaz, estructuras posibles, funcionalidades deseables y calidades de cada especificación. En esta fase es donde se establecen las necesidades de los usuarios para decidir qué metas se deben cubrir, realizando una descripción de los requisitos por lo que esta etapa es una de las más importantes del modelo en cascada dado a que no da la opción de solicitar nuevos requisitos en una etapa más avanzada.

Tabla 16. Requerimientos de Interfaces Externas

ID Requerimiento	NOMBRE DEL REQUERIMIENTO
RF001	La aplicación debe tener un Menú Principal que contiene las siguientes funciones: "Balance Hídrico", "Parámetros de Drenaje", "Curvas IDF" y "Otras Funciones".
RF002	El Menú "Balance Hídrico" contiene los siguientes ítems: "PROM(Tj)" para ingresar temperaturas medias mensuales, el ítem: "Precipitación(mm)" donde se ingresan las precipitaciones totales mensuales y el ítem "Factor Corrección" para el ingreso de los factores de corrección por latitud.
RF003	El Menú "Balance Hídrico" contiene los botones: "importar tabla de Excel", "Exportar Excel", que generan la matriz calculada y la importan en un archivo Excel respectivamente , y el ítem "Generar gráfica".
RF004	El Menú "Parámetros de drenaje" contiene los ítems: "Área", "Perímetro", "Longitud", "Pendiente" y "Desnivel" necesarios para ingresar los parámetros de ingreso de la cuenca en estudio.
RF005	El Menú "Parámetros de drenaje" trae el botón: "Exportar Excel".
RF006	El Menú Curvas IDF contiene los ítems "a", "b", "c", "d" para ingresar los parámetros de ajuste de regresión del INVÍAS de acuerdo a la zona en estudio.
RF007	El Menú Curvas IDF trae los botones: "Exportar tabla a Excel".
RF008	El Menú Curvas de nivel contiene el submenú: "Generar Hietogramas" que mostrará el cálculo en una matriz y la gráfica de los hietogramas de precipitación de la respectiva curva IDF.
RF009	El Menú otras funciones contiene los submenús: "Distribución Gumbal" y "Estaciones IDEAM"
RF011	El submenú "Estaciones IDEAM" muestra los ítems para consultar los diferentes tipos de estaciones hidrológicas con su respectiva información.

Fuente: Autores.

Tabla 17. Requerimientos Funcionales

ID Requerimiento	NOMBRE DEL REQUERIMIENTO
RF012	El usuario ingresa a la aplicación.
RF013	En cada formulario de la aplicación se deben ingresar los datos obligatorios de manera correcta de acuerdo al parámetro que se quiera calcular.
RF014	El usuario dispone del Menú principal para seleccionar el parámetro que quiere calcular.
RF015	El usuario puede ver los datos calculados en la matriz de cada formulario.
RF016	El usuario dispone de dos botones para ingresar y exportar datos desde Excel.
RF017	El usuario puede generar gráficas en los formularios principales.

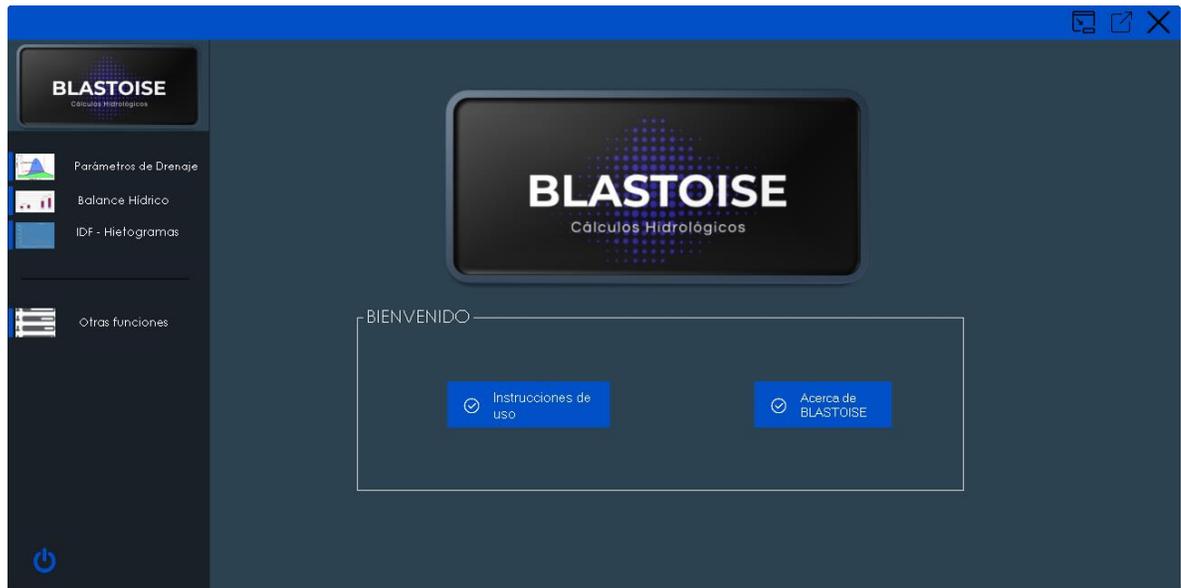
Fuente: Autores.

ETAPA DOS DEL MODELO EN CASCADA: Diseño del software

Con los requisitos generales identificados para la aplicación se definió la interfaz principal desarrollada en Visual Studio y con ayuda de las librerías Windows Form y Bunifu para lograr que la pantalla principal de inicio sea visualmente limpia y dinámica sin perder formalidad visual, también con el fin de que sea fácil de entender y no genere confusiones para el usuario. Como se plantea en la “Complementación de metodologías” (Ver Figura 11) el diseño de la interfaz prioriza en que con el orden del Menú principal en la zona izquierda se pueda desarrollar un proyecto de caracterización morfométrica de una cuenca de forma secuencial y ordenada pasando formulario tras otro.

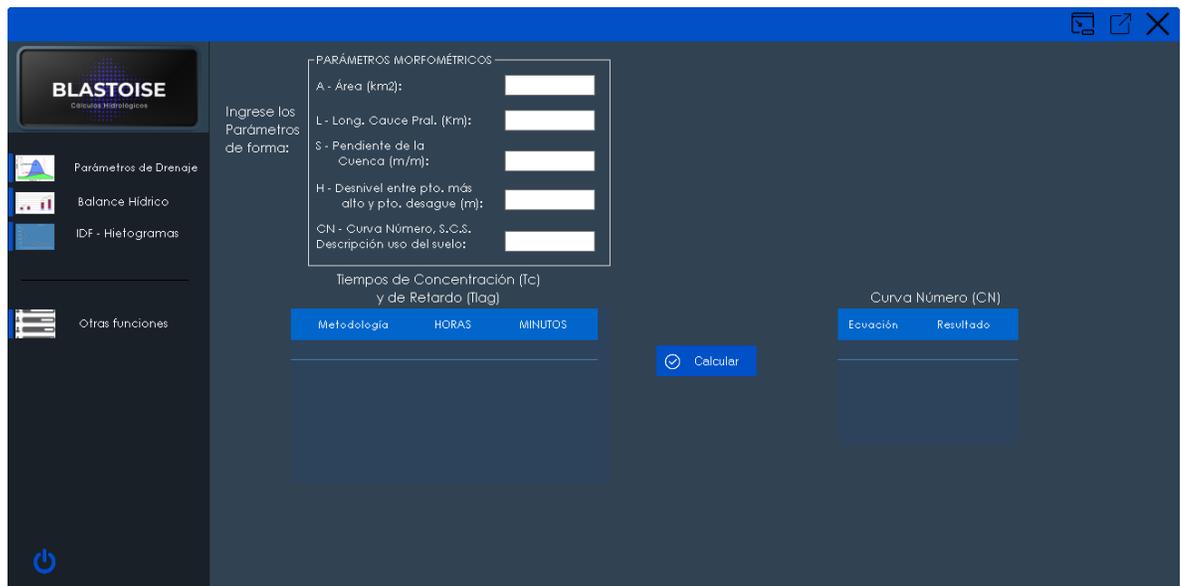
El Menú principal tiene como finalidad identificar fácil y directamente los parámetros que se requieran calcular en el margen izquierdo y habilita dos botones de inicio donde el usuario puede obtener una ventana de ayuda con explicaciones de utilización de cada submenú y de información sobre la herramienta.

Ilustración 19. Interfaz de Menú de inicio de BLASTOISE.



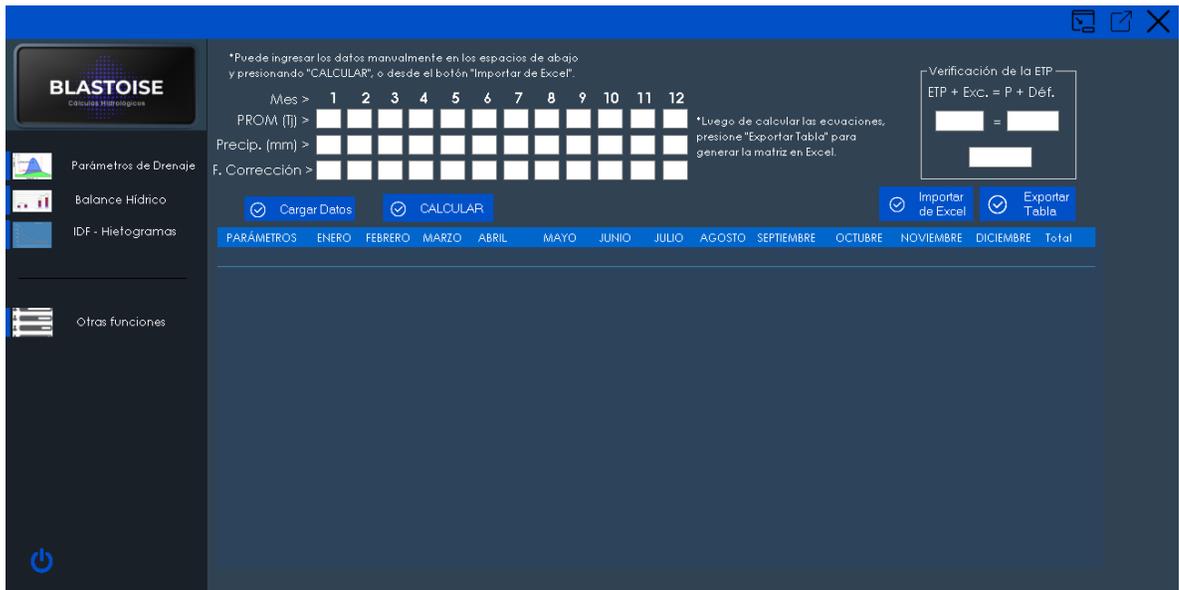
Fuente: Autores.

Ilustración 20. Interfaz de parámetros de drenaje



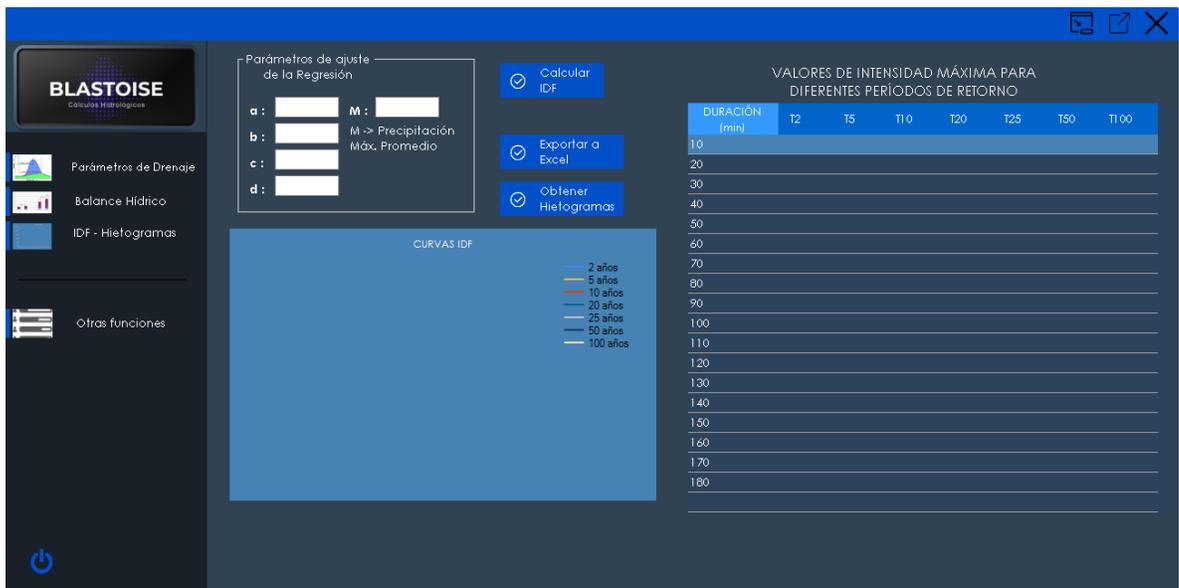
Fuente: Autores.

Ilustración 21. Interfaz de Balance Hídrico



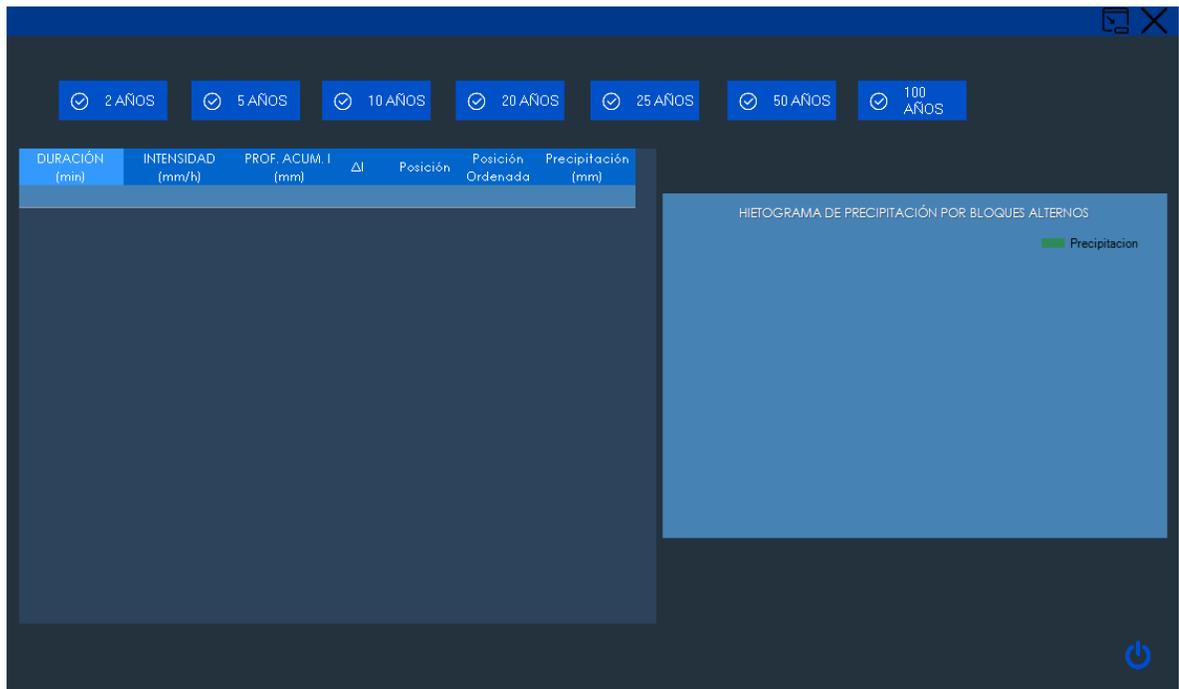
Fuente: Autores.

Ilustración 22. Interfaz de IDF - Hietogramas



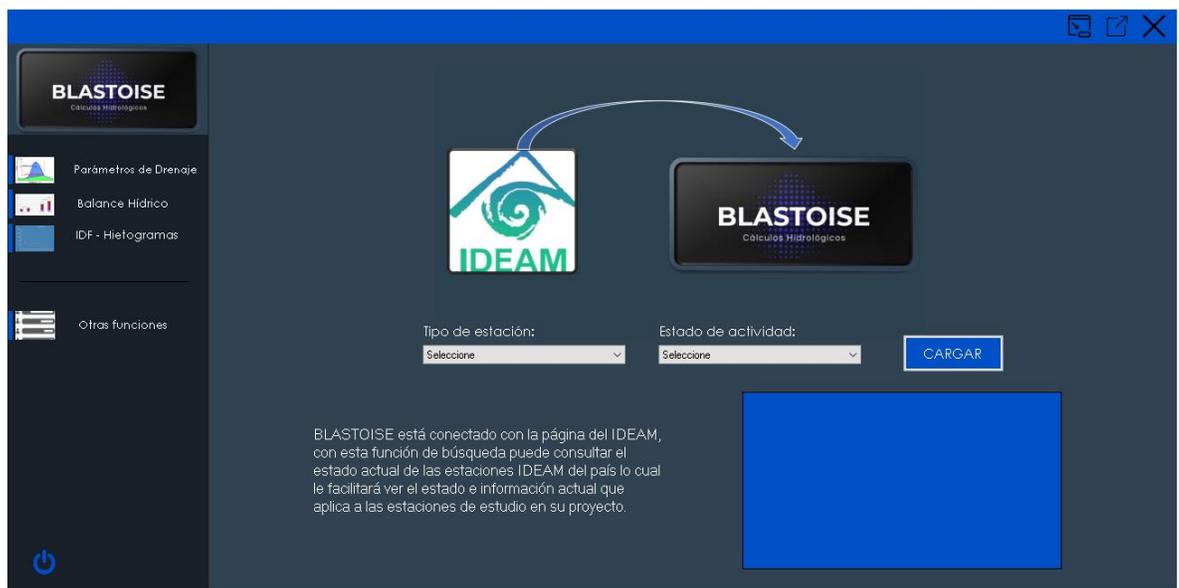
Fuente: Autores.

Ilustración 23. Interfaz de Submenú Hietogramas



Fuente: Autores.

Ilustración 24. Interfaz de Conexión IDEAM



Fuente: Autores.

ETAPA TRES DEL MODELO EN CASCADA: Codificación e implementación

Para responder al cumplimiento de los objetivos específicos y aplicando la metodología propuesta desde esta etapa inicia la codificación de las ecuaciones de hidrología que se muestran en las siguientes fases dentro de las herramientas que componen a cada interfaz. Se calibran las ecuaciones a medida que estas se muestran y utilizan siguiendo el orden del procedimiento para caracterización hidrológica de la cuenca del Río Partadó (ver Ilustración 11).

Una vez recolectada la información para el levantamiento de los requisitos y obtenidos los parámetros físicos, se calibran las ecuaciones de dichos procesos en C# es por eso que al finalizar cada fase de la caracterización hidrológica se determina a modo general la programación de dichos procedimientos. Como esta investigación centra su estudio principalmente en abordar desde la ingeniería civil los procesos hidrológicos, sin dar prioridad a mostrar si el código del software es el más óptimo se decide no incluir el código dentro del cuerpo del documento sino referenciar dentro de los anexos correspondientes el desarrollo de cada ecuación hidrológica (las más relevantes) el método utilizado y la clase a la que pertenece. Ver Tablas 26, 33, 39.

.Por último cabe mencionar que para algunos formularios se implementó la librería “Forms.DataVisualization.Charting” la cual permite realizar gráficas uniendo puntos de acuerdo a valores previos calculados, y genera las gráficas de los Menús IDF – Hietogramas.

ETAPA CUATRO: Prueba del software.

Para realizar las pruebas de que existe un correcto funcionamiento dentro de los ítems ya programados una vez finalizado el código se comienza la prueba de validación del programa, la cual se trata de verificar que los resultados que arroja la herramienta estén correctamente calculados.

La validación consistió en estimar los mismos parámetros utilizando Excel que fue el programa que se utilizó para validar esta etapa del desarrollo dentro del modelo en cascada. Al finalizar el cálculo y generar los resultados en Excel estos se comparan con los valores obtenidos mediante el código implementado en Visual

Studio. Esta validación de parámetros estimados por ambos programas se presenta al final de cada una de las FASES del procedimiento hidrológico.

ETAPA CINCO: Mantenimiento y operación

Esta etapa se refiere a la detección de fallas o errores dentro del programa y se lleva a cabo en etapas posteriores a la presentación del documento de esta investigación en donde se efectúan actividades de mejoras de rendimiento y posibles optimizaciones de código implementando nuevas librerías que ahorren líneas de código o actualizaciones del mismo. La metodología en cascada busca que de forma explícita en esta fase se trabajen en estos defectos desconocidos ubicándolos para un nuevo lanzamiento mejorado.

4.3.2 Parámetros de drenaje

Longitud del cauce(L): También conocido como longitud del cauce principal es “la longitud del río desde el punto más distante de la cuenca hasta la desembocadura⁶” [34]. De acuerdo al POMCA del Río La Vieja (2017) a medida que la longitud de un río va creciendo, también crecen los caudales medios, máximos y mínimos.

Habitualmente, los caudales que se presentan en una cuenca hidrográfica varían en función a la longitud de sus cauces, esto se debe a la estrecha relación que existe entre el área de drenaje de la cuenca y las longitudes de los cauces; ya que el área crece gracias a la longitud, pues una mayor longitud supone una mayor superficie de captación y desplazamientos con un tiempo mayor de las crecidas generadas en periodos de máximas precipitaciones y por lo tanto una mayor atenuación de las mismas [31].

En la Tabla 18 se encuentra que la longitud del cauce del Río Partadó desde su nacimiento en la cuenca alta es de 16.69 kilómetros. La cual se encuentra totalmente forestada y deshabitada, hasta la localización del diseño donde se proyecta el diseño de una pequeña central hidroeléctrica mencionado en los antecedentes planteado sobre las aguas de este cauce en el municipio de Juradó.

Tabla 18. Longitud del cauce principal de la cuenca Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Longitud del cauce Km
Cuenca Río Partadó	16.69

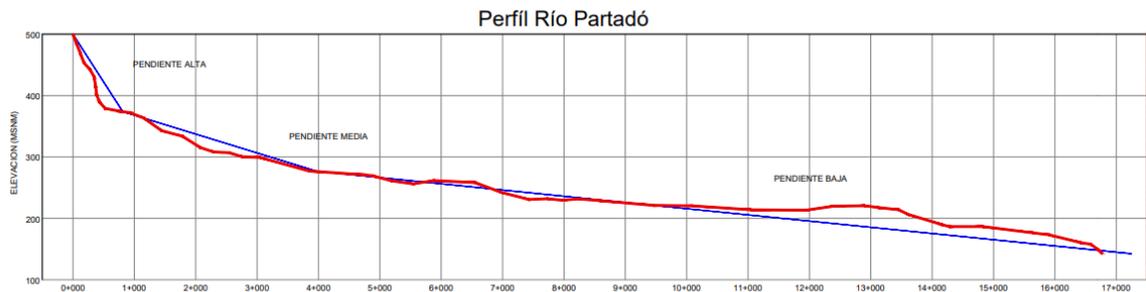
⁶ F. j. Gaspari, «Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande Buenos Aires, Argentina,» revistas unlp, vol. 4, pp. 143-158, 2012.

Fuente: Autores.

Perfil del cauce: El perfil longitudinal de un río es muy característico, ya que es la línea equivalente al cuerpo de agua desde su nacimiento hasta el sitio de estudio plasmada en la Ilustración 18, se representa gráficamente como una curva cuya forma ideal es la de una curva exponencial cóncava hacia arriba, en la cabecera, y a la altura del nivel base, en la desembocadura.

Aguas abajo del cauce la anchura del lecho y la profundidad aumentan debido a la disminución considerable de la pendiente. Esto debido a que aguas abajo se presentan caudales mayores y menores velocidades, por lo que las características de la carga del material transportado cambian de gruesa a fina.

Ilustración 25. Perfil del cauce Principal de la cuenca del Río Partadó



Fuente: Autores.

Cota del punto más elevado de la cuenca (m.s.n.m.)

En la Tabla 19 se muestra la cota máxima o punto más elevado de la corriente principal del río en estudio.

Tabla 19. Punto de mayor elevación cauce principal del Río Partadó.

Cuenca	Cota más elevada (m.s.n.m.)
Cuenca principal Río Partadó	558.84

Fuente: Autores.

Cota del punto más bajo de la cuenca (m.s.n.m.)

El punto más bajo correspondiente al punto de salida del cauce principal se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 20. Punto de menor elevación cauce principal del Río Partadó.

Cuenca	Cota más elevada (m.s.n.m.)
Cuenca principal Río Partadó	47.16

Fuente: Autores.

Pendiente media del cauce: Para determinar la pendiente media de la cuenca se utiliza la ecuación presentada a continuación. Se calcula con la relación entre la altura total del cauce principal, es decir la diferencia de cotas: cota máxima menos cota mínima, y la longitud del mismo. En la Tabla 19 se observa el valor de la pendiente media del cauce expresada en porcentaje. Para estimar la pendiente media del cauce se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_m = \frac{H_{max} - H_{min}}{L} * 100$$

Donde:

P_m: Pendiente media del cauce

H_{máx}: Cota máxima

H_{mín}: Cota mínima

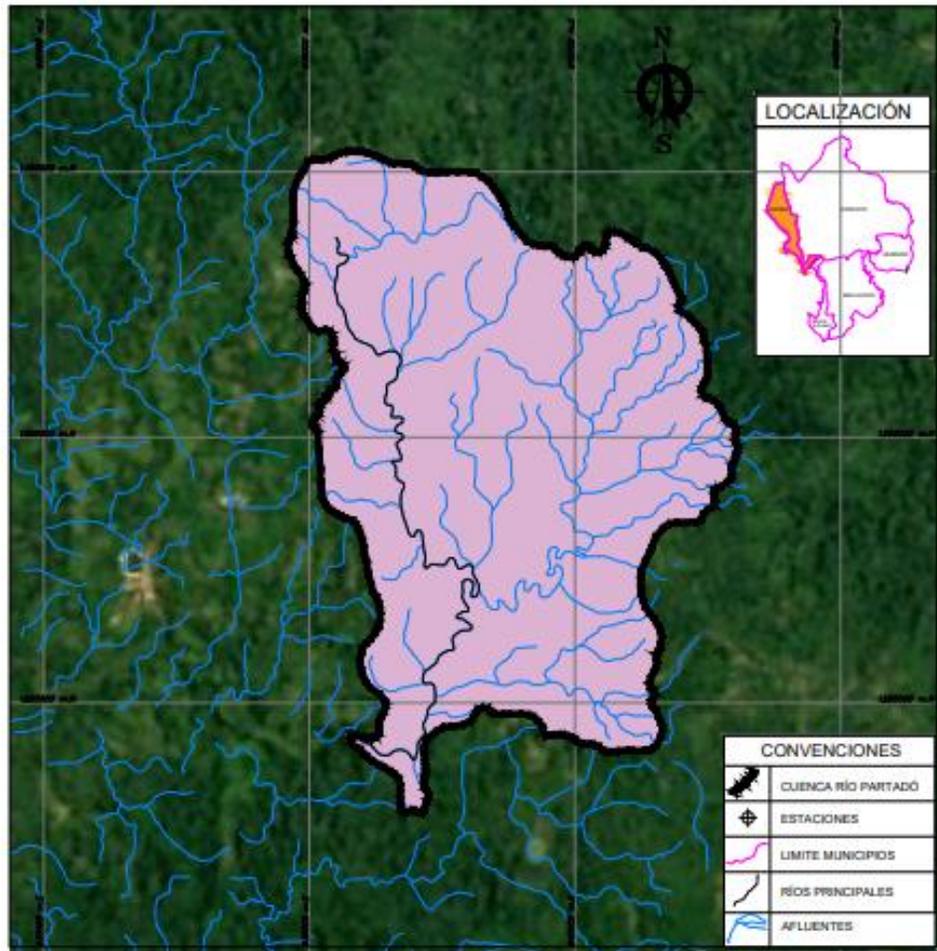
L: Longitud del cauce

Tabla 21. Pendiente media del cauce principal de la cuenca Río Partadó

Cuenca Hidrográfica	Pendiente media del cauce %
Cuenca Río Partadó	2.52 %

Fuente: Autores.

Ilustración 26 . Red de drenajes de la cuenca del Río Partadó



Fuente: Autores.

4.3.3 Tiempos de concentración

Los tiempos de concentración son considerados como el tiempo de viaje de una gota de agua de lluvia que escurre por la superficie y viaja desde el lugar más lejano de la cuenca hasta el punto de salida [31]. Las ecuaciones para determinar los tiempos de concentración del Río Partadó son tomadas de Vélez y Botero (2011) [35].

“Ramser y Kirpich lo definen como el tiempo al pico T_P , Viessman lo define como el tiempo comprendido entre el final de la precipitación efectiva y el final de la escorrentía superficial directa. Este último valor es el punto de modulación del

hidrograma después del caudal pico. Témez lo define como la diferencia entre el tiempo de finalización de la precipitación efectiva⁷ [31].

A continuación, se presenta un resumen de las ecuaciones empleadas en el presente estudio tomadas de diferentes fuentes como Ven Te Chow [36] e Hidrología Básica I [37].

Ecuación de Kirpich: Kirpich define la siguiente ecuación T_c en horas, según la siguiente ecuación:

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0.77}$$

Dónde:

T_c : Tiempo de concentración.

L: Longitud del cauce principal.

S: Diferencia entre las dos elevaciones extremas de la cuenca dividida por la longitud, en metros.

Ecuación de Giandotti: Esta ecuación proporciona el tiempo de concentración de la cuenca T_c en minutos, mediante la siguiente expresión:

$$T_c = \left(\frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{J*L}} \right)$$

Dónde:

T_c : Tiempo de concentración.

L: Longitud del cauce principal en km.

J: Pendiente promedio del cauce principal en m/m.

A: Área de la cuenca en km².

Ecuación de Témez

⁷ M. d. A. y. D. Sostenible, «CVC Gobierno Nacional,» 2017. [En línea].

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L_c}{S_0^{0,25}} \right)^{0,76}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración.

L_c: Longitud del cauce principal en km.

S₀: Pendiente promedio del cauce principal en %

Ecuación de Passini

$$T_c = 0,108 \frac{(A * L_c)^{1/3}}{\sqrt{S_0}}$$

Dónde:

T_c: Tiempo de concentración en horas.

L_c: Longitud del cauce principal en km.

S₀: Pendiente promedio del cauce principal en m/m.

A: Área de la cuenca en km².

En la Tabla 22 se muestra la validación del resultado del cálculo de los tiempos de concentración para el cauce principal de la cuenca del Río Partadó que es tomado del valor promedio de los diversos métodos utilizados para su estimación. En la Tabla 22 se muestran primero los resultados en Excel y luego los obtenidos mediante el software.

Tabla 22. Tiempos de concentración estimados con Excel

Método	Resultados Excel para T_c(hrs.)
Kirpich	2.39 Horas
Giandotti	1.52 Horas
Témez	5.13 Horas
Passini	13.12 Horas
Promedio	5.54 Horas

Fuente: Autores.

Tabla 23. Tiempos de concentración estimados con BLASTOISE

Metodología	HORAS	MINUTOS
Giandotti:	1.52	91.2
Témez:	5.13	307.8
Passini:	13.12	787.2
kirpich:	2.39	143.4
Promedio:	5.54	332.4

Fuente: Elaboración propia obtenida a través del Software.

4.3.4 Curva Número

La curva número es un indicador hidrológico que nos proporciona una idea de cómo determinar el potencial de escorrentía en una cuenca hidrográfica a partir de la clasificación del uso de suelo y de las características físicas del territorio como el tipo de suelo, la densidad y clase de cobertura vegetal existente, así como por el grupo hidrológico del mismo.

Para estimar el número de curva se emplearon los criterios utilizados por el Soil Conservation service (SCS) de Estados Unidos; cómo se evidencia en la Ilustración 19. Lo anterior teniendo en cuenta que estos criterios se aplican para diferentes condiciones de humedad, en este caso se utilizó la condición II y III las cuales están asociadas a suelos en estado de humedad normal y muy húmedo donde se presentan crecidas máximas y grandes caudales.

Ilustración 27. Clasificación del suelo por el método S.C.S.

Grupo hidrológico del suelo	Infiltración cuando están muy húmedos	Características	Textura
A	Rápida	Alta capacidad de Infiltración > 76 mm/h	Arenosa Arenosa-limosa
B	Moderada	Capacidad de infiltración 76-38 mm/h	Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa
C	Lenta	Capacidad de infiltración 36-13 mm/h	Franco-arcillosa Franco-arcillo-limosa Arcillo-arenosa
D	Muy Lenta	Capacidad de infiltración < 13 mm/h	Arcillosa

Fuente: Tomado de agua y SIG [38].

Mediante la verificación del terreno a través del sistema de información geográfico SIG se determina geológicamente que la clasificación del suelo en la zona de estudio es muy similar a la clasificación Tipo C, es decir con un potencial de escorrentía moderadamente alto. A partir de la descripción del uso de suelo que se muestra en la ilustración 20 se define su uso.

Ilustración 28. Descripción uso del suelo por el método S.C.S.

Descripción del Uso del Suelo	A	B	C	D
Tierra cultivada				
Sin tratamiento de conservación	72	81	88	91
Con tratamiento de conservación	62	71	78	81
Pastos y prados				
En malas condiciones	68	79	86	89
En buenas condiciones	39	61	74	80
Pradera				
En buenas condiciones	30	58	71	78
Terreno boscoso				
Poco denso, cubierta forestal pobre o inexistente	45	66	77	83
Buena cubierta forestal	25	55	70	77
Espacios abiertos (césped, parques, campos de golf, cementerios)				
En buenas condiciones (75% o más de hierba)	39	61	74	80
En pobres condiciones (50-75% de hierba)	49	69	79	84
Zonas comerciales (85% impermeable)	89	92	94	95
Polígonos industriales (72% impermeable)	81	88	91	93

Fuente: Tomado de agua y SIG [38].

De acuerdo a lo evidenciado por la topografía del sitio, como de estudios anteriores realizados por una consultoría se determina que el uso del suelo se considera un terreno boscoso con buena cubierta forestal. Posteriormente y validando los anteriores factores mencionados se aplican las siguientes ecuaciones:

$$CNI = CN - 2.45(100 - CN)^{0.62}$$

$$CNIII = CN + 0.6(100 - CN)^{0.953}$$

A través la ecuación que determina el número de curva en condiciones secas y CNIII en condiciones húmedas; para la estimación de caudales máximos se emplea la

condición más extrema, es decir la CNIII, obteniendo una curva número de 85.3 en Excel y validando el resultado brindado por BLASTOISE como se muestra a continuación.

Tabla 24. Resultados de CN estimados con Excel

Área de la cuenca km ²		Resultados Excel		
		CNII	CNI	CNIII
74.04	100%	70	50	85.3

Fuente: Autores.

Tabla 25. Resultados de CN estimados con BLASTOISE

Ecuación	Resultado
CN:	70
CNI:	50
CNII:	70
CNIII:	85.3

Fuente: Elaboración propia obtenida a través del Software.

En relación con el cálculo de las propiedades fisiográficas y morfométricas de la cuenca, se presentan ordenadamente la codificación de las ecuaciones en la siguiente tabla:

Tabla 26. Codificación e implementación del objetivo específico número uno

Ecuación	Nombre Clase	Nombre método	Código
Kirpich	calcularTiempos	calcularTiempos	Anexo 3
Giandotti			
Témez			
Passini		calcularCurvaNumero	
CNI			
CNIII			

Fuente: Autores.

4.4. Descripción de la cuenca hidrográfica

La cuenca del Río Partadó se encuentra situada en zona rural del municipio de Juradó, departamento de Chocó. En la parte alta desde su nacimiento en medio de bosques frondosos y áreas abundantes de cobertura vegetal, hasta el sitio de referencia donde se recopila parte de la información de este estudio, tiene un área de drenaje con una extensión equivalente a 74.04 km². Recoge las aguas de la parte más occidental del macizo conduciéndolas hacia el río Juradó, con una pendiente media de la cuenca del 20% y una longitud y pendiente media del cauce principal hasta el punto de referencia de 16.69 km y 2.5% respectivamente, con una caída total de 434 metros.

La parte superior de la cuenca se encuentra totalmente forestada y deshabitada, lo cual es un factor bastante importante para el futuro y conservación de la fuente hídrica, ya que la cuenca actúa como un almacenamiento natural que permite sostener un flujo de agua continuo durante periodos donde se presentan mínimos caudales, que inicia en diciembre y termina a finales de marzo, reconociendo que si se permite la deforestación y colonización se disminuirían drásticamente, a tal magnitud que posiblemente se acabarían estas fuentes naturales con demasiada en la oferta del líquido.

4.4.1 Estaciones climatológicas cercanas al Río Juradó

Se realizó una búsqueda de las estaciones hidrometeorológicas más cercanas a la cuenca del Río Partadó, con el fin de conocer la cantidad y calidad de información meteorológica disponible para el desarrollo de este estudio. Encontramos que la estación pluviométrica N° 56010030 identificada como Cupica junto con la estación climatológica N° 11125010 identificada como La Teresita están ubicadas en el área rural del municipio de Bahía Solano muy cerca al sitio de referencia y recopilación de información en cercanías al río Juradó. Estas estaciones son controladas y monitoreadas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y cuentan con el historial de caudales, precipitaciones máximas y valores medios de temperatura que se necesita como insumo para el análisis y valoración de dicha información, con el objetivo de conocer el comportamiento de las lluvias en esa región y poder calcular los parámetros hidrológicos requeridos.

4.5. Análisis de precipitación y temperatura

4.5.1 Precipitación

El análisis de las precipitaciones es de gran importancia en la evaluación, valoración y predicción de posibles amenazas naturales en el área de estudio, dado que este fenómeno es uno de los principales factores que inician los procesos de erosión, desbordamiento e inundaciones que afectan las condiciones propias del lugar alterando parcialmente los caudales de los cauces. Para ello es necesario conocer la magnitud de las precipitaciones ocurridas históricamente en el pasado y sobre los eventos meteorológicos que las producen.

La precipitación es el parámetro hidrológico más influyente en el estado del tiempo de la región chocoana y está determinada principalmente por la ubicación geográfica y por la confluencia de algunas condiciones atmosféricas con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), que migra altitudinalmente de sur a norte y viceversa, siguiendo el desplazamiento aparente del sol con respecto al de la tierra, pasando sobre nuestro territorio nacional dos veces al año. Por ello es de esperar que, a lo largo del departamento del Chocó y en el municipio de Juradó, la precipitación tenga un comportamiento de tipo monomodal, es decir, que es un clima que presenta una estación lluviosa y otra estación seca, muy espaciadas una de la otra y que se producen con el paso de la (ZCIT) a lo largo del año [39].

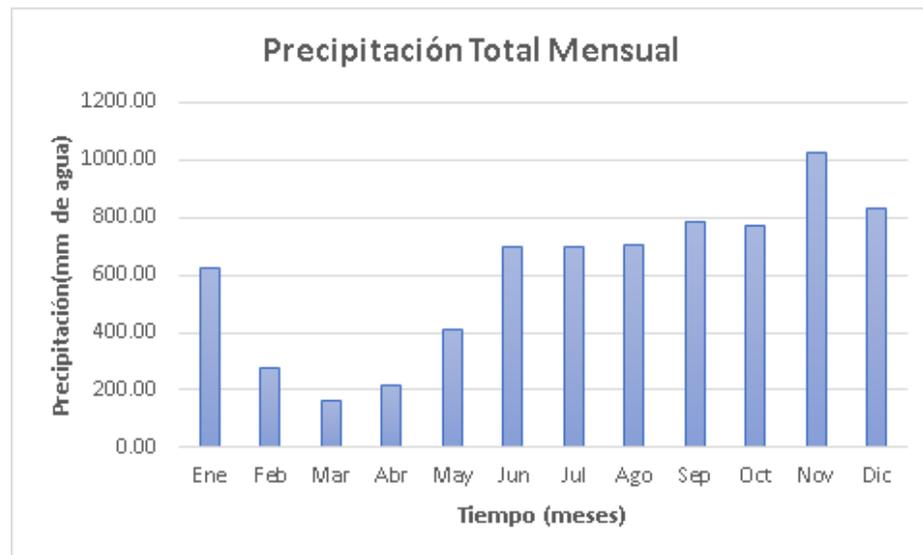
Tabla 27. Precipitaciones medias mensuales obtenidas estación Cupica

Precipitación total mensual (mm)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1997												700.2
1998	103.8	3	59	21	378.4	584.6	244	493	549	719.8	1043.6	752.7
1999	689	739.8	381	227	298.2	565.8	462.9	537.417	821.9167	1189	1360.8	524.2
2000	0	0	307	381.7	361.3	472.3	674.4	688.292	862	974	593.87	1096
2001	494.5	387	38	195.1	246.3	977.7	478.9	1190.21	1242.292	587.5	1345	1238
2002	1211	441.3	33	233	406	413.8	680.2	971	0	0	0	0
2003	340	201.7	122.3	55.3	389.7	770.3	674.5	730.458	602	1097	1583.6	314.3
2004	448.7	234	1	184	767	1128	688	718.875	1116.125	946	1067	643.4
2005	656.6	237	0	547.7	411.9	501	864.4	611	921.8333	986.6	1877.2	1152
2006	920.5	660.4	319.2	170	510	790	678.6	975.083	436.75	758.6	568	598.2
2007	698	103	165.5	258.2	812.6	1193	651	710.875	1090.792	776.6	1735.5	875.3
2008	1108	220	377	107	196.5	554.2	480	666.375	1042.208	552.5	1255.3	1027
2009	920.9	564.2	78.75	37	303.3	542.8	912.6	563.25	712.8333	700.1	1298.3	502.7
2010	633	179	128	389	453	758.3	998.2	816.458	970.4167	1244	1058.7	1626
2011	1166	401	271	397	642	664.8	990.3	696.333	808.4167	635.2	1279.8	1381
2012	989.8	396.1	213.5	202	312.1	790.7	584.2	524.083	608.9167	532	797.67	788.3
2013	473.5	129.5	213.5	414	569	771.4	729.5	703.583	1004.042	794.8	970	547
2014	717	347	142	276	301.8	857	662	326.75	439.8333	673.1	423	595.5
2015	375	222	431.3	87.17	242	564	542	676.125	760.4583	605.8	253.83	663.8
2016	237	14	78	89.5	454.2	615.3	1299	735.792	968.2	714.2	910.83	1131
2017	684.3	94.88	15	171	360	479	1001	722	703.25	741	1073.7	1018
2018	713	361.1	69.92	170	209	665	330	735.375	767.6667	1012	1043.6	1052
2019	167.7	110	65	153.5	342.5							
Precip. media mensual (C°)	624.88	274.81	159.50	216.64	407.59	698.04	696.47	704.40	782.33	773.38	1025.69	828.52

Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

Con el objetivo de representar acertadamente los datos y variación de la precipitación sobre la cuenca del Río Partadó, en la Gráfica 2 se muestra el comportamiento de la precipitación total mensual contemplado para un periodo de registro de 23 años entre 1997 y 2019, tiempo suficiente para obtener un análisis confiable de la variabilidad de las lluvias en la zona, teniendo en cuenta que en este lapso de tiempo es donde se cuenta con series de datos más homogéneas. Teniendo como resultado que el comportamiento de las lluvias es monomodal, con periodos de fuertes precipitaciones entre los meses de junio a diciembre y época seca o de menos cantidad de precipitación entre los meses de febrero a mayo.

Grafica 4. Precipitación total mensual Estación Cupica

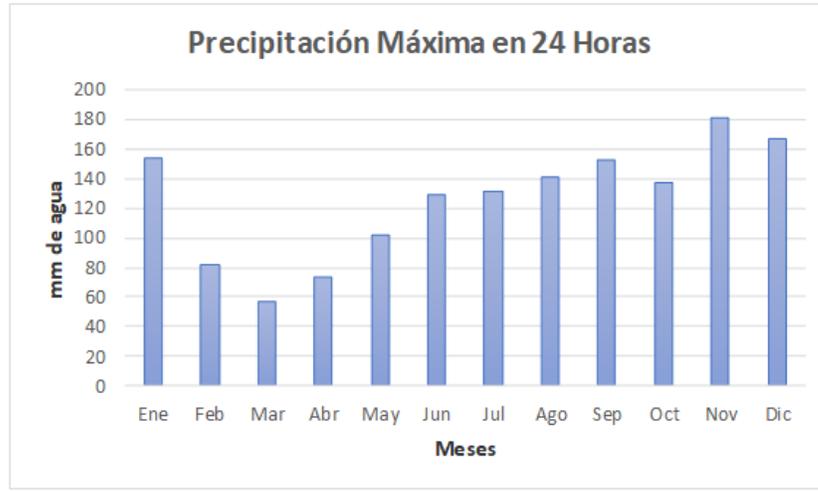


Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

4.5.2 Precipitación máxima en 24 horas

De acuerdo con la validación de los datos de la estación Cupica (Ver Anexo 1), la cual es la más cercana a la cuenca, y con el fin de establecer los ciclos húmedos y secos se determinó que los meses más lluviosos son noviembre y diciembre coincidiendo con el histograma de precipitaciones totales mostrado anteriormente, mientras que los meses más secos son febrero, marzo y abril como se evidencia en la Gráfica 1 con la variación temporal mensual de las precipitaciones máximas en 24 horas. De igual manera los valores mayores registrados por la Estación son en el mes de noviembre con 180 mm y el valor más bajo es en el mes de marzo con 60 mm.

Grafica 5. Precipitación Máxima en 24 Horas Estación Cupica



Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

4.5.3 Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia IDF

Las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (Curvas IDF) representan la magnitud de una lluvia fuerte expresada en milímetros por hora para diferentes duraciones y periodos de retorno (5-10-15-20-25-50-100) años, son usualmente utilizadas en los modelos de lluvia – escorrentía para el cálculo de caudales máximos en el diseño de proyectos hidráulicos de control y manejo de fuentes hídricas.

En esta investigación se empleó la metodología de curvas IDF sintéticas regionalizadas para Colombia desarrollado por el Ingeniero Mario Díaz Granados junto con el análisis de las precipitaciones máximas presentadas en el departamento del chocó, para ello se analizaron los registros de precipitación de 17 estaciones pluviométricas en la región pacifica, entre ellas la estación Cupica considerando un periodo histórico de 23 años, como también se validó el ajuste de diferentes distribuciones de probabilidad que permitiera la representación Gráfica de intensidades máximas con diferentes duraciones y retornos para la obtención de la lluvia de diseño en toda la cuenca [40].

Posteriormente se utilizó la siguiente ecuación para obtener la intensidad por el método aproximado:

$$i = a * \frac{T^{b*}}{(t/60)^c} * M^d$$

Donde:

i: Intensidad de precipitación en mm/h.

T: Periodo de retorno en años.

M: Precipitación máxima en 24 horas promedio multianual en mm.

t: Duración de la lluvia en minutos.

a, b, c, d: Parámetros de ajuste de la regresión.

Dado que la ubicación de la cuenca hidrográfica de estudio se encuentra en la región pacífica, en la Tabla 20 se muestran los coeficientes utilizados como parámetros de ajuste para la regresión, de igual manera en la Tabla 21 se observa los valores de intensidad máxima estimados para diferentes periodos de retorno utilizando intervalos de 10 minutos para un período de tres horas de duración de tormenta.

Tabla 28. Parámetros de ajuste Región pacífica

Parámetros de ajuste regresión Región pacífica R3	
A	13.92
B	0.19
C	0.58
D	0.20

Fuente: Elaboración propia con datos del INVIAS.

Tabla 29. Valores estimados de intensidad máxima para diferentes periodos de retorno con Excel

INTENSIDAD MÁXIMA	<i>PERIODO DE RETORNO (AÑOS)</i>						
<i>DURACION (min)</i>	2	5	10	20	25	50	100
10	118.34023	140.84486	160.67071	183.28732	191.22528	218.14287	248.84947
20	79.16533	94.22011	107.48289	122.61258	127.92279	145.92968	166.47128
30	62.57518	74.47503	84.95841	96.91747	101.11486	115.34816	131.58500
40	52.95874	63.02984	71.90216	82.02337	85.57571	97.62167	111.36326
50	46.52965	55.37815	63.17338	72.06590	75.18699	85.77059	97.84398
60	41.86053	49.82110	56.83410	64.83428	67.64218	77.16374	88.02560
70	38.28032	45.56005	51.97325	59.28919	61.85694	70.56416	80.49703
80	35.42748	42.16468	48.09994	54.87066	57.24705	65.30536	74.49798
90	33.08809	39.38042	44.92376	51.24739	53.46686	60.99305	69.57866
100	31.12665	37.04597	42.26070	48.20948	50.29737	57.37742	65.45408
110	29.45267	35.05365	39.98793	45.61678	47.59239	54.29168	61.93398
120	28.00318	33.32851	38.01995	43.37178	45.25017	51.61975	58.88594
130	26.73285	31.81661	36.29523	41.40428	43.19746	49.27809	56.21466
140	25.60815	30.47802	34.76822	39.66232	41.38005	47.20486	53.84960
150	24.60365	29.28250	33.40441	38.10654	39.75689	45.35322	51.73730
160	23.69970	28.20664	32.17712	36.70649	38.29620	43.68692	49.83645
170	22.88084	27.23207	31.06536	35.43823	36.97302	42.17748	48.11454
180	22.13474	26.34408	30.05237	34.28265	35.76739	40.80214	46.54560

Fuente: Autores.

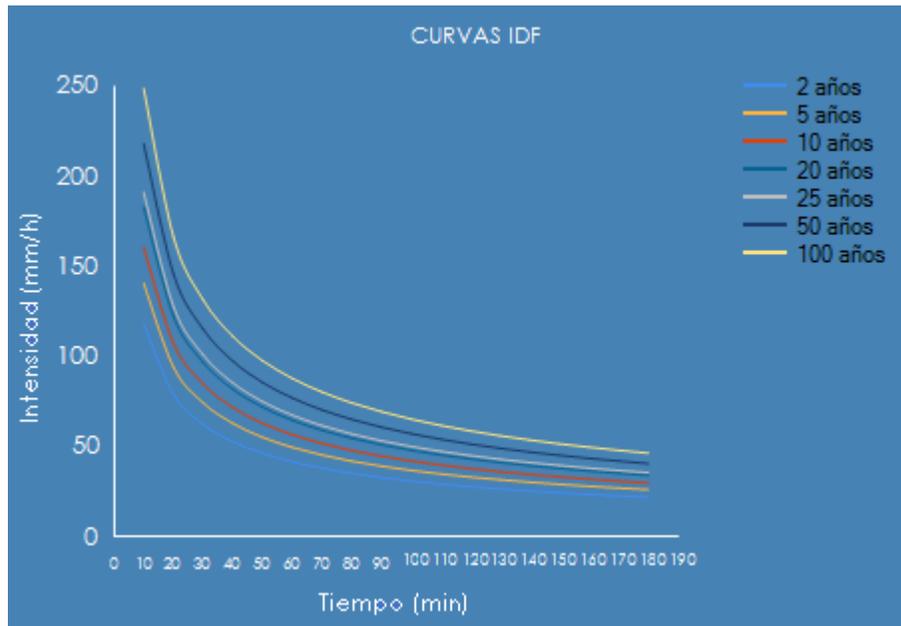
Tabla 30. Valores estimados de intensidad máxima para diferentes periodos de retorno con BLASTOISE.

DURACIÓN (min)	T2	T5	T10	T20	T25	T50	T100
10	118.34	140.845	160.67	183.287	191.225	218.143	248.849
20	79.165	94.22	107.483	122.612	127.923	145.929	166.471
30	62.575	74.475	84.958	96.917	101.115	115.348	131.585
40	52.959	63.03	71.902	82.023	85.576	97.622	111.363
50	46.53	55.378	63.173	72.066	75.187	85.77	97.844
60	41.86	49.821	56.834	64.834	67.642	77.164	88.025
70	38.28	45.56	51.973	59.289	61.857	70.564	80.497
80	35.427	42.165	48.1	54.871	57.247	65.305	74.498
90	33.088	39.38	44.924	51.247	53.467	60.993	69.579
100	31.127	37.046	42.261	48.209	50.297	57.377	65.454
110	29.453	35.054	39.988	45.617	47.592	54.292	61.934
120	28.003	33.328	38.02	43.372	45.25	51.62	58.886
130	26.733	31.817	36.295	41.404	43.197	49.278	56.215
140	25.608	30.478	34.768	39.662	41.38	47.205	53.85
150	24.604	29.282	33.404	38.106	39.757	45.353	51.737
160	23.7	28.207	32.177	36.706	38.296	43.687	49.836
170	22.881	27.232	31.065	35.438	36.973	42.177	48.114
180	22.135	26.344	30.052	34.283	35.767	40.802	46.546

Fuente: Elaboración propia obtenida a través del Software.

Una vez se realiza el promedio de precipitaciones máximas de la estación Cupica, que para este caso es el promedio multianual de la precipitación máxima conocido también como el parámetro ponderado M con un valor estimado de 127.3 milímetros, se procede realizar los cálculos de las curvas IDF con la ecuación de Díaz-Granados para los distintos periodos de retorno como se muestra en la Gráfica 6.

Grafica 6. Curvas IDF a partir de la Precipitación total mensual Estación Cupica, BLASTOISE



Fuente: Elaboración propia obtenida a través del Software.

4.5.4 Hietogramas de precipitación

Con el propósito de conocer cómo sería la distribución de las precipitaciones ocurridas dentro de la cuenca en un periodo de 24 horas, se debe determinar un hietograma de diseño que tenga en cuenta las 3 horas más lluviosas que se produzcan en el día con diferentes periodos de retorno. Para ello se cuentan con varias metodologías que se basan en la información obtenida a través de las curvas Intensidad – Duración – Frecuencia como por ejemplo la teoría de bloques alternos. Este método permite obtener hietogramas de precipitación a partir de las curvas IDF con los cuales se representa la distribución de la precipitación en ciclos de intervalos de 10 minutos a lo largo del tiempo donde se presentan las lluvias más fuertes en un espacio de tiempo de tres horas.

Como resultado final se obtiene un hietograma para cada periodo de retorno donde se relaciona intensidades de precipitación con la duración de lluvias, de acuerdo con las cifras de intensidad para un periodo de retorno de 50 años. En la Tabla 22 se muestran los valores con los que se generó la lluvia neta de diseño para una duración de tormenta de tres horas en intervalos de diez minutos.

Tabla 31. Valores estimados de intensidad máxima Método de Bloques Alternos con Excel.

Método de Bloques Alternos				
min	i(mm/h)	Lluvia acumulada (HD)	Lluvia neta (ΔI)	HD
10	218.1429	36.3571	36.3571	3.00441
20	145.9297	48.6432	12.2861	3.23836
30	115.3482	57.6741	9.0309	3.52970
40	97.6217	65.0811	7.4070	3.90571
50	85.7706	71.4755	6.3944	4.41576
60	77.1637	77.1637	5.6882	5.16111
70	70.5642	82.3248	5.1611	6.39438
80	65.3054	87.0738	4.7490	9.03086
90	60.9931	91.4896	4.4158	36.35714
100	57.3774	95.6290	4.1395	12.28608
110	54.2917	99.5347	3.9057	7.40703
120	51.6197	103.2395	3.7048	5.68825
130	49.2781	106.7692	3.5297	4.74896
140	47.2049	110.1447	3.3755	4.13946
150	45.3532	113.3830	3.2384	3.70476
160	43.6869	116.4985	3.1154	3.37549
170	42.1775	119.5029	3.0044	3.11541
180	40.8021	122.4064	2.9036	2.90356

Fuente: Autores.

Tabla 32. Valores estimados de intensidad máxima Método de Bloques Alternos con BLASTOISE.

DURACIÓN (min)	INTENSIDAD (mm/h)	PROF. ACUM. I (mm)	ΔI	Posición	Posición Ordenada	Precipitación (mm)
10	218.143	36.357	36.357	1	17	3
20	145.929	48.643	12.29	2	15	3.24
30	115.348	57.674	9.03	3	13	3.53
40	97.622	65.081	7.41	4	11	3.91
50	85.77	71.475	6.39	5	9	4.42
60	77.164	77.164	5.69	6	7	5.16
70	70.564	82.325	5.16	7	5	6.39
80	65.305	87.073	4.75	8	3	9.03
90	60.993	91.489	4.42	9	1	36.357
100	57.377	95.628	4.14	10	2	12.29
110	54.292	99.535	3.91	11	4	7.41
120	51.62	103.24	3.7	12	6	5.69
130	49.278	106.769	3.53	13	8	4.75
140	47.205	110.145	3.38	14	10	4.14
150	45.353	113.382	3.24	15	12	3.7
160	43.687	116.499	3.12	16	14	3.38
170	42.177	119.502	3	17	16	3.12
180	40.802	122.406	2.9	18	18	2.9

Fuente: Elaboración propia obtenida a través del Software.

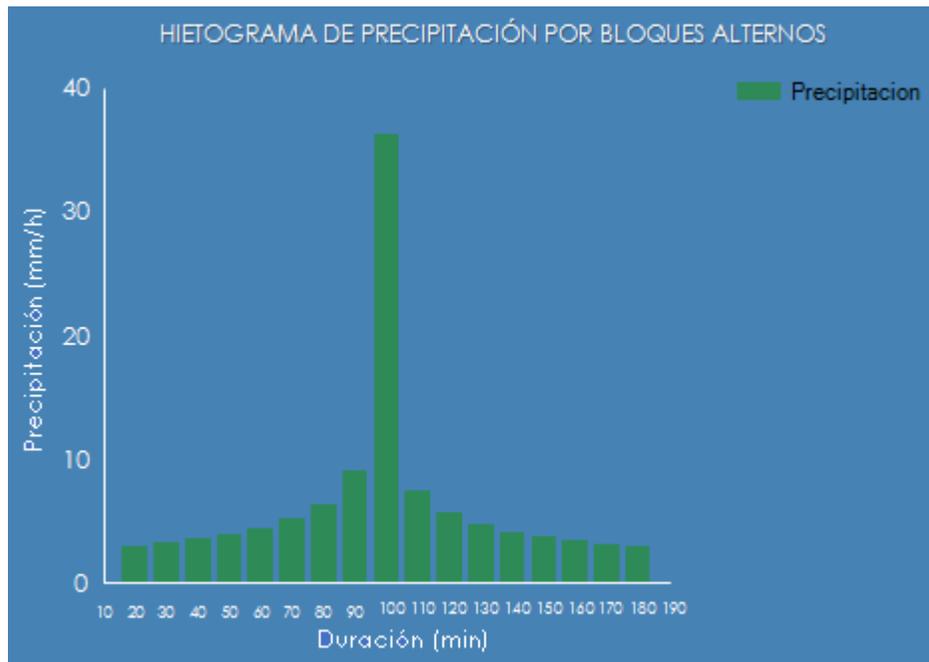
En la Gráfica 7, se observa el hietograma de precipitación de la cuenca del Río Partadó para un periodo de retorno de 50 años con una duración de tormenta de tres horas y una intensidad de lluvia de 1369 mm/h, insumo que será utilizado en la modelación hidrológica con el software HEC – HMS.

Tabla 33. Codificación e implementación de ecuaciones de tablas 30 y 32

Columnas (Tablas 30 y 32)	Clase	Nombre método	Código
T (2, 5, 10, 20, 25, 50, 100)	CalcularIDF	calcularIDF (ver anexo 4)	Anexo 4
Intensidad (para T50)	CalcularHietogramas	cincuentaA	
Prof. Acum. (T50)			
ΔI (T50)			
Posición (T50)			
Ordenar Posición. (T50)			
Precipitación (mm) para T50.			

Fuente: Autores.

Grafica 7. Hietograma de Precipitación de la cuenca del Río Partadó



Fuente: Elaboración propia obtenida a través del Software.

El código utilizado para elaborar las matrices de intensidad máxima para diferentes períodos de retorno e intensidad máxima para la obtención del hietograma en un

período de 50 años por bloques alternos correspondientes a las Tablas 29 y 31 respectivamente, se muestran a continuación.

4.6 Temperatura

Las variaciones de la temperatura media y de las temperaturas extremas de un sector hidrológico están directamente relacionadas con la probable ocurrencia de eventos de alteración climática como prolongados periodos de sequias o lluvias. Estos cambios están relacionados con el incremento o disminución de la temperatura y es por ello que es indispensable conocer a profundidad el comportamiento de este parámetro dado que su efecto incide en la pérdida de agua desde la tierra hacia la atmósfera, por medio de la transpiración de la vegetación y de la evaporación directa del espacio ecológico [41]. El análisis de la temperatura de una cuenca constituye una solución fundamental del problema del balance o pérdida de agua en un sistema hídrico, ya que es posible conocer la cantidad de agua que se evapora desde el suelo y la que transpira toda la vegetación existente en el lugar debido a la evapotranspiración.

4.6.1 Temperatura media

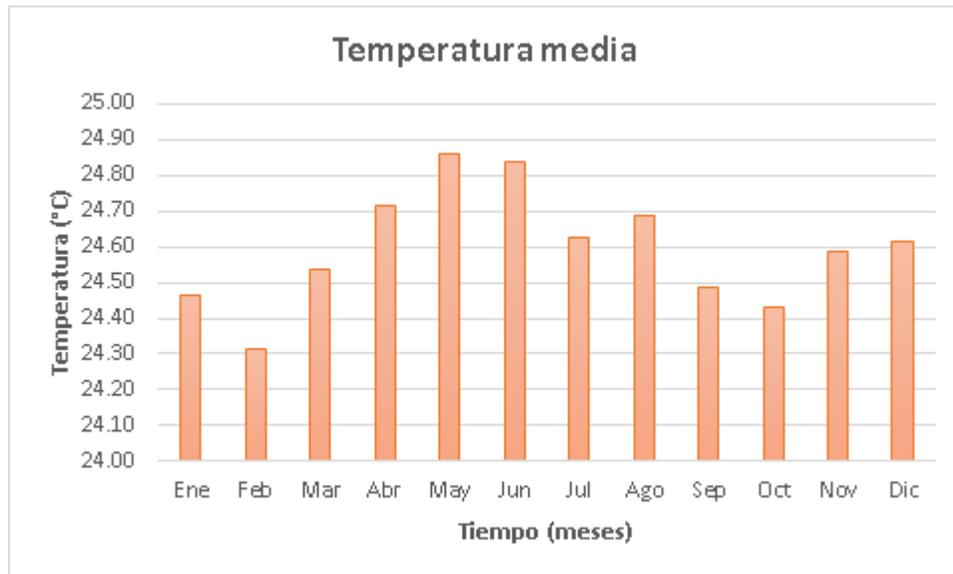
Tabla 34. Temperaturas medias mensuales obtenidas estación La Teresita

Temperatura media (°C)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1983	24.7	24.6	24.8	25.2	25.2	25	24.9	25	24.6	24.2	24.8	
1984												
1985	24.2	24.2	24.4	24.7	24.7	24.4	24.4	24.4	24.2	24.3	24.4	
1986												
1987		24.7	24.7	24.3	24.8	24.7	24.8	24.9	24.7	24.7		
1988							24.2		24.1	24.4		
1989	24.2	23.7	23.6	24.2	24.4	24.2	24.5	24.3	24.2	24.3	24.5	24.5
1990	24.7	24.2	24.6	24.9	24.8	25	24.5	24.5	24.5		24.4	24.4
1991	24.5	24	24.6	25	24.8	25.2	24.9	24.8	24.8	24.4	24.7	24.9
1992	24.5	24.8	24.9		25.3	25.3	24.8	24.9	24.8	24.8	24.8	
1993	24.5		24.7		25	24.9						
Temp. media mensual (C°)	24.47	24.31	24.54	24.72	24.86	24.84	24.63	24.69	24.49	24.43	24.58	24.61

Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

Para el desarrollo de este estudio se consideraron los registros de temperatura de la estación climatológica La Teresita, ubicada cerca al área de la cuenca. Los registros son limitados en la estación ya que solo se cuenta con anotaciones del periodo entre 1983 - 1993, debido a que no se encuentra información actualizada y reciente. Sin embargo, con los datos obtenidos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se gráfica la distribución de la temperatura de la estación La Teresita como se muestra en la Gráfica 5.

Grafica 8. Temperatura Media Estación La Teresita



Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

Según la anterior gráfica se determina que el valor de la temperatura media es de 24,6°C aproximadamente, donde las temperaturas máximas se presentan en los meses de mayo y junio; y los valores más bajos de temperatura se registraron en el mes de febrero con un valor cercano a los 24,3°C.

4.7 Balance Hídrico

El balance hídrico se calcula para encontrar los meses en el curso del año en que hay una disponibilidad real de agua. Es el parámetro con el que se identifican las necesidades reales de humedad en el lugar de la cuenca. Con la ecuación de conservación de la masa que dictamina la forma para poder verificar o controlar el agua en una cuenca, se expresa como “el volumen que entra en el volumen de control menos el volumen que sale del volumen de control, es exactamente el volumen que queda⁸” [23]. Empleando el mismo principio, se puede condicionar a la cantidad de agua que sale de un sistema y hacer un estimativo de la misma.

El balance hídrico se calcula con el promedio de temperatura mensual de cada mes y la precipitación registrada, con ambos parámetros en la misma escala de tiempo. En ese sentido, para calcular el balance hídrico de la Cuenca del Río Partadó, se

⁸ G. Monsalve Sáenz, HIDROLOGÍA EN INGENIERÍA, Bogotá D.C.: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.

tienen en cuenta las dos estaciones climatológicas principales; Cupica y La Teresita. La ubicación de ambas estaciones facilita el conocimiento representativo del balance buscado en toda la cuenca dada su cercanía. A continuación, se muestran el paso a paso desde los valores de temperaturas y precipitaciones promedios mensuales como valores iniciales, pasando por el cálculo de las ecuaciones básicas de hidrología, en el caso de balance hídrico por el método de Thornthwaite y Mather y la fórmula empírica de Thornthwaite para Evapotranspiración Potencial Mensual (ETP) resumidos al final del capítulo en una matriz.

Tabla 35. Resumen de temperatura media mensual de cada mes y precipitación ingresadas a BLASTOISE

	PROM (Tj) (1983- 1993)	Precipitación mm (1997- 2019)
Enero	24.47	624.88
Febrero	24.31	274.81
Marzo	24.54	159.50
Abril	24.72	216.64
Mayo	24.86	407.59
Junio	24.84	698.04
Julio	24.63	696.47
Agosto	24.69	704.40
Septiembre	24.49	782.33
Octubre	24.43	773.38
Noviembre	24.58	1025.69
Diciembre	24.61	828.52
Total	24.60	7192.25

Fuente: Autores.

4.8 Evapotranspiración

Este fenómeno es el resultado del proceso por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, y que ocurre a través del efecto de intercambio de agua de los seres vivos (principalmente las plantas) para volver a la atmósfera en forma de vapor. La evapotranspiración se define como el conjunto de agua que regresa a la atmósfera o pérdida de humedad de una superficie del suelo cuando es transpirada desde las hojas de las plantas [23].

4.8.1 Evapotranspiración Potencial

El término Evapotranspiración Potencial fue introducido en la metodología descrita por Thornthwaite-Matter en el año 1957, haciendo referencia a la cantidad de agua liberada por la vegetación o evapotranspiración en función de la temperatura y de la precipitación [37].

Para estimar la evapotranspiración potencial se contó con que las dos estaciones climatológicas tuvieran los registros de humedad relativa, temperatura y precipitación. Cabe decir que, aunque para este cálculo se contó únicamente con el registro de dos estaciones climatológicas, su ubicación ayudó a que existiera un cubrimiento total a la cuenca.

Fórmula de Thornthwaite

$$ETP_{sin\ corr.} = 16 \left(\frac{10 \cdot t}{I} \right)^a$$

Donde:

Ej o ETP: Evapotranspiración Potencial mensual del mes sin ajustar en mm (mm/mes)

Tj: Temperatura media mensual del mes j, en °C

a: Parámetro de exponente empírico. Es una constante en función de I que se calcula con la siguiente ecuación:

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$$

I: Índice calórico anual, constante para la región dada y es la suma de 12 índices mensuales i.

$$I = \sum_{j=1,2,\dots,12} i_j$$

donde i es función de la temperatura media normal mensual, según la ecuación:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514}$$

En la ecuación, “ T_j ” es la temperatura promedio mensual de cada mes y es un parámetro que se determina para cada valor de temperatura y cada valor encontrado se suma y totaliza en T_{ij} .

Una vez conocida la Evapotranspiración Potencial mensual sin ajustar, que son los valores obtenidos de “ E_j ”, se corrigen multiplicando cada valor por el coeficiente que tenga en cuenta la latitud en que se encuentre la estación seleccionada. Dichos factores de corrección se seleccionan de la siguiente tabla elaborada por Monsalve para el año 1995 [37].

Tabla 36. Factores de corrección de evapotranspiración mensual, dados por el método de Thornthwaite.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
15° N	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
10° N	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.05	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
5° N.	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
Ecuador	1.04	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04
5° S	1.06	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10° S	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15° S	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20° S	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
22° S	1.14	1.00	1.05	0.97	0.95	0.90	0.94	0.99	1.00	1.09	1.10	1.16
23° S	1.15	1.00	1.05	0.97	0.95	0.89	0.94	0.98	1.00	1.09	1.10	1.17
24° S	1.16	1.01	1.05	0.96	0.94	0.89	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.17
25° S	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
26° S	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.87	0.92	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
27° S	1.16	1.02	1.05	0.96	0.93	0.87	0.92	0.97	1.00	1.11	1.12	1.19
28° S	1.19	1.02	1.06	0.95	0.93	0.86	0.91	0.97	1.00	1.11	1.13	1.20
29° S	1.19	1.03	1.06	0.95	0.92	0.86	0.90	0.96	1.00	1.12	1.13	1.20
30° S	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
31° S	1.20	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.89	0.96	1.00	1.12	1.14	1.22
32° S	1.21	1.03	1.06	0.95	0.91	0.84	0.89	0.95	1.00	1.12	1.15	1.23
33° S	1.22	1.04	1.06	0.94	0.90	0.83	0.88	0.95	1.00	1.13	1.16	1.23
34° S	1.22	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.16	1.24
35° S	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
36° S	1.24	1.04	1.06	0.94	0.88	0.81	0.86	0.94	1.00	1.13	1.17	1.26
37° S	1.25	1.05	1.06	0.94	0.88	0.80	0.86	0.93	1.00	1.14	1.18	1.27

Fuente: Hidrología en la ingeniería. Germán Monsalve Sáenz (1995).

Para ajustar la ETP obtenidos por el método de Thornthwaite al número de días del mes y a la duración del brillo del sol diario, en los varios meses del año y en función de la latitud, ambos valores se multiplican de la siguiente forma:

$$ETP_{corr.} (E_{j\text{corregida}}) = E_j * Li$$

Donde:

ETP_{corr.}: Evapotranspiración mensual en mm.

E_j o ETP: Evapotranspiración Potencial mensual del mes sin ajustar en mm (mm/mes).

Li: Factores de corrección en los varios meses del año y en latitudes entre 15 grados Norte y 37 grados Sur.

4.8.2 Evapotranspiración real

Este fenómeno ocasiona pérdida de agua en condiciones reales, es decir, bajo las condiciones existentes en cada caso. En esta consideración se contempla que la vegetación no siempre es total o completa y que el suelo se encuentra saturado. Se contemplan también los meses cuando $P < ETP$ donde es evidente que $ETP > ETR$. En este orden de ideas, la evapotranspiración potencial está compuesta por la precipitación de dicho mes y la que se encontraba contenida en el suelo en el mes anterior. Se realiza la operación de $(EVP - P)$ para encontrar la cantidad de agua que el suelo cede considerando implícitamente que sobre él actúa la evapotranspiración real. [31]

Todos los resultados de las ecuaciones mencionadas anteriormente para calcular la ETP para cada mes junto con el balance hídrico se resumen en la Tabla 29 se presentan los datos de evapotranspiración corregida por el factor latitudinal para los períodos de enero a diciembre y para el cálculo del balance hídrico cabe resaltar que el caso del Río Partadó es atípico. Lo anterior se debe a que el Chocó es un departamento que recibe más de 12000mm de lluvia al año por lo que es considerado uno de los lugares más lluviosos del mundo [42]. Esta consideración afecta a nuestro cauce principal, el cual a lo largo del año no tiene déficits, y en este sentido, siguiendo con la metodología de cálculo de balance hídrico utilizada aquí, se dejan todos los períodos de almacenaje útil de agua con un valor de 100 para el caso de este proyecto

Tabla 37. Resumen de resultados de ETP y balance hídrico

PARÁMETROS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Total
PROM(Tj):	24.47	24.31	24.54	24.72	24.86	24.84	24.63	24.69	24.49	24.43	24.58	24.61	24.6
Precipitación...	624.88	274.81	159.5	216.64	407.59	696.04	696.47	704.4	782.33	773.38	1025.69	828.52	7192.25
Factor corr. m...	1.02	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02	
ij:	11.07	10.96	11.12	11.24	11.34	11.32	11.18	11.22	11.08	11.04	11.15	11.17	133.89
a:	3.13												
Ej:	105.44	103.3	106.39	108.85	110.79	110.51	107.61	108.44	105.71	104.9	106.93	107.34	1286.21
Ej corregido:	107.55	96.07	109.58	111.03	117.44	113.83	114.07	113.86	106.77	108.05	105.86	109.49	1313.58
-----	-----	-----	-----	BALANCE	HÍDRICO	ESTACI...	-----	-----	-----	-----	-----	-----	
Precipitación...	624.88	274.81	159.5	216.64	407.59	696.04	696.47	704.4	782.33	773.38	1025.69	828.52	7192.25
ETP Corregido:	107.55	96.07	109.58	111.03	117.44	113.83	114.07	113.86	106.77	108.05	105.86	109.49	1313.58
Delta:	517.33	178.74	49.92	105.61	290.15	584.21	582.4	590.54	675.56	665.33	919.83	719.03	
Almacenaje:	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Déficit:	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Exceso:	517.33	178.74	49.92	105.61	290.15	584.21	582.4	590.54	675.56	665.33	919.83	719.03	5878.67
Delta Almace...	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETR(mm):	107.55	96.07	109.58	111.03	117.44	113.83	114.07	113.86	106.77	108.05	105.86	109.49	1313.58

Fuente. Datos obtenidos con el software desarrollado BLASTOISE .

Índice de humedad: El índice de humedad es una relación entre excesos y déficits de acuerdo al valor de la proporción evapotransporativo del medio. Esto da una clara descripción del clima [43]. Se calcula el índice de humedad con la siguiente ecuación tomada de Ruíz y colaboradores (2012) [43].

$$I_h = \frac{100(EXC - DEF)}{ET_0}$$

Donde:

EXC: Total de Exceso hídrico anual (mm año⁻¹).

DEF: Total de Déficit hídrico anual (mm año⁻¹).

ET₀: Evapotranspiración anual de referencia (mm año⁻¹).

Índice de aridez: Brinda una descripción de sensibilidad a gradientes de temperatura y precipitación del sistema.

$$IA = \frac{ETP - ETR}{ETP}$$

Donde:

EXC: Total de Exceso hídrico anual (mm año⁻¹).

DEF: Total de Déficit hídrico anual (mm año⁻¹).

ET₀: Evapotranspiración anual de referencia (mm año⁻¹)

Tabla 38. Resumen de resultados de variables de índice de humedad e índice de aridez

Parámetro	Resultado
Exponente a (Ver Tabla 37)	3.13
Índice de humedad (Ih)	447.53
Índice de aridez (Ia)	0

Fuente: Autores.

La importancia de incluir en el trabajo la determinación del balance hídrico de la cuenca es que nos permite deducir a través del índice y factor de humedad el clima predominante en la cuenca, que para este caso es super húmedo, con pequeña o nula deficiencia de agua. De la misma manera el índice de aridez proporciona una idea de qué cantidad de agua existe en el sistema. Al tener un clima cálido se dedujo que se puede generar una ETP importante debido al tipo de vegetación presente en el lugar y con ello se identificaron los meses del año donde se presentan déficits y excesos de agua en la cuenca hidrográfica.

Finalmente, dando respuesta al objetivo específico número uno, los resultados que se obtuvieron en la tabla 37 para evapotranspiración y balance hídrico calibrando las ecuaciones de Thornwaite de ETP ajustadas a los valores de temperatura y precipitación de la cuenca del Río Partadó se relacionan en la siguiente tabla.

Tabla 39. Codificación e implementación del objetivo específico número dos

Parámetro	Clase	Nombre método	Código
a	CalcularBalanceHidrico	obtenerKirpich	Anexo 5
ETP _{corregido} .		obtenerGiandotti	
ETR		obtenerTemez	

Fuente: Autores.

5. PRODUCTOS A ENTREGAR

Los productos generados con BLASTOISE según la metodología abordada se describen como sigue:

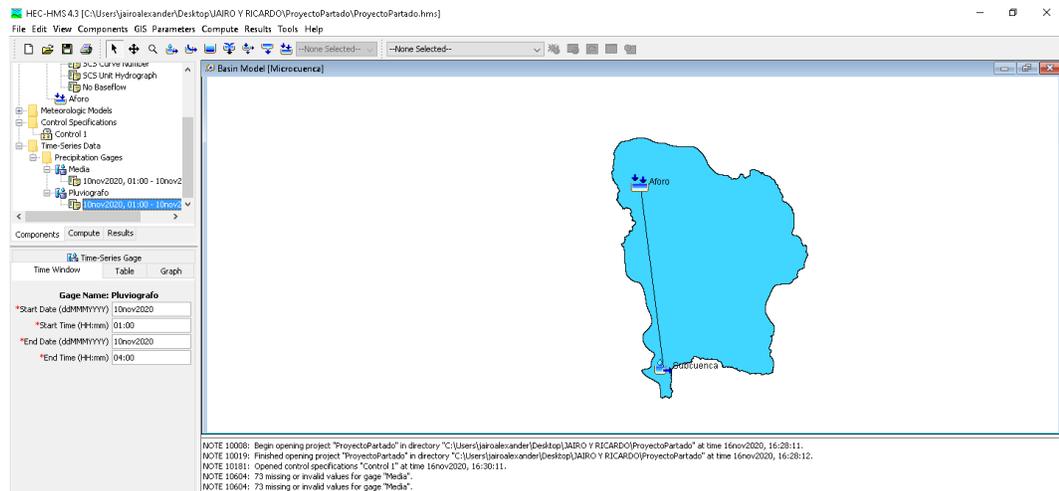
- Manual de Instalación (Anexo 7).
- Manual del Usuario (Anexo 8).
- Disco magnético (CD) de instalación.

6. RESULTADOS

6.1 FASE TRES: Resultados y validación de BLASTOISE

Finalmente, respondiendo al objetivo general, y atendiendo al objetivo específico número tres, se presentan a continuación los resultados obtenidos al aplicar los insumos calculados con BLASTOISE en la modelación en HEC-HMS para estimar el caudal máximo del Río Partadó con todo el tratamiento hecho anteriormente con los datos pluviométricos. Se hace a continuación la descripción para obtener la simulación que estime el caudal máximo del Río Partadó para un período de retorno de 50 años.

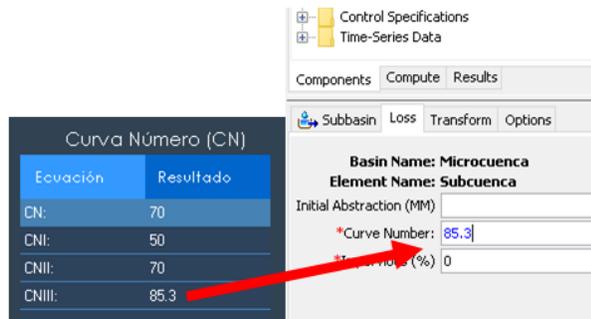
Ilustración 29. Representación de la imagen de la cuenca del Río Partadó en HEC-HMS



Fuente: Autores.

En HEC-HMS se trabaja con el método de pérdida y con la metodología empleada por el Soil Conservation service (SCS) de Estados Unidos para determinar el umbral de escorrentía a través del número hidrológico (también llamado número de curva). En este caso el CNIII obtenido es 85.3. Como se utiliza el hidrograma unitario se debe ingresar el Tiempo de Retardo (Tlag) calculado que para este caso es de 3.69 horas ó 221 minutos y así ya quedan ingresadas las condiciones iniciales de la cuenca

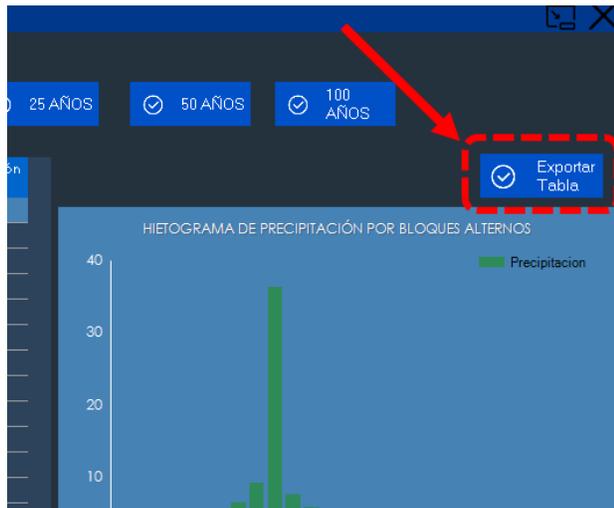
Ilustración 30. Ingreso de CN obtenido con BLASTOISE



Fuente: Autores.

Ahora para ingresar las características del hietograma el usuario debe ir hasta la ventana de BLASTOISE del submenú Hietogramas en donde había calculado por bloques alternos el hietograma para el período de retorno de 50 años (o el que elija) y al hacer clic en exportar tabla se abrirá una hoja de cálculo en Excel con los valores obtenidos para ingresar en HMS. Se debe tener en cuenta de configurar los intervalos cada 10 minutos.

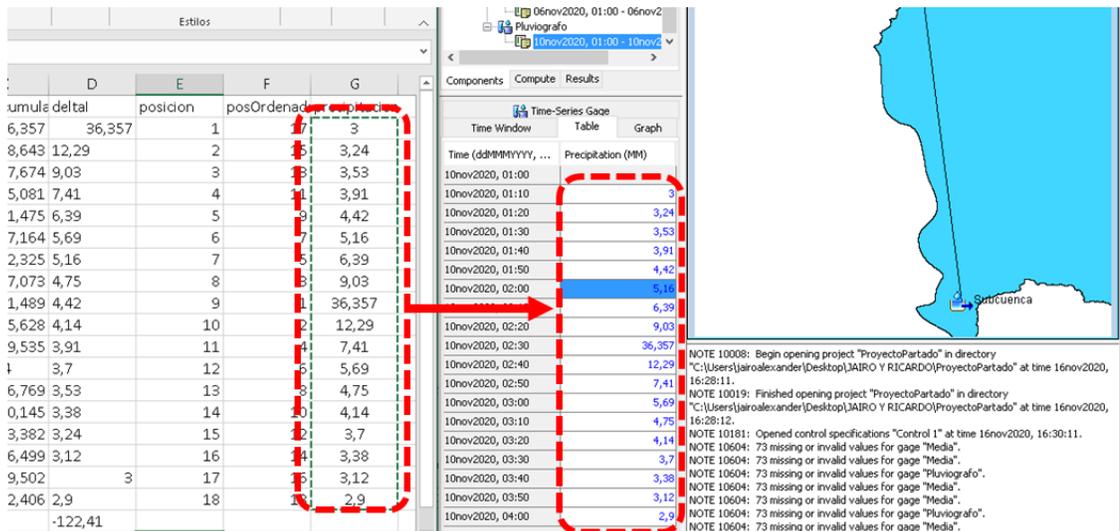
Ilustración 31. Exportar datos de precipitación a Excel



Fuente: Autores.

El segundo componente está dentro de “Times-Series Data Manager” y se crea el componente para ingresar los datos del hietograma de precipitación. Y los datos exportados a Excel desde BLASTOISE se copian e insertan en las características de hietogramas requeridas en la en la sección “Table”

Ilustración 32. Pasando datos de precipitación obtenidos desde BLASTOISE a HEC - HMS



Fuente: Autores.

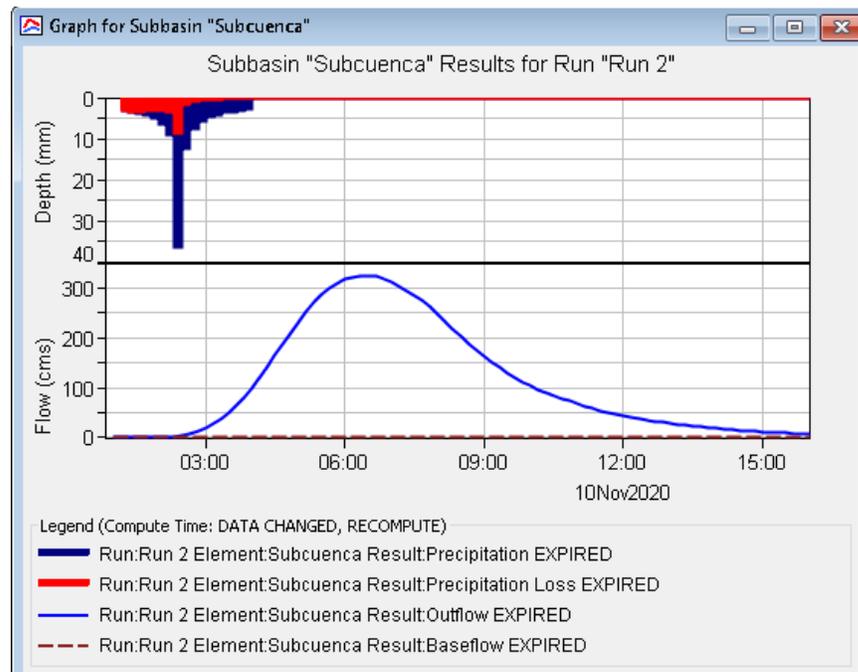
Se corrió el modelo en HEC – HMS se utilizó el hietograma de precipitación de la Gráfica 4 y, a continuación, se presentan los resultados en la Ilustración 21 donde se evidencian la representación de la cuenca, y la conexión entre objetos subcuenca y aforo en el programa HEC – HMS.

Ilustración 33. Caudal máximo del Río Partadó para un período de retorno de 50 años



Fuente: Autores.

Ilustración 34. Representación del hietograma de precipitación ejecutado en HEC - HMS



Fuente: Autores.

Este mismo proceso se utiliza para obtener los resultados con períodos de retorno (Tr.) de 2, 5, 10, 20, 25 y 100 años. Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 40. Valores de caudales máximos para tiempos de retorno con HEC – HMS

Tr	Caudal (m³ / s)
2	130.3
5	172
10	210.2
20	254.8
25	270.7
50	325.3
100	388.4

Fuente: Autores.

La herramienta desarrollada de nombre BLASTOISE sirve para cualquier usuario que quiera calcular ecuaciones que normalmente se emplean en cursos de hidrología. Con este software se satisface el vacío presentado en los antecedentes en el cual se demostró que históricamente las variables de entrada que piden programas como el HEC – HMS no siempre están bien calculadas o no son las mejores debido al desconocimiento de la formulación matemática de éstos.

BLASTOISE que está dirigido particularmente a los usuarios de los laboratorios de sistemas de la Universidad Católica de Colombia brinda una interfaz sencilla e intuitiva y posee la ventaja de ser una herramienta flexible que cualquier usuario con conocimientos básicos de hidrología pueda aplicar para el desarrollo de un proyecto o en el ejercicio de calcular parámetros morfométricos de una cuenca. Lo anterior contempla el vacío que genera la falta de un software especializado en resolver los cálculos hidrológicos aquí resueltos.

El trabajo desarrollado tiene un impacto positivo para un usuario que ejecute un proyecto de obtención de los caudales máximos con la modelación HEC – HMS porque facilita un camino automatizado para encontrar algunos de los parámetros a ser usados en la modelación y no discrimina la aplicación para un tipo específico de cuenca. Además, es de gran ayuda para estimar caudales máximos de una cuenca sólo con datos pluviométricos.

7. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, las conclusiones del proyecto son:

- Acorde con los algoritmos elaborados, se construyó un software como herramienta basada en C# en la que se implementaron los algoritmos matemáticos desarrollados a partir de las ecuaciones de hidrología. Con la herramienta alcanzada, se ha automatizado buena parte de la metodología hidrológica empleada en la caracterización morfométrica de cuencas logrando reducir tiempo en el trabajo que este proceso requiere, siendo esta la mayor diferencia con otras herramientas manejadas en la Universidad, permitiendo responder a los objetivos planteados como calibrar las ecuaciones básicas de hidrología para obtener la evapotranspiración y el balance hídrico a través del software e implementar el cálculo de los parámetros de drenaje para la modelación hidrológica dentro de las funcionalidades.
- Se caracterizó el Río Partadó y se determinó que la clasificación del suelo corresponde a un terreno con un potencial moderadamente alto de escorrentía y de acuerdo a la topografía del lugar y a estudios anteriores se determina que el tipo de suelo corresponde a un terreno boscoso con buena cubierta forestal, permitiendo establecer las características de la cuenca.
- Se lograron aplicar los resultados del software BLASTOISE en la obtención de los caudales máximos por medio de la modelación HEC – HMS en la cuenca del Río Partadó, con lo que se pudo determinar que los resultados de la caracterización morfométrica de la cuenca del Río Partadó evidencian que cuenta con un sector hidrológico con un área de 74.04 Km², una longitud del cauce de 16.69 Km y una pendiente media del cauce de 2.52%. La cuenca posee una forma alargada y con baja susceptibilidad a las avenidas y conforme a la curva hipsométrica corresponde a un río viejo.
- Luego de presentar los parámetros utilizados para cada título correspondiente a la caracterización de la cuenca se lograron calibrar los cálculos hidrológicos de dichos parámetros y se evidencia que con el uso del software se obtiene fácilmente resultados verídicos y confiables, lo cual simplifica el tiempo que normalmente se requiere para formular una hoja de Excel hasta obtener los mismos resultados.
- Se estudió el fundamento teórico de la Hidrología con aplicación a la metodología usada en HEC-HMS puesto que, el trabajo consistió en

desarrollar una herramienta para aplicar dicho fundamento en la práctica hidrológica, por lo que se concluye que el presente estudio aporta como insumo para caracterizar los ríos, en especial aquellos de los que se cuentan con pocos datos.

- Con el software construido se simplifica parte de la metodología en hidrología, lo cual reduce los tiempos de caracterización de cuencas y facilita analizar aspectos relevantes de las mismas al contar con los datos en una misma interfaz de fácil manejo para el usuario. En relación con esto, fueron también diseñados manuales de requisitos de usuario basado en las normas legales vigentes de la IEEE-830.
- Con la aplicación de BLASTOISE realizada en el Río Partadó se comprueba que es factible el proceso de estudiar cuencas similares con datos recopilados a través de las estaciones del IDEAM.
- El software construido podría ser un aporte para los vacíos encontrados por Carvajal, Arango y Jiménez [7], quienes reportaron en su estudio del 2007 que no se contaba con un software especializado que generara cálculos matemáticos confiables para obtener ecuaciones hidrológicas; que también fueron encontrados por Díaz, Guacaneme, y Alonso (2017) [8]; y Gómez y Castillo (2005) [9].
- El presente documento evidencia fortalezas al usar dos tipos de metodologías una propia, elaborada en HEC-HMS y metodología en cascada, las cuales cobran una relevancia al crear una sinergia entre estas para desarrollar los objetivos específicos, por lo que puede considerarse novedoso en este campo de la ingeniería civil.
- Los puntos más importantes logrados en la metodología en cascada fueron que al abordar de manera sistemática e iterativa la evolución de las etapas de desarrollo se modificaban errores que podrían afectar el producto en una etapa avanzada.
- Se aprovechó que en la fase final del proyecto se agregó la funcionalidad de poder conectar el API del IDEAM para recibir información de las estaciones hidrometeorológicas con sus actualizaciones.

8. RECOMENDACIONES

Una vez finalizado el estudio y teniendo en cuenta las conclusiones anteriormente presentadas, se sugieren las siguientes recomendaciones:

- En las cuencas del territorio nacional que se desee conocer caudales máximos sin contar con información de estaciones hidrometeorológicas, recomendamos hacer uso de esta herramienta dado que, facilita estimar los parámetros que son empleados para efectuar la modelación hidrológica de la cuenca en HEC – HMS.
- El código diseñado para programar las ecuaciones más representativas de los procedimientos hidrológicos de esta herramienta se documenta dentro de los Anexos 3, 4 y 5 con el objeto de tener un registro de su desarrollo, y al mismo tiempo, con esto se busca a que a futuro se pueda proponer una modificación para mejorar o integrar nuevas funcionalidades.
- Se puede generar a largo plazo una integración que implemente bases de datos SQL la cual permitiría almacenar y preservar los resultados, extraer y mejorar tablas dinámicas, y realizar selecciones y métodos de ordenamiento que por falta de tiempo no se alcanzaron a proponer en este proyecto.
- Finalmente se recomienda que para lograr trabajos más completos pueda existir interdisciplinariedad; es decir, que como se mostró en esta investigación, la ingeniería civil también se valió de elementos de la programación, para obtener resultados satisfactorios.

9. TRABAJOS FUTUROS

Para futuras investigaciones sería pertinente que se caractericen otros ríos de Colombia, de manera que a futuro se pueda contar con un banco de recursos con información suficiente de la hidrología de nuestro país.

Así como este trabajo de grado se elaboró teniendo en cuenta la información recolectada sobre el Río Partadó para brindar resultados relevantes sobre la principal cuenca aledaña al municipio de Juradó, este estudio también puede servir de guía para desarrollar otras investigaciones afines.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. L. Aldana Valverde, « La necesidad del desarrollo de servicios hidrológicos para la reducción de daños por inundaciones,» *Tecnología y ciencias del agua*, pp. 57-62, 2016.
- [2] K. Sedano Cruz, Y. Escobar y Á. Ávila Díaz, «Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia.,» *Luna Azul*, pp. 219-238, 2013.
- [3] S. D. Varón Gutiérrez y G. Vargas Cuervo, «Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas con la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia.,» *Revista Colombiana de Geografía* , pp. 152-174, 2019.
- [4] P. Gao, G. J. Carbone y L. Junyu, Flood Simulation in South Carolina Watersheds Using Different Precipitation Inputs, Columbia: University of South Carolina, Department of Geography, 2018, p. 1–10.
- [5] E. A. Ortiz Higuera, CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA, MODELACIÓN HIDROLÓGICA Y MODELACIÓN HIDRÁULICA PARA LA CUENCA DEL CAUCE EN LA URBANIZACIÓN CIUDAD BLANCA, DEL MUNICIPIO SAN GIL, DEPARTAMENTO DE SANTANDER, MEDIANTE EL USO DE LAS HERRAMIENTAS HEC-GEOHMS Y HEC-GEORAS, Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2015.
- [6] P. Darbandsari y P. Coulibaly, «Inter-comparison of lumped hydrological models in data-scarce watersheds using different precipitation forcing data sets: Case study of Northern Ontario, Canada,» *Journal of Hydrology*, vol. 31, nº 1, pp. 1-22, 2020.
- [7] Y. Carvajal Escobar, D. Arango López y H. Jiménez Escobar, «Estimación de caudales promedios mensuales por subcuencas hidrológicas mediante modelación con HEC-HMS.,» *Tecnura*, pp. 14-28, 2007.
- [8] F. L. Alonso Nore, U. A. Díaz Arias y D. F. Guacaneme Prieto, Estimación de caudales máximos para el sector hidrológico de la quebrada El Diamante, mediante modelación con HEC-HMS, Bogotá: Universidad Católica de Colombia Bogotá, Facultad de Ingeniería, 2017.
- [9] E. Gómez y H. Castillo, Aplicación del modelo computacional HEC-HMS en la estimación de caudales máximos en la cuenca del río frío Cundinamarca., Bogotá: Repositorio: Universidad Católica de Colombia, 2005.
- [10] V. Estrada Sifontes y R. M. Pacheco Moya, «Modelación hidrológica con HEC-HMS en cuencas montañosas de la región oriental de Cuba.,» *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, pp. 71-80, 2012.
- [11] IDEAM, «INFORME DEL ESTADO DEL MEDIO AMBIENTE Y LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES 2010,» 2010. [En línea]. Available: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022166/PARTE4.pdf>.

- [12] IDEAM, «Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos,» IDEAM, 2020. [En línea]. Available: <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>.
- [13] J. L. Rivas Herrera, «PLAN DE DESARROLLO "JURADO CAMINO AL DESARROLLO" PARA EL MUNICIPIO DE JURADO - CHOCO, PERIODO INSTITUCIONAL 2020-2023,» CONCEJO NACIONAL DE JURADO, Jurado, 2020.
- [14] C. Duran Sarmientos, E. García Troya, A. Panchano Ramón, A. Terán Reyes y U. Ullauri Ortega, Método del Hidrograma Unitario, Guayaquil: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ciencias, Matemáticas y Físicas, Escuela de Ingeniería Civil, 2015.
- [15] Hidrografía departamento del Chocó-Colombia, «Hidrografía del Chocó,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.todacolombia.com/departamentos-de-colombia/choco/hidrografia.html>.
- [16] Estrategia municipal de respuesta a emergencias, «Alcaldía municipal de Nuquí,» 2012. [En línea]. Available: <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/434/PMGR%20Nuqui.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [17] M. y. E. A. El Instituto de Hidrología, «Glosario IDEAM,» 2014. [En línea]. Available: [www.ideam.gov.co › web › ocga › glosario](http://www.ideam.gov.co/web/ocga/glosario).
- [18] L. S. Nanía, Manual Básico de HEC-HMS 3.0. y HEC-GeoHMS 1.1, Universidad de Granada Madrid, Área de Ingeniería Hidráulica, 2007.
- [19] E. Mochica Mamani, Análisis de máximas avenidas con fines de diseño de defensa del río chichanaco de la ciudad de Sandia, Universidad Nacional del Altiplano Puno, Facultad de Ingeniería, 2013.
- [20] C. B. Martínez Torres, DESARROLLO DE SOFTWARE PARA ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO CON APLICACIÓN EN GEOTECNIA, México, D. F.: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, 2014.
- [21] A. Drozdek, «OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING AND REPRESENTATION OF OBJECTS,» *STUDIES IN LOGIC, GRAMMAR AND RHETORIC*, p. 293/, 2015.
- [22] J. A. Hubbard, «Origins of Quantitative Hydrology: Pierre Perrault, Edme Mariotte, and Edmond Halley,» *Water Resources IMPACT*, vol. 13, n° 6, pp. 15-17, 2011.
- [23] G. Monsalve Sáenz, HIDROLOGÍA EN INGENIERÍA, Bogotá D.C.: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1995.
- [24] plan de desarrollo municipal de juradó, «Alcaldía municipal de juradó,» 2012-2015. [En línea]. Available: <https://docplayer.es/135539727-Municipal-de-jurado-para-que-el-cambio-continue.html>.
- [25] A. Wałęga, «Application of HEC-HMS programme for the reconstruction of a flood event in an uncon-trolled basin,» *Journal of Water and Land Development*, pp. 13-20, 2013.

- [26] M. M. Vargas, S. Beskow, T. L. Caldeira, L. d. L. Corrêa y Z. A. d. Cunha, « SYHDA – System of Hydrological Data Acquisition and Analysis.», *RBRH*, pp. 11-24, 2019.
- [27] J. D. Gamba Mejía y J. G. González Hernández, Curvas de rendimiento caudales máximos instantáneos asociados a diferentes periodos de retorno en Colombia, caso de estudio río Magdalena, Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica de Bolívar Cartagena, Facultad de Ingeniería, 2015.
- [28] L. Cohen, L. Manion y K. Morrison, *Research Methods In Education*, vol. Seventh Edition, London: Routledge Taylor y Francis Group, 2011.
- [29] R. H. Sampieri, C. F. Collado y M. d. P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, vol. Sexta Edición, México D.F.: McGRAW Hill Education, 2014.
- [30] C. G. Prieto Álvarez, *Adaptación de las Metodologías Tradicionales Cascada y Espiral para la Inclusión de Evaluación Inicial de Usabilidad en el Desarrollo de Productos de Software en México.*, HUAJUAPAN DE LEÓN: UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA, 2015.
- [31] M. d. A. y D. Sostenible, «CVC Gobierno Nacional,» 2017. [En línea]. Available: https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La%20Vieja%20-%20POMCA%20en%20Ajuste/Fase%20Diagnostico/7_Capitulol_Diagnostico_Morfometria.pdf.
- [32] V. Araujo Aranda, «Parametros cuenca delimitación - cálculos,» Slideshare, 29 10 2014. [En línea]. Available: <https://es2.slideshare.net/valmisarandaaraujo/parametros-cuenca-delimitacion-ciculos#:~:text=17.,cuenca%20ser%C3%A1%20de%20forma%20circular..>
- [33] M. A. Camino, «Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina),» *Revista Universitaria de Geografía*, vol. 27, nº 1, pp. 73-97, 2018.
- [34] F. j. Gaspari, «Caracterización morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande Buenos Aires, Argentina,» *revistas unlp*, vol. 4, pp. 143-158, 2012.
- [35] J. J. Vélez y A. Botero Gutiérrez, «ESTIMACIÓN DEL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN Y TIEMPO DE REZAGO EN LA CUENCA EXPERIMENTAL URBANA DE LA QUEBRADA SAN LUIS, MANIZALES,» *Dyna*, vol. 78, pp. 58-71, 2011.
- [36] V. T. Chow, D. R. Maidment y L. W. Mays, *Hidrología aplicada*, M. Edna Suárez, Ed., McGRAW-HILL Interamericana s.a, 1994.
- [37] H. Jimenez Escobar, *Hidrología Básica I*, Cali: Facultad de Ingeniería Universidad del Valle, 1986.
- [38] P. Villegas, «Método del Número de Curva del SCS,» *Agua y SIG*, [En línea]. Available: <https://aguaysig.com/metodo-del-numero-de-curva-del-scs/>.
- [39] W. Murillo, R. Palomino, S. Córdoba, G. Aragón y E. Banguero, «El régimen diario de la precipitación en el municipio de Quibdó (Colombia),» *Revista de Climatología*, vol. 5, pp. 1 - 7, 2005.

- [40] B. S. Mejía Arrieta, Estimación de curva IDF a partir de lluvias máximas en 24 horas en el Departamento del Atlántico, Barranquilla: Universidad de la Costa Barranquilla. Facultad de Ingeniería, 2017.
- [41] G. Hurtado M, «ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO PROMEDIO Y TENDENCIAS DE LARGO PLAZO DE LA TEMPERATURA MÁXIMA MEDIA PARA LAS REGIONES HIDROCLIMÁTICAS DE COLOMBIA,» [En línea]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Analisis+del+Comportamiento+de+la+Temperatura+Maxima.pdf/2a2f247c-f457-45f3-ac9a-f2a481f8daa6>.
- [42] H. Calle, «Por fin sabemos por qué llueve tanto en el Pacífico,» *EL ESPECTADOR*, 3 10 2019.
- [43] O. Ruiz Álvarez, R. Arteaga Ramírez, M. Vázquez Peña, R. Ontiveros Capurata y R. López López, «BALANCE HÍDRICO Y CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DEL ESTADO DE TABASCO, MÉXICO,» *Universidad y Ciencia*, vol. 28, nº 1, pp. 1-14, 2012.
- [44] P. Duque Sarango, D. M. Patiño y X. E. López, «Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical,» *Información Tecnológica*, pp. 351-362, 2019.
- [45] B. E. O. Monte, D. D. Costa, M. B. Chaves, L. d. O. Magalhães y C. B. Uvo, «Hydrological and hydraulic modelling applied to the mapping of flood-prone areas.,» *RBRH*, pp. 152-167, 2016.
- [46] E. F. Martínez Ortega, MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL RIO ATRATO MEDIANTE HEC-HMS PARA LA DETERMINACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS, Universidad Santo Tomas de Aquino Bogotá, Facultad de Ingeniería, 2014.
- [47] J. S. Benavides Contreras y H. A. Robayo Botero, Diseño hidráulico y seguimiento de obras para el control de erosión en ríos y taludes en los tramos 2-3 y 4 de la vía Bogotá-Villavicencio, Universidad Libre Bogotá, Facultad de Ingeniería, 2013.
- [48] I. C. Society, SWEBOOK Guide to the Software Engineering Body of Knowledge, IEEE, 2014.
- [49] A. Valverde, «La necesidad del desarrollo de servicios hidrológicos para la reducción de daños por inundaciones,» *Tecnología y ciencias del agua*, pp. 57-62, 2016.
- [50] A. M. d. Juradó, «PLAN DE DESARROLLO PERÍODO 2020 - 2023,» CONCEJO MUNICIPAL DE JURADÓ, Juradó, 2020.

ANEXOS

ANEXO 1. Datos de precipitación máxima en 24 horas de la Estación hidrometeorológica pluviométrica del departamento del Chocó CUPICA – 56010030.

VALORES MÁXIMOS DE PRECIPITACIÓN EN 24 HORAS (MM)												
NOMBRE ESTACIÓN :		CUPICA			NUMERO IDENTIFICACIÓN ESTACIÓN:			56010030				
LATITUD:	6.70° N		TIPO DE ESTACIÓN: PLUVIOMÉTRICA				DEPARTAMENTO: CHOCÓ					
LONGITUD:	77.5° W		ENTIDAD: IDEAM				MUNICIPIO: BAHÍA SOLANO					
ELEVACIÓN:	2 MSNM		REGIONAL: ANTIOQUIA - CHOCÓ				CORRIENTE: CARARE					
AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1997												216
1998	35	3	29	15	66	160	79	120	145	84	286	169
1999	132	168	79	39	56	85	118	113	158	136	208	270
2000			137	110	121	77	96	138	135	162	134	375
2001	96	81	21	108	80	133	113	335	175	75	182	245
2002	170	115	12	135	210	130	165	260				
2003	83	135	45	33	105	109	108	115	123	157	265	57
2004	125	138	1	120	122	150	103	212	155	144	175	143
2005	109	56		95	72	72	79	116	148	139	370	178
2006	440	119	116	32	145	179	190	197	134	145	72	123
2007	140	40	114	65	88	235	120	187	240	198	211	141
2008	216	96	62	35	84	70	111	145	125	120	187	122
2009	308	77	29	22	77	145	176	64	164	170	189	121
2010	158	67	57	107	145	99	149	110	171	138	115	165
2011	290	60	58	100	105	98	135	107	235	104	257	165
2012	144	64	62	82	96	195	124	162	75	178	195	144
2013	130	120	105	116	135	86	209	106	148	140	167	107
2014	155	161	32	114	95	147	101	79	89	167	64	105
2015	120	57	108	59	82	167	81	117	97	107	72	102
2016	91	5	77	32	162	125	258	85	189	101	150	212
2017	145	35	10	54	96	110	176	103	219	128	145	160
2018	105	54	33	87	58	134	70	95	130	150	172	176
2019	41	65	23	67	55							

Fuente: Elaboración propia con datos del IDEAM.

ANEXO 2. Aforo Río Partadó pequeña central hidroeléctrica pch Juradó.

Abscisas	Profundidad (m)	Revoluciones	tiempo lectura	n	Velocidad	Velocidad media	Area	Caudal
			(seg)	(rps)	(m/seg)	(m/seg)	m2	m3
0,00	0,00	0	30	0,00				
2,00	0,30	120	30	4,00	1,03	0,69	1,15	0,788
4,00	0,45	178	30	5,93	1,52	1,27	0,75	0,956
6,00	0,63	155	30	5,17	1,33	1,42	1,08	1,538
8,00	0,80	150	30	5,00	1,28	1,30	1,43	1,866
10,00	0,93	177	30	5,90	1,51	1,40	1,73	2,419
12,00	0,98	95	30	3,17	0,82	1,16	1,91	2,224
14,00	0,95	85	30	2,83	0,73	0,77	1,93	1,491
16,00	0,90	90	30	3,00	0,77	0,75	1,85	1,390
18,00	0,90	81	30	2,70	0,70	0,73	1,8	1,322
20,00	0,92	53	30	1,77	0,46	0,58	1,82	1,049
22,00	1,20	63	30	2,10	0,54	0,50	2,12	1,060
24,00	1,00	79	30	2,63	0,68	0,61	2,2	1,344
26,00	0,20	35	30	1,17	0,30	0,49	1,2	0,590
26,60	0,00	0	30	0,00		0,20	0,2	0,041
							21,17	18,077

Fuente: Autores.

ANEXO 3. Código de ecuaciones de parámetros de drenaje

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.Windows.Forms.DataVisualization;

namespace Blastoise.Clases
{
    public class CalcularTiempos
    {

        public void calcularTiempos(DataGridView matrizTiempos, double A, double L, double S)
        {
            double pendPorcentaje = S / 100;
            double D = A / Math.PI;
            double primerTerm = L / (1.5 * D);
            double segundoTerm = Math.Pow(A, 2) / pendPorcentaje;
            double raizQuinta = Math.Pow(segundoTerm, 0.2);
            double resultado = primerTerm * raizQuinta;
            double division = L / Math.Pow(pendPorcentaje, 0.25);
            double resultadoTemez = 0.3 * Math.Pow(division, 0.76);
            double resultadoKirpich = 0.066 * Math.Pow(L / Math.Sqrt(pendPorcentaje), 0.77);
            double prom = 0, sum = 0;
            double alejamiento = L / Math.Sqrt(A);
            double numPassini = Math.Pow(A * L, 0.33333333);
            double denPassini = Math.Pow(S, 0.5);
            double resultadoPassini = alejamiento * (numPassini / denPassini);
            double gianNum = 4 * Math.Sqrt(A) + 1.5 * L;
            double gianDen = 25.3 * Math.Sqrt(pendPorcentaje * L);
            double resultadoGiandoti = gianNum / gianDen;

            matrizTiempos.Rows[1].Cells[1].Value = Math.Round(resultado, 2);
            sum += resultado;
            matrizTiempos.Rows[1].Cells[2].Value = Math.Round(resultado * 60, 2);
            matrizTiempos.Rows[2].Cells[1].Value = Math.Round(resultadoTemez, 2);
            sum += resultadoTemez;
            matrizTiempos.Rows[2].Cells[2].Value = Math.Round(resultadoTemez * 60, 2);
            matrizTiempos.Rows[3].Cells[1].Value = Math.Round(resultadoKirpich, 2);
            sum += resultadoKirpich;
            matrizTiempos.Rows[3].Cells[2].Value = Math.Round(resultadoKirpich * 60, 2);
            matrizTiempos.Rows[4].Cells[1].Value = Math.Round(resultadoPassini, 2);
            sum += resultadoPassini;
            matrizTiempos.Rows[4].Cells[2].Value = Math.Round(resultadoPassini * 60, 2);
            matrizTiempos.Rows[5].Cells[1].Value = Math.Round(resultadoGiandoti, 2);
            sum += resultadoGiandoti;
            matrizTiempos.Rows[5].Cells[2].Value = Math.Round(resultadoGiandoti * 60, 2);
            prom = sum / 5;
            matrizTiempos.Rows[6].Cells[1].Value = Math.Round(prom, 2);
            double promEst = prom;
            matrizTiempos.Rows[6].Cells[2].Value = Math.Round(prom * 60, 2);
            matrizTiempos.Rows[7].Cells[1].Value = Math.Round((promEst * 0.6), 2);
            matrizTiempos.Rows[7].Cells[2].Value = Math.Round((promEst * 0.6) * 60, 2);
        }

        public void calcularCurvaNumero(DataGridView matrizCurvaN, double CN)
        {
            double CNI = CN - 2.45 * Math.Pow((100 - CN), 0.62);
            double CNIII = CN + 0.6 * Math.Pow((100 - CN), 0.953);

            matrizCurvaN.Rows[0].Cells[1].Value = Math.Round(CN, 2);
        }
    }
}
```

```
matrizCurvaN.Rows[1].Cells[1].Value = Math.Round(CNI, 2);  
matrizCurvaN.Rows[2].Cells[1].Value = Math.Round(CNIII, 2);  
    }  
}
```

Fuente: Autores.

ANEXO 4. Código de ecuaciones de parámetros de intensidad máxima para diferentes períodos de retorno

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting;

namespace Blastoise
{
    public partial class IDF : Form
    {
        public List<double> colIntensidad = new List<double>();

        public IDF()
        {
            InitializeComponent();
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("10");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("20");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("30");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("40");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("50");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("60");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("70");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("80");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("90");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("100");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("110");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("120");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("130");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("140");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("150");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("160");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("170");
            dataGridCurvaIDF.Rows.Add("180");
        }

        private void IDF_Load(object sender, EventArgs e)
        {

        }

        private void calcularIDF_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            int T = 0;
            double a = Convert.ToDouble(aText.Text);
            double b = Convert.ToDouble(bText.Text);
            double c = Convert.ToDouble(cText.Text);
            double d = Convert.ToDouble(dText.Text);
            double m = Convert.ToDouble(mText.Text);
            double intensidad = 0;

            for (int i = 0; i < 18; i++) {
                for (int j = 1; j < 8; j++) {
```

```

if(j == 1)
{
    T = 2;
    double t = Convert.ToDouble(dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[0].Value);
    double numerador = a * Math.Pow(T, b) * Math.Pow(m, d);
    double denominador = Math.Pow(t/60, c);
    intensidad = Math.Round(numerador / denominador,3);
    dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[j].Value = intensidad;
    graficaIDF.Series["2 años"].Points.AddXY(t, intensidad);
    colIntensidad.Add(intensidad);
};

if (j == 2)
{
    T = 5;
    double t = Convert.ToDouble(dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[0].Value);
    double numerador = a * Math.Pow(T, b) * Math.Pow(m, d);
    double denominador = Math.Pow(t / 60, c);
    intensidad = Math.Round(numerador / denominador, 3);
    dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[j].Value = intensidad;
    graficaIDF.Series["5 años"].Points.AddXY(t, intensidad);
};
if (j == 3)
{
    T = 10;
    double t = Convert.ToDouble(dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[0].Value);
    double numerador = a * Math.Pow(T, b) * Math.Pow(m, d);
    double denominador = Math.Pow(t / 60, c);
    intensidad = Math.Round(numerador / denominador, 3);
    dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[j].Value = intensidad;
    graficaIDF.Series["10 años"].Points.AddXY(t, intensidad);
};
if (j == 4)
{
    T = 20;
    double t = Convert.ToDouble(dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[0].Value);
    double numerador = a * Math.Pow(T, b) * Math.Pow(m, d);
    double denominador = Math.Pow(t / 60, c);
    intensidad = Math.Round(numerador / denominador, 3);
    dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[j].Value = intensidad;
    graficaIDF.Series["20 años"].Points.AddXY(t, intensidad);
};
if (j == 5)
{
    T = 25;
    double t = Convert.ToDouble(dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[0].Value);
    double numerador = a * Math.Pow(T, b) * Math.Pow(m, d);
    double denominador = Math.Pow(t / 60, c);
    intensidad = Math.Round(numerador / denominador, 3);
    dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[j].Value = intensidad;
    graficaIDF.Series["25 años"].Points.AddXY(t, intensidad);
};
if (j == 6)
{
    T = 50;
    double t = Convert.ToDouble(dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[0].Value);
    double numerador = a * Math.Pow(T, b) * Math.Pow(m, d);
    double denominador = Math.Pow(t / 60, c);
    intensidad = Math.Round(numerador / denominador, 3);
    dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[j].Value = intensidad;
    graficaIDF.Series["50 años"].Points.AddXY(t, intensidad);
};
if (j == 7)
{

```

```

        T = 100;
        double t = Convert.ToDouble(dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[0].Value);
        double numerador = a * Math.Pow(T, b) * Math.Pow(m, d);
        double denominador = Math.Pow(t / 60, c);
        intensidad = Math.Round(numerador / denominador, 3);
        dataGridCurvaIDF.Rows[i].Cells[j].Value = intensidad;
        graficaIDF.Series["100 años"].Points.AddXY(t, intensidad);
    };
}
}
}
}
}
namespace Blastoise.Clases
{
    public class CalcularHietogramas
    {
        public static void obtenerProfundidadAcumulada(DataGridView dataGridHietogramas)
        {
            for(int i = 0; i < dataGridHietogramas.RowCount - 1; i++)
            {
                double D = Convert.ToDouble(dataGridHietogramas.Rows[i].Cells[0].Value);
                double I = Convert.ToDouble(dataGridHietogramas.Rows[i].Cells[1].Value);
                double profAcumulada = (D * I) / 60;
                dataGridHietogramas.Rows[i].Cells[2].Value = Math.Round(profAcumulada, 3);
            }
        }

        public static void obtenerProfundidadIncremental(DataGridView dataGridHietogramas)
        {
            dataGridHietogramas.Rows[0].Cells[3].Value =
            Convert.ToDouble(dataGridHietogramas.Rows[0].Cells[2].Value);

            for(int i = 0; i < dataGridHietogramas.RowCount - 1; i++)
            {
                double minuendo = Convert.ToDouble(dataGridHietogramas.Rows[i + 1].Cells[2].Value);
                double sustraendo = Convert.ToDouble(dataGridHietogramas.Rows[i].Cells[2].Value);
                dataGridHietogramas.Rows[i + 1].Cells[3].Value = Math.Round((minuendo -
sustraendo),2);
            }
        }

        public static int llenarPosicion(DataGridView dataGridHietogramas, int cont)
        {
            for(int i = 0; i < dataGridHietogramas.RowCount - 1; i++)
            {
                dataGridHietogramas.Rows[i].Cells[4].Value = cont;
                cont++;
            }
            return cont;
        }

        public static void llenarPosicionOrdenada(DataGridView dataGridHietogramas, int newCont,
System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting.Chart graficaHietogramas)
        {
            int mediana = newCont / 2;
            int auxImp = 1, auxPar = 2, auxSubir = 0, auxBajar = 1;

```


ANEXO 5. Código de ecuaciones de balance hídrico y ETP

```
using Blastoise.Clases;
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.ComponentModel;
using System.Data;
using System.Drawing;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using System.Windows.Forms;
using Microsoft.Office.Interop.Excel;
using System.Windows.Forms.DataVisualization.Charting;
using System.Windows.Forms.DataVisualization;
using System.Data.OleDb;
using System.IO;

namespace Blastoise
{
    public partial class balanceH : Form
    {
        Validacion v = new Validacion();

        public balanceH()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void calcularBH_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            dataGridView1.Rows.Add("PROM(Tj):", temp1.Text, temp2.Text, temp3.Text, temp4.Text,
temp5.Text, temp6.Text, temp7.Text, temp8.Text, temp9.Text, temp10.Text, temp11.Text, temp12.Text);
            dataGridView1.Rows.Add("Precipitación(mm):", precip1.Text, precip2.Text, precip3.Text,
precip4.Text, precip5.Text, precip6.Text, precip7.Text, precip8.Text, precip9.Text, precip10.Text,
precip11.Text, precip12.Text);
            dataGridView1.Rows.Add("Factor corr. mens.:", factor1.Text, factor2.Text, factor3.Text,
factor4.Text, factor5.Text, factor6.Text, factor7.Text, factor8.Text, factor9.Text, factor10.Text,
factor11.Text, factor12.Text);
            dataGridView1.Rows.Add("ij :");
            dataGridView1.Rows.Add("a :");
            dataGridView1.Rows.Add("Ej :");
            dataGridView1.Rows.Add("Ej corregido:");
            dataGridView1.Rows.Add("-----", "-----", "-----", "-----", "BALANCE", " HÍDRICO", "
ESTACIÓN", "_____", "-----", "-----", "-----", "-----");
            dataGridView1.Rows.Add("Precipitación(mm):");
            dataGridView1.Rows.Add("ETP Corregido:");
            dataGridView1.Rows.Add("Delta:");
            dataGridView1.Rows.Add("Almacenaje:");
            dataGridView1.Rows.Add("Déficit:");
            dataGridView1.Rows.Add("Exceso:");
            dataGridView1.Rows.Add("Delta Almacenaje:");
            dataGridView1.Rows.Add("ETR(mm):");
            dataGridView1.Rows.Add("Reposición/Utilizacion:");

            CalcularBalanceHidrico calcularBalanceHidrico = new CalcularBalanceHidrico();

            //fila 0 - Temperaturas Promedio:
            double totalPromTJ =
calcularBalanceHidrico.obtenerPromedioTotalTemperaturas(dataGridView1);
            dataGridView1.Rows[0].Cells["total"].Value = Math.Round(totalPromTJ,2);

            //fila 1 - Precipitaciones:
```

```

        double sumPrecip =
calcularBalanceHidrico.obtenerPromedioTotalPrecipitaciones(dataGridView1);
        dataGridView1.Rows[1].Cells["total"].Value = Math.Round(sumPrecip, 2);

//Fila 3 - Sumatoria de ij:
double sumij = calcularBalanceHidrico.obtenerSumatoriaIJ(dataGridView1);
dataGridView1.Rows[3].Cells["Total"].Value = Math.Round(sumij, 2);

//Fila 4 - Cálculo de a:
double aTotal = calcularBalanceHidrico.calculoDea(sumij);
dataGridView1.Rows[4].Cells[1].Value = Math.Round(aTotal,2);

//Fila 5 - Total Sumatoria Ej:
double sumEj = calcularBalanceHidrico.obtenerSumatoriaEj(dataGridView1, sumij, aTotal);
dataGridView1.Rows[5].Cells["Total"].Value = Math.Round(sumEj, 2);

//Fila 6 - Total Sumatoria Ej corregido:
double sumEjCorr =calcularBalanceHidrico.obtenerSumatoriaEjCorregido(dataGridView1);
dataGridView1.Rows[6].Cells["Total"].Value = Math.Round(sumEjCorr, 2);
//Fila 7 . -----BALANCE HÍDRICO ESTACIÓN -----
-----

//Fila 8 - Precipitación Prom:
dataGridView1.Rows[8].Cells["Total"].Value = Math.Round(sumPrecip, 2);

//fila 9 - ETP Corregido:
dataGridView1.Rows[9].Cells["Total"].Value = Math.Round(sumEjCorr, 2);

//Fila 10 - Delta:
calcularBalanceHidrico.obtenerDelta(dataGridView1);

//Fila 11 - Almacenaje:
//se adopta Almacenaje de agua útil = 100 si finaliza delta positivo y pasa a negativo

int posicionGuardada =
calcularBalanceHidrico.obtenerPosicionInicialAlmacenaje(dataGridView1);
calcularBalanceHidrico.obtenerAlmacenaje(dataGridView1, posicionGuardada);
//Fila 12 - Déficit:
calcularBalanceHidrico.obtenerDeficit(dataGridView1);
calcularBalanceHidrico.obtenerSumaDef(dataGridView1);

//Fila 13 - Exceso:
int posicion = calcularBalanceHidrico.obtenerPosicionInicialExceso(dataGridView1);
calcularBalanceHidrico.obtenerExcesos(dataGridView1, posicion);

//fila 14 - Delta Almacenaje:
calcularBalanceHidrico.obtenerDeltaAlmacenaje(dataGridView1);

//fila 15 - Evapotranspiración Real:
calcularBalanceHidrico.obtenerETPReal(dataGridView1);

//fila 16 - Indicación de Reposición o Utilización
calcularBalanceHidrico.obtenerReposicionUtilizacion(dataGridView1);
//Verificar el Balance Hídrico:
calcularBalanceHidrico.verificacion(dataGridView1, verificaIzq, verificaDer, avisoColor,
sumEjCorr);
    }
//Clase CALCULARBALANCEHIDRICO con los métodos donde se calibran las ecuaciones:
namespace Blastoise.Clases
{
    public class CalcularBalanceHidrico

```

```
{
```

```
public double obtenerPromedioTotalTemperaturas(DataGridView dataGridView1)
{
    double sumPromTJ = 0;
    for (int i = 0; i < 12; i++)
    {
        double nT = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[0].Cells[i + 1].Value);
        sumPromTJ += nT;
    }
    double totalPromTJ = sumPromTJ / 12;

    return totalPromTJ;
}
```

```
public double obtenerPromedioTotalPrecipitaciones(DataGridView dataGridView1)
{
    double sumPrecip = 0;
    for (int j = 0; j < 12; j++)
    {
        double nP = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[1].Cells[j + 1].Value);
        dataGridView1.Rows[1].Cells[j + 1].Value = nP;
        dataGridView1.Rows[8].Cells[j + 1].Value = nP;
        sumPrecip += nP;
    }
    return sumPrecip;
}
```

```
public double obtenerSumatoriaIJ(DataGridView dataGridView1)
{
    double sumij = 0;
    for (int k = 0; k < 12; k++)
    {
        double ijNum = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[0].Cells[k + 1].Value);
        double ij = Math.Round(Math.Pow((ijNum / 5), 1.514), 2);
        dataGridView1.Rows[3].Cells[k + 1].Value = ij;
    }
}
```

```

        sumij += Convert.ToDouble(ij);
    }
    return sumij;
}

public double calculoDea(double sumij)
{
    double a1 = 0.000000675 * Math.Pow(sumij, 3);
    double a2 = 0.0000771 * Math.Pow(sumij, 2);
    double a3 = 0.0179 * sumij;
    double aTotal = Math.Round(a1 - a2 + a3 + 0.4923, 5);

    return aTotal;
}

public double obtenerSumatoriaEj(DataGridView dataGridView1, double sumij, double aTotal)
{
    double sumEj = 0;
    for (int i = 0; i < dataGridView1.Columns.Count - 2; i++)
    {
        double ejNum = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[0].Cells[i + 1].Value);
        double numerador = 10 * ejNum;
        double denominador = sumij;
        double ejTotal = 16 * Math.Pow((numerador / denominador), aTotal);
        dataGridView1.Rows[5].Cells[i + 1].Value = Math.Round(ejTotal, 2);
        sumEj += ejTotal;
    }
    return sumEj;
}

public double obtenerSumatoriaEjCorregido(DataGridView dataGridView1)
{
    double sumEjCorr = 0;
    for (int i = 0; i < dataGridView1.Columns.Count - 1; i++)
    {
        double nEjCorr = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[5].Cells[i + 1].Value)

```

```

        * Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[2].Cells[i + 1].Value);
        dataGridView1.Rows[6].Cells[i + 1].Value = Math.Round(nEjCorr, 2);
        dataGridView1.Rows[9].Cells[i + 1].Value = Math.Round(nEjCorr, 2);
        sumEjCorr += nEjCorr;
    }
    return sumEjCorr;
}

public void obtenerDelta(DataGridView dataGridView1)
{
    for (int i = 0; i < 12; i++)
    {
        double deltaAux1 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[1].Cells[i + 1].Value);
        double deltaAux2 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[9].Cells[i + 1].Value);
        double delta = deltaAux1 - deltaAux2;
        dataGridView1.Rows[10].Cells[i + 1].Value = delta;
    }
}

public int obtenerPosicionInicialAlmacenaje(DataGridView dataGridView1)
{
    int delta1 = 1, delta2 = 2;
    double inicioAlm = 0, diferencia = 0;
    int posicionGuardada = 0;

    for (int i = 0; i < 11; i++)
    {
        double auxDelta1 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[delta1 + i].Value);
        double auxDelta2 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[delta2 + i].Value);

        if (auxDelta1 < 0 && auxDelta2 >= 0)
        {
            dataGridView1.Rows[11].Cells[delta2 + i].Value = auxDelta2;
        }

        if (auxDelta1 >= 0 && auxDelta2 < 0)

```

```

    {
        dataGridView1.Rows[11].Cells[delta1 + i].Value = 100;
        posicionGuardada = i;

        inicioAlm = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[delta1 + i].Value);
        diferencia = Convert.ToInt32(inicioAlm) - Convert.ToInt32(Math.Abs(auxDelta2));
        while (diferencia >= 0)
        {
            dataGridView1.Rows[11].Cells[delta2 + i].Value = diferencia;

            i++;
            if (Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[delta2 + i].Value) < 0)
            {
                diferencia -=
Math.Abs(Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[delta2 + i].Value));
                if (diferencia < 0)
                {
                    dataGridView1.Rows[11].Cells[delta2 + i].Value = 0;
                    dataGridView1.Rows[12].Cells[delta2 + i].Value = diferencia;
                }
            }
        }
    }
}
return posicionGuardada;
}

public void obtenerAlmacenaje(DataGridView dataGridView1, int posicionGuardada)
{
    int aux1 = 1, aux2 = 2, i = 0;
    double suma = 0;
    while (i < posicionGuardada)
    {
        double auxDelta1 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[aux1 + i].Value);
        double auxDelta2 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[aux2 + i].Value);
    }
}

```

```

        if (dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value == null)
        {
            dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value = 0;
        } else if (Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value) > 0 &&
            Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value) < 100)
        {
            dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value = auxDelta1;
            suma = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value) +
auxDelta2;
        }
        if (suma > 100)
        {
            dataGridView1.Rows[11].Cells[aux2 + i].Value = 100;
        } else if (suma > 0 && suma < 100)
        {
            dataGridView1.Rows[11].Cells[aux2 + i].Value = auxDelta1;
        }
        i++;
    }
}

public void obtenerDeficit(DataGridView dataGridView1)
{
    int i = 0;

    while(dataGridView1.Rows[12].Cells[i + 1].Value == null)
    {
        if (Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[i + 1].Value) == 0 &&
            Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[i + 1].Value) < 0)
        {
            dataGridView1.Rows[12].Cells[i + 1].Value =
Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[i + 1].Value);
        }

        i++;
    }
}

```

```

}

public void obtenerSumaDef(DataGridView dataGridView1)
{
    double sumDef = 0;
    for (int j = 0; j < 12; j++)
    {
        if (dataGridView1.Rows[12].Cells[j + 1].Value != null)
        {
            sumDef += Math.Abs(Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[12].Cells[j + 1].Value));
        }
    }
    dataGridView1.Rows[12].Cells[13].Value = sumDef;
}

public int obtenerPosicionInicialExceso(DataGridView dataGridView1)
{
    int aux1 = 1, aux2 = 2;
    int i = 0, posicion = 1;

    do
    {
        double auxDelta2 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[aux2 + i].Value);

        double auxAlmacenaje1 = Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 +
i].Value);

        if (Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[aux2 + i].Value) == 100) {
            double suma = auxAlmacenaje1 + auxDelta2;
            double excesoInicial = suma - 100;
            dataGridView1.Rows[13].Cells[aux2 + i].Value = excesoInicial;
            posicion = i;
        }
        i++;
    } while (Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value) != 100);
}

```

```

        return posicion + 2;
    }

    public void obtenerExcesos(DataGridView dataGridView1, int posicion)
    {
        int i = 1;
        double sumExcesos = 0;
        while(Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[posicion + i].Value) == 100)
        {
            dataGridView1.Rows[13].Cells[posicion + i].Value =
            Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[10].Cells[posicion + i].Value);
            i++;
        }
        for (int j = 0; j < 12; j++)
        {
            if (dataGridView1.Rows[13].Cells[j + 1].Value != null)
            {
                sumExcesos += Math.Abs(Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[13].Cells[j +
1].Value));
            }
        }
        dataGridView1.Rows[13].Cells[13].Value = sumExcesos;
    }

    public void obtenerDeltaAlmacenaje(DataGridView dataGridView1)
    {
        int aux1 = 1;

        dataGridView1.Rows[14].Cells[1].Value =
        Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[13].Value) -

        Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[1].Value);
        for(int i = 1; i < 12; i++)
        {
            dataGridView1.Rows[14].Cells[aux1 + i].Value =
            Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[aux1 + i].Value) -

            Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[11].Cells[i].Value);
        }
    }
}

```

```

public void obtenerETPReal(DataGridView dataGridView1)
{
    double sumaETR = 0;
    for (int i = 0; i < 12; i++)
    {
        if(Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[1].Cells[i + 1].Value) >=
Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[6].Cells[i + 1].Value))
        {
            dataGridView1.Rows[15].Cells[i + 1].Value =
Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[6].Cells[i + 1].Value);
        }
        else
        {
            dataGridView1.Rows[15].Cells[i + 1].Value =
Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[1].Cells[i + 1].Value) +
Math.Abs(Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[14].Cells[i + 1].Value));
        }
    }
    for (int i = 0; i < 12; i++)
    {
        sumaETR += Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[15].Cells[i + 1].Value);
    }

    dataGridView1.Rows[15].Cells[13].Value = Math.Round(sumaETR, 0);
}

public void obtenerReposicionUtilizacion(DataGridView dataGridView1)
{
    for (int i = 0; i < 12; i++)
    {
        if(Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[14].Cells[i + 1].Value) > 0)
        {
            dataGridView1.Rows[16].Cells[i + 1].Value = "R";
        }else if(Convert.ToDouble(dataGridView1.Rows[14].Cells[i + 1].Value) < 0)
        {
            dataGridView1.Rows[16].Cells[i + 1].Value = "U";
        }
    }
}

```

```

        }
    }
}

public void verificacion(DataGridView dataGridView1, TextBox verificaIzq, TextBox
verificaDer, TextBox avisoColor, double sumEjCorr)
{
    double izq = Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[9].Cells[13].Value) +
Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[13].Cells[13].Value);
    verificaIzq.Text = Convert.ToString(izq);
    double der = Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[8].Cells[13].Value) +
Convert.ToInt32(dataGridView1.Rows[12].Cells[13].Value);
    verificaDer.Text = Convert.ToString(der);
    if (izq == der)
    {
        avisoColor.Text = "OK.";
        avisoColor.Focus();
        avisoColor.BackColor = Color.Green;

    }
    else{
        avisoColor.Text = "NO Cumple.";
        avisoColor.Focus();
        avisoColor.BackColor = Color.Red;
    }
}
}
}

```

Fuente: Autores.

ANEXO 6. Medición de serie de caudales medios mensuales desde el año 1972 hasta 1988.

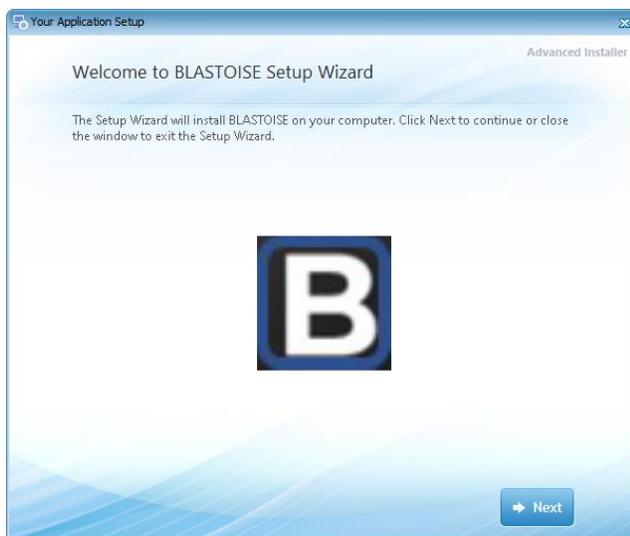
CAUDALES MEDIOS MENSUALES (m3/seg)													
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Anual
1972	3.00	3.00	2.55	3.56	5.26	6.28	6.24	5.49	4.71	7.54	9.70	3.60	5.08
1973	3.00	3.00	3.86	3.92	6.36	6.08	7.27	7.20	4.97	9.67	9.71	3.60	5.72
1974	3.00	3.00	2.50	3.63	4.99	6.42	8.00	4.71	4.73	8.06	7.34	3.72	5.01
1975	3.00	3.90	2.50	4.46	5.95	7.56	7.95	9.07	4.51	7.35	11.31	6.57	6.18
1976	3.00	3.89	2.51	8.84	7.16	6.15	8.58	8.14	4.99	6.48	4.77	4.95	5.79
1977	3.00	3.00	2.50	4.93	5.53	6.52	6.71	5.31	6.28	7.68	6.07	3.97	5.13
1978	3.00	3.00	3.37	4.46	5.26	6.89	4.99	6.40	7.83	6.51	11.32	3.61	5.55
1979	3.00	3.00	2.78	6.78	5.98	5.88	4.66	8.27	5.65	6.43	5.14	3.54	5.09
1980	3.00	3.01	2.58	3.65	5.04	5.48	8.77	5.81	6.79	5.76	6.42	3.68	5.00
1981	3.18	3.92	3.00	5.00	7.16	6.15	6.09	6.98	4.75	9.81	4.94	4.91	5.49
1982	3.12	3.00	2.50	4.93	5.53	6.52	6.71	6.34	4.76	5.08	4.50	3.54	4.71
1983	3.00	3.00	2.50	3.63	4.99	6.42	8.00	4.71	4.73	8.06	4.53	3.79	4.78
1984	4.05	6.51	3.52	4.83	10.07	5.98	6.13	10.22	6.82	6.79	5.12	3.84	6.16
1985	3.18	3.00	3.78	3.73	4.60	4.66	4.51	4.79	5.86	7.37	6.32	4.03	4.65
1986	3.00	3.01	2.50	9.35	9.81	5.29	6.02	6.31	5.36	4.80	4.50	3.50	5.29
1987	3.03	3.00	2.50	7.67	10.53	6.67	6.52	12.05	5.09	7.49	4.65	3.59	6.07
1988	3.00	3.89	2.50	4.20	6.67	4.81	8.70	4.86	7.35	10.11	7.53	4.49	5.68
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	
Media	3.09	3.42	2.82	5.15	6.52	6.10	6.81	6.86	5.60	7.35	6.70	4.05	5.37
MAXIMO	4.05	6.51	3.86	9.35	10.53	7.56	8.77	12.05	7.83	10.11	11.32	6.57	12.05
MINIMO	3.00	3.00	2.50	3.56	4.60	4.66	4.51	4.71	4.51	4.80	4.50	3.50	2.50

Fuente: Estudio de Pre-Factibilidad realizado por la firma CRA.

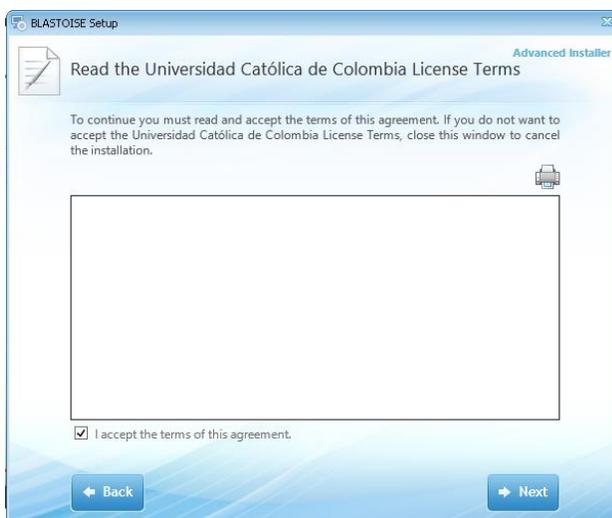
ANEXO 7. Manual de Instalación

INSTALACIÓN:

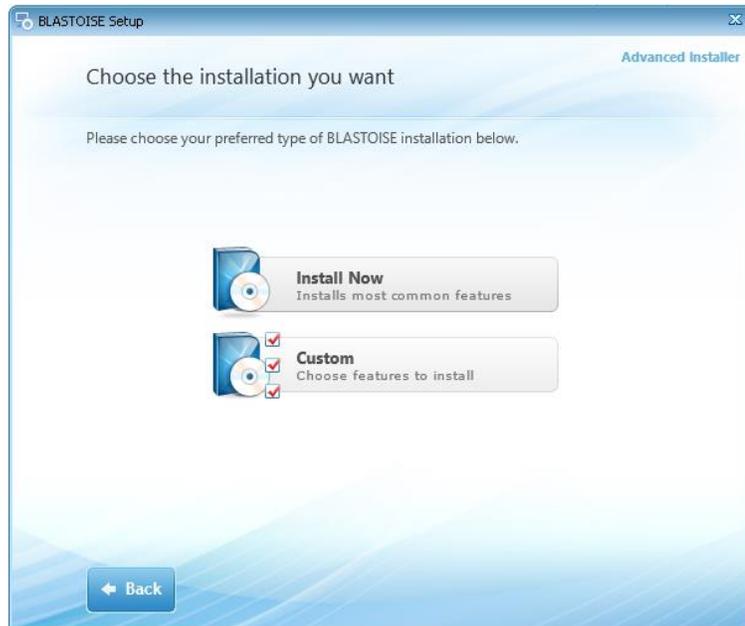
1. Para realizar la instalación, ejecute el paquete instalador llamado “Blastoise”. Una vez el instalador se ejecuta, se inicia el asistente de instalación de BLASTOISE, debe seleccionar la opción “Next” (Siguiente).



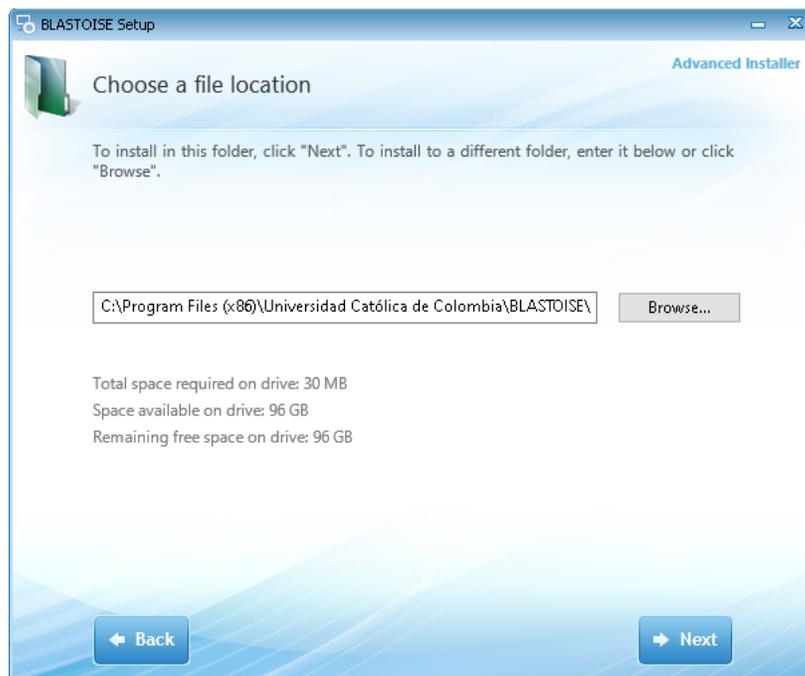
2. A continuación aparece la ventana de licencia del software en la cual deberá seleccionar la casilla “aceptar términos y condiciones” y hacer clic en Next.



3. Luego, tendrá que seleccionar el modo de instalación (Se recomienda instalar automáticamente haciendo clic en "Install Now"), haga clic en la opción de instalación para continuar con el proceso.



4. Seguido aparecerá la localización del instalador en el equipo seleccione una carpeta de instalación o deje la ubicación por defecto y presione el botón de Next.



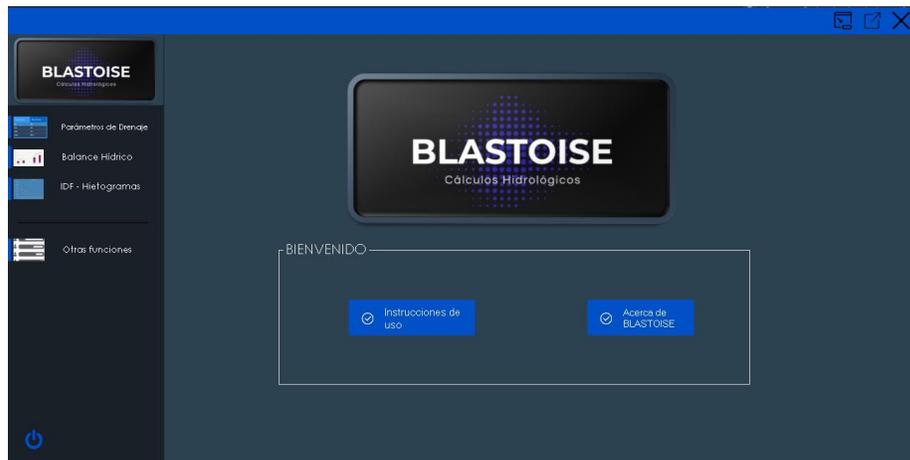
5. BLASTOISE ha finalizado la etapa de instalación. De clic en Next y la instalación se habrá completado.



6. Al abrir el ejecutable creado automáticamente el programa BLASTOISE estará listo para ser utilizado.

Fuente: Autores.

ANEXO 8. Manual del Usuario



Encontrar parámetros de drenaje

A través de esta función puede calcular el promedio de tiempos de concentración (T_c) logrados con cinco metodologías, el tiempo de retardo (T_{lag}) y la curva número (CN) por el criterio Soil Conservation Service (S.C.S.) de los Estados Unidos. Llene los datos requeridos en parámetros morfométricos.

The screenshot shows the 'PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS' (Morphometric Parameters) input form. The form is titled 'Ingrese los Parámetros de forma:' and contains five input fields: 'A - Área (km²):', 'P - Perímetro (Km):', 'L - Long. Cauce Pral. (Km):', 'S - Pendiente de la Cuenca (m/m):', and 'H - Desnivel entre pto. más alto y pto. desagüe (m):'. Below the form are two sections: 'Tiempos de Concentración (T_c) y de Retardo (T_{lag})' and 'Curva Número (CN)'. Each section has a 'Metodología' dropdown menu, 'HORAS' and 'MINUTOS' input fields, and a 'Calcular' button.

Encontrar Balance Hídrico

En esta función determina la ETP con corrección y ETR por la metodología Thornthwaite-Mather, y el Balance Hídrico con los datos de las estaciones climatológicas de la cuenca en estudio con los parámetros de temperatura promedio mensual y de precipitación registrada en un período de 12 meses. En las áreas demarcadas en rojo debe ingresar los datos de entrada de temperatura, precipitación y factor corrección latitudinal. Luego de ingresar todos los valores presione el botón "Calcular".

Puede ingresar los datos manualmente presionando antes o desde "cargar datos". *Seleccione ingreso automático para desplegar el menú preestablecido.

PROM(T) Precipitación(mm) Factor Corrección Almacenaje

Ingreso Manual Ingreso Automático

Verificación de la ETP
 $ETP + Exc. = P + Déf.$

=

PARÁMETROS	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	Total
PROM(T):													
Precipitación...													
Factor corr. m...													
i:													
a:													
Ej:													
Ej corregido:													
					BALANCE	HÍDRICO	ESTACI...						
Precipitación...													
ETP Corregido:													
Delta:													
Almacenaje:													
Déficit:													
Exceso:													
Delta Almac...													

Generar curvas IDF

Sirve para obtener las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia (IDF) para diferentes períodos de retorno ingresando los parámetros a,b,c y d de acuerdo con la metodología Díaz Granados(1998) para cada región Geográfica. Ingrese estos parámetros dentro del área demarcada en rojo, luego haga clic en "Calcular IDF" y si desea generar los Hietogramas haga clic en el botón "obtener Hietogramas".



Generar Hietogramas

El botón obtener hietogramas desprende una ventana que envía la información de intensidad recogida en las curvas IDF para calcular y graficar el hietograma de precipitación por el método de Bloques Alternos para diferentes períodos de retorno (2,5,10,20,25,50 y 100 años) que el usuario escoja.



Fuente: Autores.