



**Evaluación del Impacto de la Resolución de Modelado en la Simulación del Evento
de Inundación de Mocoa en Abril de 2017**

Andrea Carolina Tavera Paredes

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Noviembre de 2018

**Evaluación del Impacto de la Resolución de Modelado en la Simulación del Evento
de Inundación de Mocoa en Abril de 2017**

Andrea Carolina Tavera Paredes

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director: Humberto Vergara

Líneas de Investigación:
Manejo integrado del recurso hídrico - Gestión para el desarrollo urbano y rural y mejoramiento de la
calidad de vida

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2018

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

*Evaluación del Impacto de la Resolución de Modelado
en la Simulación del Evento de Inundación de Mocoa en
Abril de 2017*

Andrea Carolina Tavera Paredes

A mi familia.

Agradecimientos

Es imprescindible iniciar este documento agradeciendo a Dios, por todo lo que me ha dado a lo largo de mi vida, pues todo lo construido y aprendido en ella, me trajo al momento de escribir y desarrollar esta investigación. Gracias a Él, tuve y tengo las capacidades, cualidades y habilidades que me llevan a ser la persona que soy, que quiero ser y a desarrollar todo lo que quiero lograr.

Le agradezco de manera infinita también a mi familia, mis padres y mis hermanos, porque sin su amor, apoyo y ánimo por cumplir mis sueños y metas no habría sido capaz de terminar esta investigación y todo lo que requirió su desarrollo, desde irme de Colombia por varios meses para estudiar e investigar en Estados Unidos hasta sustentarla ante mis jurados y mi director. Le agradezco también a David García, por el ánimo tan particular que me brindó todo el tiempo y por su amor y paciencia.

Debo agradecer de manera especial también al Doctor Humberto Vergara y a su familia, por el acompañamiento que tuvieron conmigo en La Universidad de Oklahoma, desde antes que fuera y hasta mucho después de que volviera a Colombia, les agradezco por ser mi familia lejos de casa, por ser tan atentos conmigo y por demostrarme su afecto en todo momento. Agradezco igualmente a Kenneth Ochoa, actual director del programa, por darme la idea de ir a trabajar a Oklahoma y acompañarme tanto cuando estuve lejos como cuando regresé.

Por último, pero no menos importante le agradezco a la Universidad El Bosque y a todos los maestros que tuve a lo largo de mis cinco años de carrera, pues por sus enseñanzas pude lograr lo que logré y aprender todo lo que necesito para ser una excelente ingeniera ambiental.

1. Tabla de contenido

1. TABLA DE CONTENIDO	- 1 -
2. LISTADO DE TABLAS	- 3 -
3. LISTADO DE FIGURAS	- 3 -
4. RESUMEN	- 6 -
5. ABSTRACT	- 6 -
6. INTRODUCCIÓN	- 7 -
7. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	- 9 -
8. JUSTIFICACIÓN	- 10 -
9. OBJETIVOS	- 11 -
GENERAL:	- 11 -
ESPECÍFICOS:	- 11 -
10. MARCO DE REFERENCIA	- 12 -
10.1 ANTECEDENTES.....	- 12 -
10.1.1 <i>Investigación Conjunta Universidad El Bosque – Universidad de Oklahoma</i>	- 12 -
10.1.2 <i>Estudio de caso: El Desastre de Mocoa</i>	- 12 -
10.2 ESTADO DEL ARTE	- 14 -
10.3 MARCO CONCEPTUAL.....	- 16 -
10.4 MARCO TEÓRICO	- 18 -
10.4.1 <i>Ciclo hidrológico</i>	- 18 -
10.4.2 <i>Estimaciones satelitales de precipitación</i>	- 20 -
10.4.3 <i>Modelación Hidrológica</i>	- 21 -
10.4.4 <i>Modelos de predicción de inundaciones</i>	- 25 -
10.4.5 <i>Tecnología en el estudio de la vulnerabilidad de desastres naturales</i>	- 26 -
10.5 MARCO NORMATIVO	- 27 -
10.6 MARCO GEOGRÁFICO	- 28 -
10.6.1 <i>Localización y geomorfología</i>	- 28 -
10.6.2 <i>Clima y sistemas productivos</i>	- 29 -
10.6.3 <i>Cobertura vegetal</i>	- 30 -
10.6.4 <i>Suelos</i>	- 30 -
10.6.5 <i>Amenazas al municipio</i>	- 31 -
10.6.6 <i>Geografía del desastre</i>	- 31 -
10.7 MARCO INSTITUCIONAL	- 31 -
11. MARCO METODOLÓGICO	- 32 -
11.1. DISEÑO METODOLÓGICO	- 32 -
11.2 PLAN DE TRABAJO	- 38 -
11.2.1 <i>Fase 1. Recolección de información para caracterizar el Evento de Mocoa</i>	- 38 -
11.2.2 <i>Fase 2. Configuración del modelo hidrológico con lluvia satelital</i>	- 39 -
11.2.3 <i>Fase 3. Evaluación del impacto de la resolución espacial y temporal en la simulación del evento</i>	- 43 -
11.2.4 <i>Fase 4. Evaluación de la habilidad del sistema de modelación en simular el evento</i>	- 48 -
11.3 TABLA METODOLÓGICA	- 50 -

12. RESULTADOS & ANÁLISIS	- 57 -
FASE I. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN PARA CARACTERIZAR EL EVENTO DE MOCOA	- 57 -
<i>Reportes</i>	- 57 -
<i>Registros y observaciones hidrometeorológicas</i>	- 59 -
FASE 2. CONFIGURACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO CON LLUVIA SATELITAL	- 60 -
<i>Configuración EF5</i>	- 60 -
<i>Productos de precipitación satelital</i>	- 64 -
FASE 3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL EN LA SIMULACIÓN DEL EVENTO	- 68 -
3.1 <i>Especificación de resolución espacial y temporal</i>	- 68 -
3.2. <i>Construcción del modelo de severidad y análisis comparativo del impacto de la resolución</i>	- 73 -
FASE 4. EVALUACIÓN DE LA HABILIDAD DEL SISTEMA DE MODELACIÓN EN SIMULAR EL EVENTO. -	78
- 4.1. <i>Confrontación de la modelación hidrológica con los datos de cartografía y reportes.</i> -	78 -
13. CONCLUSIONES.....	- 85 -
14. RECOMENDACIONES.....	- 87 -
15. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 88 -

2. Listado de tablas

Tabla 1. Características de las dimensiones de modelos matemáticos	-22-
Tabla 2. Síntesis de normativa en el tema de Gestión del Riesgo en Colombia	-26-
Tabla 3. Diseño metodológico de la investigación	-32-
Tabla 4. Fuentes de información de reportes de la inundación de Mocoa	-37-
Tabla 5. Fuentes de los parámetros a priori para la implementación de EF5	-40-
Tabla 6. Especificación de las combinaciones de resoluciones	-44-
Tabla 7. Tabla metodológica de la investigación	-51-
Tabla 8. Valores de correlación de los productos satelitales 3B42 y IMERG en las 4 estaciones..	-65-
Tabla 9. Valores obtenidos de Bias y Correlación entre las estaciones hidrometeorológicas y los productos satelitales	-67-

3. Listado de figuras

Figura 1. Fotografía de la Tragedia de Mocoa. Fuente: (BBC Mundo, 2017).....	- 13 -
Figura 2. Ciclo Hidrológico. Fuente: (Ordoñez, 2011)	- 19 -
Figura 3. Satélite GPM y sus componentes. Fuente: (NASA, 2017)	- 21 -
Figura 4. Modelo hidrológico. Fuente: (Vergara, 2018)	- 22 -
Figura 5. Costo computacional de las simulaciones. Fuente: elaboración propia.....	- 24 -
Figura 6. Sistema de modelamiento hidrológico EF5. Adaptado de (The University of Oklahoma, 2018)	- 25 -
Figura 7. Ubicación de Mocoa, en el departamento del Putumayo en Colombia. Fuente: Google Earth.....	- 29 -
Figura 8. Cobertura vegetal en Mocoa al año 2012. Fuente (Rojas, 2015)	- 30 -
Figura 9. Ríos desbordados en la avalancha de Mocoa. Fuente: (Euscátegui, 2017).....	- 31 -
Figura 10. Estaciones tomadas para las métricas. Fuente: elaboración propia.	- 39 -
Figura 11. Cuenca de Mocoa en QGIS. Fuente: elaboración propia.	- 40 -
Figura 12. Algoritmo de inundación de EF5. Fuente: (Vergara, 2018).	- 42 -
Figura 13. Capas de DEM sobre la cuenca de Mocoa; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.....	- 44 -
Figura 14. Capas de FACC sobre la cuenca de Mocoa; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.....	- 44 -
Figura 15. Capas de FDIR sobre la cuenca de Mocoa; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.....	- 45 -
Figura 16. Caudal máximo unitario sobre Texas y Oklahoma. Fuente (OU - NOAA - CIMMS - NSSL, 2015)	- 48 -
Figura 17. Esquematización del plan de trabajo. Fuente: elaboración propia.	- 50 -
Figura 18. Mapa de procesos geomorfológicos en la zona de Mocoa Putumayo. Fuente (Universidad Nacional de Colombia, 2017)	- 58 -
Figura 19. Zonas de amenaza por inundación en Mocoa. Fuente: (Jojoa, 2003)	- 58 -
Figura 20. Mapa versión shapefile de los barrios afectados por la inundación en Mocoa. Fuente: (OCHA, 2017).	- 59 -
Figura 21. Precipitación total diaria de los meses marzo y abril del 2017 en las estaciones Mocoa Acueducto (color verde), Campucana (color rojo), Patoyaco (color morado) y Minchoy (color azul). Fuente: elaboración propia	- 60 -
Figura 22. Parámetros del balance hídrico CREST; a) Fracción impermeable del suelo (IM), b) Capacidad máxima de retención de agua en el suelo (WM), c) Conductividad hidráulica saturada (Ksat), d) Exponente de la curva variable de infiltración b. Fuente: elaboración propia,	- 61 -

Figura 23. Parámetro Alpha superficial α_0 de onda cinemática para el enrutamiento de flujo superficial; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.....	- 62 -
Figura 24. Parámetro Alpha canalizado (α) de onda cinemática para el enrutamiento de flujo superficial; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.....	- 62 -
Figura 25. Parámetro Beta (β) canalizado de onda cinemática para el enrutamiento de flujo superficial; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.....	- 63 -
Figura 26. Parámetro Alpha (m) canalizado para la simulación de la inundación; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.	- 63 -
Figura 27. Parámetro Beta (k) canalizado para la simulación de la inundación; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.	- 64 -
Figura 28. Parámetro Profundidad máxima de banco; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.....	- 64 -
Figura 29. Comparación del evento con los productos 3B42 e IMERG en hidrogramas; a) Producto 3B42 con énfasis en precipitación, b) Producto IMERG con énfasis en precipitación, c) Producto 3B42 con énfasis en caudal, d) Producto IMERG con énfasis en caudal. Fuente: elaboración propia.	- 65 -
Figura 30. Gráficas de dispersión entre la precipitación de los productos satelitales 3B42 y IMERG en las 4 estaciones. Fuente: elaboración propia.	- 66 -
Figura 31. Correlaciones entre 3B42 y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. Fuente: elaboración propia.....	- 67 -
Figura 32. Correlaciones entre IMERG y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. Fuente: elaboración propia.....	- 67 -
Figura 33. Puntos donde se examinaron las simulaciones de caudal. Fuente: elaboración propia....	- 69 -
Figura 34. Hidrograma de caudales con 3B42 con respecto a resoluciones espaciales; a) En Mocoa, b) En Piedra Lisa II. Fuente: elaboración propia.	- 70 -
Figura 35. Hidrograma de caudales con IMERG con respecto a resoluciones espaciales; a) En Mocoa, b) En Piedra Lisa II. Fuente: elaboración propia.....	- 71 -
Figura 36. Hidrograma de caudales con 3B42 con respecto a resoluciones temporales; a) En Mocoa, b) En Piedra Lisa II. Fuente: elaboración propia.....	- 72 -
Figura 37. Parámetros del modelo lineal Caudal – Período de Retorno en la Ecuación 6 a 1km; a) pendiente, b) intercepto, c) coeficiente de determinación. Fuente: elaboración propia.....	- 74 -
Figura 38. Parámetros del modelo lineal Caudal – Período de Retorno en la Ecuación 6 a 500m; a) pendiente, b) intercepto, c) coeficiente de determinación. Fuente: elaboración propia.....	- 74 -
Figura 39. Parámetros del modelo lineal Caudal – Período de Retorno en la Ecuación 6 a 100m; a) pendiente, b) intercepto, c) coeficiente de determinación. Fuente: elaboración propia.....	- 75 -
Figura 40. Mapas de período de retorno (izquierda) e inundación (derecha) con 3B42 con diferentes resoluciones espaciales; a) 1km, b) 500m, c) 100m Fuente: elaboración propia.	- 76 -
Figura 41. Mapas de período de retorno (izquierda) e inundación (derecha) con IMERG con diferentes resoluciones espaciales; a) 1km, b) 500m, c) 100m Fuente: elaboración propia.	- 77 -
Figura 42. Mapas de período de retorno (izquierda) e inundación (derecha) con 3B42 a 100m con diferentes resoluciones temporales; a) 3 horas, b) 1 hora, c) 30 minutos. Fuente: elaboración propia.	- 78 -
Figura 43. Barrios y ríos en la cuenca de Mocoa. Fuente: elaboración propia.....	- 79 -
Figura 44. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 1km; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia	- 80 -
Figura 45. Contraste de barrios afectados con datos de IMERG a 1km; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia	- 80 -
Figura 46. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 500m; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia	- 81 -

Figura 47. Contraste de barrios afectados con datos de IMERG a 500m; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia - 81 -
Figura 48. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 100m cada 3 horas; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia..... - 82 -
Figura 49. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 100m cada hora; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia..... - 83 -
Figura 50. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 100m cada 30 minutos; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia..... - 83 -
Figura 51. Contraste de barrios afectados con datos de IMERG a 100m; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia - 84 -

Siglas

CREST: Coupled Routing and Excess Storage

DEM: Digital Elevation Model (Modelo de Elevación Digital)

EF5: Ensemble Framework for Flash Flood Forecasting (Sistema Integrado para Previsión de Inundaciones o Crecidas Repentinas)

FACC: Flow Accumulation (Acumulación de Flujo)

FDIR: Flow Direction (Dirección de Flujo)

FLASH: Flooded Locations and Simulated Hydrographs Project

GPM: Global Precipitation Mission (Misión de Precipitación Global)

HyDROS: Hydrometeorology and Remote Sensing Laboratory (Laboratorio de Hidrometeorología y Teledetección)

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio

JAXA: Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa

OCHA: Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitarios

SIG: Sistema de Información Geográfica

SRTM: Misión Shuttle Radar Topography

TMPA: The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (Análisis de la precipitación multisatelital de TRMM)

TRMM: Tropical Rainfall Measurement Mission (Misión de Medición de Lluvia Tropical)

4. Resumen

En este trabajo se evaluó y describió el impacto que tiene la configuración de resolución espacial y temporal en la habilidad del sistema de modelación hidrológica EF5 y estimaciones de precipitación satelital de los productos 3B42 y IMERG de la NASA para simular la ocurrencia, extensión y severidad del evento de Mocoa en el suroccidente de Colombia en Abril de 2017. El municipio sufrió una de las inundaciones más devastadoras en el país en años recientes, lo cual motivó a la selección de este evento como estudio de caso para este trabajo de investigación. Se emplearon como referencia los datos de 4 estaciones hidrometeorológicas del IDEAM y se utilizaron métricas estadísticas para describir la habilidad de los productos satelitales y de las simulaciones hidrológicas. Se compararon datos de caudal obtenidos con el modelo a diferentes resoluciones y se contrastaron estimaciones de período de retorno de caudal y el mapeo de inundación principalmente con cartografía de los barrios impactados. La conclusión principal es que las simulaciones de eventos extremos son sensibles a la resolución, particularmente la temporal, requiriendo que esta sea alta tanto en las estimaciones de precipitación como en la configuración del modelo hidrológico. De las configuraciones evaluadas, se observó que las simulaciones a 500m con el producto IMERG tuvo la mayor habilidad en describir la ocurrencia, severidad y extensión del evento.

Palabras clave: 3B42, IMERG, EF5, modelación hidrológica, inundaciones.

5. Abstract

This work presented an evaluation and description of the impact that the configuration of spatial and temporal resolution has on the ability of the hydrological modeling system EF5 and satellite-based precipitation estimates from NASA'S 3B42 and IMERG products to simulate occurrence, extent and severity of the event in Mocoa over the southwest region of Colombia in April of 2017. The town suffered one of the most devastating flash floods in the country in recent years, which motivated the selection of this event as case of study for this research work. As reference, data from 4 IDEAM hydrometeorological stations were used and statistical metrics were employed to describe the ability of the satellite-based products and hydrologic simulations. Streamflow data obtained from the model was compared to different resolutions, and streamflow return period and inundation mapping were contrasted with cartography of the impacted neighborhoods. The main conclusion is that simulations of extreme events are sensitive to resolution, particularly its temporal component requiring to be high for both the precipitation estimates and the configuration of the hydrological model. Of all considered configurations, it was observed that the simulations at 500m with IMERG were the ones with better skill in describing the occurrence, severity and extent of the event.

Key words: 3B42, IMERG, EF5, hydrologic modelling, flash floods.

6. Introducción

Los desastres naturales son propensos a ocurrir en cualquier ecosistema a nivel mundial, sin importar si existe intervención humana o no. Por lo tanto, es de gran importancia contar con la tecnología y los sistemas adecuados que puedan caracterizar los procesos y elementos involucrados en éstos. La información satelital y creación de sistemas de predicción son algunos de los métodos modernos de caracterización de desastres naturales; un tipo de desastre natural que puede ser descrito por estos sistemas y posteriormente analizado, son las inundaciones por crecientes súbitas, ocurridas por un evento de precipitación extremo, sumado a ciertos factores (naturales y antrópicos) que contribuyen a él y empeoran sus efectos.

Las inundaciones son un fenómeno hidrometeorológico común y un desafío emergente para muchas comunidades alrededor del mundo, dada la falta de información y de sistemas que existe para su predicción y manejo. Las características del suelo se han alterado con el rápido crecimiento urbano, lo que conlleva a inundaciones más frecuentes y extensas (*Chunlu Lui, 2017*). Adicionalmente, los impactos de las inundaciones se ven incrementados por la variabilidad climática, el manejo no regulado de los ríos para los diferentes usos que se le da y el asentamiento de viviendas en zonas de ronda (*IDIGER, 2018*). Algunos eventos de inundación ocurren lentamente y pueden ser prevenidos, mientras que otros son repentinos y ponen a las personas en riesgo por ser catástrofes no anunciadas (*Carlin, 2009*), esto último está ligado a limitaciones en las cualidades y la disponibilidad de la información en los sistemas de alerta.

Debido a la gran cantidad de información y detalle que son capaces de generar, las estimaciones de precipitación con sensores montados en satélites son una herramienta de gran interés para caracterizar y representar fenómenos hidrometeorológicos extremo, dichas caracterizaciones se pueden realizar a diferentes resoluciones de espacio y tiempo, dependiendo del detalle al que se quiera llegar de un evento o zona específica. En este contexto, el presente trabajo realiza un estudio de la aplicación de un sistema de predicción de crecientes súbitas que usa estimaciones de precipitación medidas desde plataformas satelitales como herramienta en sistemas de alerta temprana. Esta contribución se enmarca en un proyecto de investigación adelantado por la Universidad El Bosque en donde uno de sus objetivos es el implementar dicho sistema para toda Colombia.

Como estudio de caso, se tiene el desastre en el municipio de Mocoa, Putumayo en el 2017 causado por inundaciones y deslizamientos. Las características de escala espacial y temporal de este evento son idóneas para analizar las capacidades y limitaciones del sistema de predicción dadas las restricciones de configuración que implica una implementación a escala nacional. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es evaluar y describir el impacto que tiene la configuración de resolución espacial y temporal en la habilidad de un sistema de predicción basado en información satelital para pronosticar la ocurrencia, extensión y severidad del evento de Mocoa en el 2017 y determinar su utilidad como herramienta de aplicación a escala nacional.

El presente documento describe el desarrollo de la investigación, iniciando así en la primera parte con el planteamiento del problema, la justificación y la definición de los objetivos del trabajo. En segunda instancia se encuentran los marcos de referencia, los cuales contienen toda la información relacionada con el proyecto, desde los antecedentes y estado del arte, hasta un marco teórico, conceptual, geográfico y legal. A partir de estos, el lector puede obtener la información necesaria para entender los componentes y conceptos que trata el trabajo, y familiarizarse con temas como el ciclo hidrológico, la modelación hidrológica y cómo esta puede contribuir a la caracterización y descripción de crecientes súbitas. En la tercera sección se describe el diseño metodológico de la investigación, donde se incluyen los procesos de configuración del modelo hidrológico, la

construcción de mapas en sistemas de información geográfica, y la producción de datos provenientes de paquetes estadísticos. Como cuarta sección se presentan los resultados y discusión, en donde se describen las observaciones y registros que caracterizan el evento de Mocoa en 2017, y la simulación del evento de hidrometeorológico. Se presenta también un análisis sobre distintas configuraciones del sistema de predicción aplicables a escala nacional y cómo estas impactan su habilidad para caracterizar la ocurrencia, extensión y severidad de la inundación. Por último, la sección de conclusiones y recomendaciones destaca los resultados más relevantes del proyecto y las recomendaciones que hay con respecto al uso del sistema de predicción con estimaciones satelitales de precipitación para caracterizar crecientes súbitas a nivel nacional.

7. Planteamiento del problema

La problemática principal de este trabajo investigativo es la predicción de crecientes súbitas con modelos hidrológicos e información satelital en Colombia, aplicado al caso de Mocoa en 2017 por su relevancia y la capacidad que tiene el evento de dar una perspectiva de aplicación de esta tecnología. Se busca investigar especificaciones del sistema que permitan caracterizar el evento de forma satisfactoria a las necesidades de un sistema de alerta temprana de escala nacional. En particular, se desea determinar la resolución espacio-temporal del sistema de predicción que sea viable, eficiente y que funcione de manera adecuada teniendo en cuenta el relieve complejo que tiene Colombia.

Se propone abarcar esta problemática caracterizando la inundación con el uso de información de estaciones hidrometeorológicas y de sensores remotos que miden la precipitación sobre una cuenca planteada alrededor del municipio de Mocoa que cubre los tres ríos implicados en el desastre: Mulato, Sangoyaco y Mocoa, siendo de gran incidencia en el desastre, los dos primeros, por la cantidad de sedimentos que arrastraron contribuyendo a un deslizamiento (Vargas Cuervo, 2017).

Adicionalmente, en Mocoa, ubicada al suroccidente del país, hay problemas ambientales de gran importancia y que deben ser atendidos con urgencia, pero debido al difícil acceso a esta área del país, a su topografía compleja y a su falta de información hidrometeorológica las soluciones a estos quedan simplemente en su planteamiento o en el olvido, como es el caso de las investigaciones que se han hecho acerca de ríos y quebradas que se encuentran en Mocoa en las que se incluyen algunos resultados y conclusiones que podrían contribuir a la mejora en la planeación del territorio y en la prevención de desastres (Romo, 2015; Jojoa, 2003; Guzman & Barrera, 2014), se recalca así, la importancia de implementar un sistema de predicción de crecientes súbitas para contribuir a esta falta de información.

Por estas razones, surgen las siguientes preguntas de investigación a resolver en el proyecto: ¿Cuál es la habilidad y eficiencia del sistema de predicción basado en información satelital para pronosticar la ocurrencia, extensión y severidad del evento de Mocoa, Putumayo en abril del 2017? Y ¿Puede el sistema de predicción basado en información satelital ser útil como sistema de alerta temprana ante un desastre natural en cualquier resolución?

8. Justificación

Con el fin de contribuir a los esfuerzos que el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad El Bosque adelanta en conjunto con La Universidad de Oklahoma utilizando el modelo hidrológico que esta última desarrolló en conjunto con la NASA, para desarrollar tecnología de predicción y cómo esta puede ser aplicada en Colombia considerando sus características geofísicas y las necesidades que la nación posee para la mitigación de desastres; la investigación tiene como una de sus finalidades, comparar resoluciones espacio temporales, para conocer a partir de cuál de ellas el sistema de modelamiento es eficiente en su capacidad de realizar predicciones en tiempo real, ya que una mayor resolución no necesariamente significa una predicción más eficiente, pues influyen muchas variables incluyendo el error y lo que se quiere lograr a nivel general es contribuir a un sistema en tiempo real para toda Colombia, por esta razón es importante construir conocimiento acerca de las posibilidades y limitaciones técnicas de estos sistemas de predicción a través de casos específicos como el de Mocoa.

Si bien el IDEAM publica pronósticos diarios de la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos a nivel nacional, por medio de mapas y descripciones de los departamentos (*Comisión económica para América Latina y el Caribe, 2017*). Las predicciones basadas en estimaciones satelitales pueden dar una visión más amplia y completa del suceso, es decir que la teledetección tiene la capacidad de predecir las crecientes súbitas ocurridas en ríos que pueden desencadenar graves inundaciones, además de que pueden significar un ahorro para el Estado, considerando que las catástrofes más recordadas por los colombianos han dejado pérdidas económicas que ascienden a más de 8,8 billones de dólares desde 1980 (*Semana Sostenible, 2017*).

La investigación se realiza porque las tecnologías mencionadas ofrecen la oportunidad de mejorar los procesos de alerta temprana de amenazas hidrometeorológicas en Colombia. Pero deben entenderse las posibilidades y limitaciones de estas tecnologías con respecto a las necesidades y requerimientos que las características geofísicas del país imponen para la simulación de procesos hidrometeorológicos. En casos como el de Mocoa donde el impacto socioeconómico fue significativo se hace evidente la necesidad y urgencia de explorar la información que pueden generar estas tecnologías y describir el potencial que hay en ellas para complementar los sistemas existentes.

La aplicación del sistema de predicción se puede ver reflejada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales actualmente se usan para caracterizar una muy diversa gama de eventos (no sólo de desastres naturales) y de hecho, el Servicio Geológico Colombiano (*SGC, 2016*) tiene en su geoportal, mapas nacionales de amenazas por movimientos en masa, y Mocoa, se encontraba en alerta roja, además de esto se registra que esta es una de las zonas con estudios hidrogeológicos insuficientes; he ahí la importancia de estudiar esta área y sus posibles amenazas.

Dada la amenaza que tiene Colombia por ser altamente propenso a la acción de eventos severos como deslizamientos, crecientes torrenciales, avalanchas, inundaciones entre otros (*Comisión económica para América Latina y el Caribe, 2017*) incluyendo que según Vargas Cuervo (2017) en el país hay 385 municipios que están en riesgo de inundación como la de Mocoa y por su relieve complejo, en el país se deben hacer estudios más rigurosos de la prevención de desastres con tecnología actual e información pertinente y que realmente alerten a las personas a tiempo para que estas sepan cómo reaccionar ante la situación.

9. Objetivos

General:

Evaluar y describir el impacto que tiene la configuración de resolución espacial y temporal en la habilidad de un sistema de predicción basado en información satelital para simular la ocurrencia, extensión y severidad del evento de Mocoa en el 2017 y determinar su utilidad como herramienta de aplicación a escala nacional.

Específicos:

- Recolectar, procesar y analizar datos de precipitación, caudales, reportes de impacto y mapas que describan la extensión y severidad del evento.
- Configurar e implementar el sistema de modelación de EF5 con TRMM y GPM.
- Evaluar el impacto de la resolución espacial y temporal del sistema de pronóstico hidrológico en la modelación del evento de Mocoa.
- Evaluar la información del modelamiento que es producida con la simulación del evento para establecer la utilidad y habilidad de esta herramienta.

10. Marco de referencia

10.1 Antecedentes

10.1.1 Investigación Conjunta Universidad El Bosque – Universidad de Oklahoma

La Universidad El Bosque en Bogotá tiene una relación estrecha con La Universidad de Oklahoma en Estados Unidos, gracias a los programas de internacionalización con los que ambas cuentan; especialmente existe un fuerte enlace en el programa de ingeniería ambiental, pues en los últimos cinco años han viajado a Norman, Oklahoma, 4 estudiantes con el fin de desarrollar proyectos de investigación que contribuyen a ambas instituciones, por la tecnología utilizada en ellos y los resultados obtenidos.

Los 3 proyectos que se han realizado, han tenido lugar en el laboratorio HyDROS de la Universidad de Oklahoma, el cual se encuentra en el National Weather Center. Las primeras estudiantes realizaron un proyecto titulado Evaluación de la Utilidad de Estimaciones Satelitales de Precipitación para la Modelación de Inundaciones en Sistemas de la Alerta Temprana de Cuencas de Relieve Complejo: Caso de Estudio en la Cuenca del Río Bogotá (Jurado & González, 2013), en el cuál evaluaban el producto satelital de lluvia 3B42RT sobre la cuenca del río Bogotá. En el año 2017, el estudiante Jorge Celis realizó un proyecto sobre la predicción de sequías en Colombia, titulado Evaluación del nivel de mejora en el monitoreo de sequías a escala regional en Colombia, a partir de indicadores ecohidrológicos basados en teledetección (Celis, 2016); y entre 2017 y 2018 se realiza el presente proyecto de la caracterización del desastre de Mocoa con el uso de estimaciones de precipitación satelital a diferentes resoluciones.

10.1.2 Estudio de caso: El Desastre de Mocoa

En Colombia existen cinco áreas hidrográficas asociadas a las principales vertientes del país: Caribe, Magdalena-Cauca, Orinoco, Pacífico y Amazonía. El Instituto Nacional de Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) definió a nivel nacional las áreas inundables con respecto al área de los cuerpos de agua y así, generó mapas que se encuentran en el Sistema de Información Ambiental de Colombia (SIAC) y muestra la gran cantidad de zonas propensas a inundaciones, incluyendo el departamento del Putumayo, en el cual se encuentra el municipio de Mocoa (IDIGER, 2018).

En la madrugada del 1 de abril de 2017, fuertes lluvias provocaron los desbordamientos de los ríos Mocoa, Mulato y Sangoyaco, siendo de mayor incidencia en el desastre, los dos primeros, por la cantidad de sedimentos que arrastraron (Vargas Cuervo, 2017); al ser fuentes fluviales torrenciales, arrastraron a su paso sedimentos, basuras, piedras descomunales y vehículos que provocaron una enorme avalancha que arrasó una gran cantidad de barrios en la capital del Putumayo (Semana Sostenible, 2017).

Debido a la topografía, las características ambientales y de lluvia superficial, todos los ríos que rondan Mocoa son torrenciales y ante eventos atípicos (...) adquieren características violentas, con enormes e instantáneas ganancias de velocidad en los caudales que son capaces de arrastrar material grande y pesado. Según comenta Mejía, algunos de los ríos tienen muy poca capacidad de desalojo, lo que, sumado a la ocupación inadecuada de sus rondas y lechos, agrava la vulnerabilidad de las personas. (Semana Sostenible, 2017)

Según los organismos de socorro fueron 17 los barrios afectados, entre ellos San Miguel (donde se registraron los mayores daños), San Fernando, Independencia, San Agustín y Progreso (El Tiempo, 2017). La situación fue tan crítica que el Gobierno Nacional declaró a la ciudad en estado de calamidad pública, como evidencia se muestra a continuación en la *Figura 1* una fotografía de BBC Mundo de la Tragedia de Mocoa.



Figura 1. Fotografía de la Tragedia de Mocoa. Fuente: (BBC Mundo, 2017)

El desastre de Mocoa, fue de gran importancia para Colombia, pues hace mucho tiempo no había un evento de tal magnitud, y que dejara una cantidad de muertos tan grande como lo hizo; precisamente, fueron 316 muertos, 332 heridos y 103 desaparecidos. (Semana Sostenible, 2017) Sumado a esto, según (Ana Campos G., 2012), los mayores porcentajes de pérdidas de vidas y viviendas destruidas para el período 1970-2011 corresponden a los deslizamientos y las inundaciones es decir que este tipo de desastre natural es de relevancia para el país, por todos los daños y pérdidas socioeconómicas que genera.

Las causas del desastre fueron tanto naturales como antrópicas; naturales porque la inundación ocurrió ya que en un solo día llovió el 45% de lo que llueve normalmente en ese mes, el día del evento llovieron 129 milímetros de agua y sólo entre las diez de la noche y la una de la mañana, se registraron 106 milímetros, es decir, el 80% de lo que llovió en todo el día este es el pico clave de 3 horas de la madrugada en que la lluvia fue muy intensa, y esta tiene un período de retorno de aproximadamente 25 años. Significa que cada 25 años hay una alta probabilidad de que se presente un evento como el que sucedió el 1 de abril en Mocoa (Euscátegui, 2017). Y antrópicas porque una de las causas para el deslizamiento fue la deforestación que se ha dado sobre la zona montañosa del municipio que permitió que se deslizaran grandes cantidades de tierra y grandes rocas arrastrando así todo lo que encontraban a su paso; se debe tener en consideración que Putumayo es el quinto departamento del país con más pérdida de capa vegetal. 9.000 hectáreas habían sido deforestadas a 2015 (Semana Sostenible, 2017). Adicional a esto, en el municipio había un uso inadecuado del suelo, las autoridades locales no habían (ni han) actualizado el Plan de Ordenamiento Territorial y por la pérdida de cobertura vegetal, la tierra está compuesta en gran parte por ceniza volcánica, lo que produce un lodo potencialmente devastador (Euscátegui, 2017).

Las lluvias de alta intensidad y duración, ahora frecuentadas por la variabilidad climática, produjeron un arrastre importante de grandes bloques de roca -de entre 1 y 3 metros de diámetro- presente en los cauces de los ríos Mulato y Sangoyaco. Germán Vargas Cuervo, profesor del Departamento de Geografía de la Universidad Nacional de Colombia (U.N.) dice que en la parte alta de la cuenca del

río Mocoa, los ríos Mulato y Sangoyaco ubicadas a menos de 30km de la población, produjeron deslizamientos que contribuyeron a este proceso, lo que se demuestra con la presencia de restos de árboles en el trayecto de la avenida torrencial (Vargas Cuervo, 2017).

10.2 Estado del Arte

Para revisar los antecedentes en cuanto a caracterización de inundaciones y otros desastres se refiere, se realizó una búsqueda de artículos a nivel de situaciones tanto nacionales como internacionales que fueran capaces de describir similitudes con el proyecto propuesto para caracterizar el evento de Mocoa, es decir, utilizar información satelital, predicciones basadas en estimaciones satelitales, sistemas de información geográfica y programas de modelamiento para poder describir desastres naturales y cómo estos sistemas ayudan a entender estos desastres desde un punto de vista tecnológico e innovador.

Se estudia pues, un artículo obtenido de un libro de Teledetección Hidrológica (Hong, Zhang, & Khan, 2017), en el que Jurado, y otros (2017) mencionan las deficiencias de los sistemas de alerta temprana en Colombia: 1) la falta de consistencia de la información, 2) una base de datos relativamente limitada, 3) insuficiente información en más del 40% del territorio (particularmente Orinoquía y Amazonía), respalda la necesidad que tiene el país de explorar plataformas con información satelital, específicamente con el uso de sensores remotos, indica cómo las actuales estimaciones de precipitación basado en información satelital es una importante ventaja para las aplicaciones hidrometeorológicas, especialmente en áreas escasamente pobladas y regiones no evaluadas, redacta sobre las inundaciones en Colombia, y los sistemas de alerta temprana, y realiza una modelación hidrológica con información satelital para la cuenca del Río Bogotá, que contiene gráficas y mapas que posteriormente se podrán comparar con las obtenidas en este proyecto.

Un estudio de validación de estimaciones satelitales de precipitación se realizó por Dinku, Ruiz, Connor, & Ceccato (2010) en el cual se observa el desempeño de diferentes productos satelitales en comparación a los registros de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, en Colombia. Se estudiaron seis diferentes productos satelitales y se considera que tuvieron un buen desempeño teniendo en cuenta el relieve complejo que tiene el país; los mejores resultados se obtuvieron para las planicies del este del país, sobre el Orinoco y la Amazonía, mientras que los peores fueron sobre la costa pacífica.

Saira Romo (2015) utilizó un proceso metodológico apoyado en el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar y zonificar áreas de amenaza por inundación en la ribera del río Mulato, además de hacer una modelación hidrológica con la herramienta HEC-RAS del río Mulato para contribuir a su objetivo de estimar los escenarios de amenaza por inundación en el Río Mulato, a través de los SIG y para apoyar el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) de este municipio, hace uso de ArcGis para definir el área susceptible a inundaciones aplicando el modelamiento, utiliza herramientas de los SIG para determinar el grado de vulnerabilidad de elementos expuestos a la amenaza por inundación, valoradas cualitativa y cuantitativamente; además de esto, tiene información relevante para comparar más adelante en el análisis de resultados en tema del período de retorno del caudal del río Mulato.

Según Jojoa (2003), en una descripción detallada del área del municipio de Mocoa incluyendo la geología, los aspectos climáticos, la geomorfología, el uso del suelo, entre otros, presenta una sección de análisis de amenazas específicamente por inundación en las cuencas de las quebradas Taruca y Sangoyaco, con un mapa del área urbana, suburbana y rural de Mocoa en el que se analiza la amenaza y vulnerabilidad de estas quebradas en el municipio, además cuenta con una gráfica de precipitación

máxima entre 1971 y 2002. En este ámbito, resaltan también Guzmán & Barrera (2014) con su artículo: Metodología para la microzonificación de riesgos frente a amenazas naturales: caso de estudio deslizamientos e inundaciones municipio de Mocoa departamento del Putumayo, en el cual se describen escenarios de riesgo asociados con fenómenos de origen hidrometeorológico, en Mocoa y hay descripción del escenario de riesgo hidrometeorológico.

El libro *Sistemas de Información Geográfica para el manejo de desastres*, del autor Brian Tomaszewski que principalmente hace descripción de los sistemas de información geográfica, el por qué hay necesidad de utilizar estos SIG para el manejo de desastres y el rol que estos sistemas tienen en el ciclo de un desastre, la planeación y preparación que se debe tener ante los desastres, cómo representar mapas, coordinar sistemas y analizar datos e información en estos mapas que describan ya sea geografía y usos del suelo o un desastre natural específico por medio de imágenes (Tomaszewski, 2015), además de contener casos de estudio en países en desarrollo, los fundamentos de la información geográfica y los mapas, descripción a detalle de los SIG (Programación con SIG, modelamiento, cartografía, geocódigos, limitaciones de los SIG), de ArcGIS y QGIS, los SIG para la respuesta, recuperación y mitigación ante desastres, entre otros temas.

Entrando ahora al ámbito internacional, en Irán se realizó el llamado: *Planeación ambiental para el manejo de desastres usando los SIG* (un caso de estudio para una inundación en Mazandaran); este artículo es importante porque habla de las oportunidades tan innovadoras que ofrece la información georreferenciada e indica como la información geo espacial es clave para el desarrollo sostenible. Trata sobre las fuentes de las que se pueden obtener información siendo estas imágenes satelitales, mapas topográficos, fotos aéreas, y datos de los SIG, por ende, describen principalmente cómo los SIG ayudaron para el caso de Mazandaran a reducir los impactos que generó la inundación y tener una mejor planeación del territorio (Gharagozlu, 2012).

En el 2014 se publicó: *Efectos de la Resolución de Estimados de Precipitación Basados en Satélites en la Habilidad de la Modelación Hidrológica a diferentes escalas* (Vergara, y otros, 2014), un artículo que trata el tema de la falta de certeza debido a la resolución de los actuales productos de precipitación satelitales como una importante fuente de error en las aplicaciones de modelamiento hidrológico, aplica a un estudio de caso en Carolina del Norte, Estados Unidos. Es así como se analiza un método para tratar esa inquietud de las resoluciones y evaluar adecuadamente el producto de precipitación satelital. También se comparan dos diferentes resoluciones espacio-temporales para precipitación satelital y como esta es utilizada en la modelación hidrológica.

En la República de Namibia se hizo *Modelamiento Hidrológico y Capacidad de Creación* (Clark, y otros, 2017), el cual utiliza un modelo hidrológico adaptable para la previsión de inundaciones a diferentes escalas en esta República y hace una explicación del modelo EF5 (Ensemble Framework for Flash Flood Forecasting), el cual es el mismo modelo a utilizar en este proyecto.

En un artículo sobre la metodología para la simulación hidrológica de eventos extremos máximos en ausencia de datos hidrométricos a escala horaria, se indica que para enfrentar el fenómeno de las inundaciones resulta imprescindible realizar análisis hidrológicos a escalas de tiempo pequeñas, en muchos de los casos a escala horaria. Esto dificulta los estudios, debido a la necesidad de contar con mediciones de gastos que satisfagan esta condición, y por eso los investigadores proponen una metodología para enfrentar situaciones de este tipo, basados en cuencas cubanas de máxima prioridad nacional. Algunas conclusiones del trabajo que fueron relevantes son: Los estudios hidrológicos apoyados en las herramientas informáticas actuales brindan muchas posibilidades, entre las que se pueden citar la visualización y el análisis de los datos. La carencia de datos de lluvia a escala horaria, obliga a crear diferentes variantes para el análisis de la respuesta hidrológica de la cuenca ante

diferentes escenarios, así mismo la información del tipo y uso del suelo es de vital importancia en el estudio hidrológico. La creación de varios escenarios permite evaluar la cuenca ante diferentes situaciones que se pueden presentar en la realidad, lográndose conocer el comportamiento de los caudales máximos y los hidrogramas de las avenidas en las zonas vulnerables a las inundaciones (Rodríguez, 2010). Este tipo de trabajos es de gran utilidad para comparar con el que se propone pues trata específicamente el tema de las inundaciones y como en ella influyen los caudales, las lluvias y otros elementos.

En un estudio realizado en la Universidad de la Frontera en Chile y el Centro del Clima y la Resiliencia (CR2) de Chile (Zambrano, 2015), el autor hace una comparación punto-a-pixel entre datos de la misión satelital TRMM con datos de la Dirección General de Aguas de Chile, mostrando una buena correlación entre los datos de la estación en tierra y los datos satelitales, un dato muy positivo e importante a tener en cuenta para el desarrollo de esta investigación.

Por último en un ámbito más general en los desastres, la Universidad de Puerto Rico tiene un artículo del Uso de la tecnología en el estudio de la vulnerabilidad de los desastres naturales, identificando como problemática principal todos los eventos a los que está sujeto este país por localizarse en el Caribe, en el trabajo, se dedican a examinar las inundaciones, los huracanes y las tormentas, por ser los eventos que se presentan con mayor frecuencia y a los que mayor atención se debería prestar en la elaboración de un plan de emergencias que haga uso de herramientas como Sistemas de Información Geográfica. Como uno de sus propósitos principales tienen integrar el uso de la tecnología de satélite en la identificación de comunidades vulnerables a eventos naturales para poder prevenir y mitigar los mismos (SIG) (Quiñones & Elias, 2012)

Todos esta es información relevante y pertinente al proyecto pues se relaciona directamente con los temas de inundación, especialmente con las cuencas que estudian el caso específico para el municipio de Mocoa, pues son de gran importancia ya que respaldan la justificación de este proyecto y la necesidad que existe de trabajar en casos como este para ayudar a una comunidad en específico.

10.3 Marco conceptual

Existen conceptos clave para la comprensión y abordaje del proyecto en su totalidad; de este modo, se tratan a continuación los que se consideran más importantes: una imagen satelital es una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a estación terrena donde se procesan y se convierten en imágenes, enriqueciendo nuestro conocimiento de las características de la Tierra en diferentes escalas espaciales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México, 2017).

Las imágenes satelitales pueden ser vistas en un computador con un visualizador de imágenes, o bien, pueden ser montadas en un sistema de información geográfica (SIG) para georreferenciarlas y describirlas más apropiadamente, en este contexto, un SIG es un conjunto de herramientas que permiten realizar operaciones de forma eficiente, relacionando diferentes componentes (usuarios, hardware, software, procesos), logrando la organización, integración, almacenamiento, manipulación y análisis de grandes cantidades de datos espaciales y facilitando a los usuarios la creación de consultas interactivas, examinando la información espacial, editando datos, mapas y presentando resultados de todas estas operaciones. (Unidad Administrativa Especial del Catastro Digital, s.f.)

La modelación o modelamiento es una parte muy importante del proyecto junto con la simulación, la primera hace referencia a la metodología usada para representar o describir de forma gráfica, conceptual o matemática, un determinado sistema y los procesos que ocurren en este; y la simulación

es la aplicación de un determinado modelo para describir un comportamiento específico de un sistema de interés (Vergara, 2018). Como ejemplo se realizan simulaciones de caudales con el modelo hidrológico EF5 para describir la dinámica lluvia-escorrentía en la cuenca de Mocoa. La teledetección es una técnica por medio de la cual se obtiene información útil de un objeto, área o fenómeno, a través del análisis e interpretación de datos e imágenes adquiridas por un equipo que no está en contacto físico con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (IGAC & CIAT, 2007). La teledetección es el método de obtención de la precipitación satelital.

En términos más aplicados hacia el estudio de caso de la inundación de Mocoa, se abarcan temas como, un desastre natural que es cualquier evento catastrófico causado por la naturaleza o los procesos naturales de la tierra. La gravedad de un desastre se mide en pérdidas de vidas, pérdidas económicas, y la capacidad de la población para la reconstrucción (Centro Nacional de Apoyo para Contingencias Epidemiológicas y Desastres de México, 2017). Una amenaza hidrometeorológica, se relaciona con los peligros hidrometeorológicos son causados por eventos climáticos y meteorológicos extremos, tales como inundaciones, sequías, huracanes, tornados o deslizamientos. Son responsables por una fracción muy grande de desastres naturales y ocurren en todas las regiones del mundo, a pesar de que pueda variar la vulnerabilidad social, frecuencia e intensidad de ciertas amenazas entre diferentes regiones. Tormentas severas, fuertes vientos, inundaciones y sequías se desarrollan a diferentes escalas espacio temporales, pero todos se pueden convertir en desastres que causen daño significativo estructural o tomar múltiples vidas a nivel mundial anualmente (Wu, Huang, Tang, Kirschbaum, & Ward, 2016). Por esta combinación de fenómenos son estos considerados como una amenaza hidrometeorológica.

Es importante conocer que los procesos del ciclo hidrológico pueden ser intervenidos en cualquier momento por diferentes fenómenos y por ende causar amenazas que pueden terminar en graves desastres y catástrofes naturales, por ejemplo, inundaciones. Acerca de ellas se debe tener un claro conocimiento para realizar las caracterizaciones y estudios pertinentes en cuanto a estas.

Las inundaciones ocurren cuando el agua invade en tierra que usualmente está seca. Estas pueden surgir directamente de una precipitación atmosférica o de eventos que causan que la precipitación que cayó, inunde tierra seca. Las inundaciones son una amenaza que ocurre mundialmente y tiene impactos sociales muy grandes. Conforme las personas invaden regiones propensas a inundaciones y hay procesos de urbanización, se convierten más y más vulnerables a los daños por estas (Doswell, 2015).

Muchos factores hidrológicos tienen relevancia en la ocurrencia de una inundación repentina: gradientes de terreno, tipo del suelo, cobertura vegetal, habitación humana, etc. En terrenos escarpados, rocosos o regiones muy urbanizadas, hasta una relativa pequeña lluvia puede provocar inundaciones repentinas. Estos factores hidrológicos determinan la respuesta de la cuenca ante una precipitación. Por tanto, una inundación es el resultado de la concatenación de circunstancias meteorológicas e hidrológicas (Doswell, 2015). Como se puede evidenciar, para el estudio de caso de Mocoa, la inundación de tres ríos allí ocurrida, fue producto de factores como los mencionados anteriormente y por su importancia social a nivel nacional, es de gran importancia su estudio y caracterización.

Para atender este tipo de situaciones, se tiene la gestión del riesgo de desastres, que es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo y para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y al desarrollo sostenible (UNGRD, 2015). Un tipo de gestión de riesgo es por inundaciones, es decir en donde haya amenaza de algún tipo, a

causa de una creciente súbita de un río o quebrada, usualmente por un evento de precipitación extremo. La reducción del riesgo de desastres es muy importante ya que dependiendo de las decisiones tomadas tanto por las autoridades como por la comunidad y las actividades que se hagan con respecto a ello, se pueden evitar desastres muy graves. Es por ello que existen métodos para realizar gestiones del riesgo como el Marco de Acción de Hyogo el cual se enfoca en reducir las pérdidas ocasionadas por desastres ambientales, por medio de técnicas como los sistemas de alerta temprana (Jurado & González, 2013).

Los sistemas de alerta temprana son un conjunto de procedimientos e instrumentos, a través de los cuales se monitorea una amenaza o evento adverso (natural o antrópico) de carácter previsible, se recolectan y procesan datos e información, ofreciendo pronósticos o predicciones temporales sobre su acción y posibles efectos. Millones de personas en todo el mundo salvan sus vidas y sus medios de subsistencia gracias a la implementación de estos sistemas (UNESCO, 2011). Los sistemas de alerta deben diferenciarse de los sistemas de predicción pues estos últimos se basan en variables para predecir desastres, que no necesariamente implica alertar a la comunidad o a las autoridades acerca de él. Los sistemas contribuyen a la mitigación de desastres, esta es un conjunto de actividades encaminadas a la reducción de riesgos de una amenaza con el fin de minimizar los impactos negativos; en términos de inundaciones se pueden tomar medidas estructurales que son aquellas que involucran la construcción de infraestructura con el fin de evitar o disminuir los impactos de las inundaciones, o medidas no estructurales que hacen referencia a las acciones que involucran advertencia, planeamiento o políticas creadas para un territorio que presente vulnerabilidad a algún riesgo natural, por ejemplo los sistemas de alerta temprana, pruebas de inundación y mecanismos de alerta de inundaciones (Bedient, Huber, & Vieux, 2008).

10.4 Marco teórico

10.4.1 Ciclo hidrológico

Hay ciclos de diferentes elementos de la naturaleza ocurriendo entre la atmósfera y el suelo constantemente, y aquel que es de importancia para este trabajo, es el relacionado con el agua. El ciclo hidrológico está basado en el permanente movimiento o transferencia de masas de agua, ya sea de un punto del planeta al otro, o entre los tres diferentes estados que tiene el agua (líquido, sólido y gaseoso). Su importancia recae en que se encarga de regular y gestionar una de las necesidades básicas de los seres vivos (Ordoñez, 2011).

El ciclo hidrológico, es un modelo conceptual que describe el almacenamiento y movimiento del agua en el Sistema Climático, es decir entre la Biosfera, Atmósfera, Litosfera e Hidrosfera. El agua de la tierra está ubicada en los diferentes reservorios hídricos presentes en toda su extensión (océanos, lagos, ríos, aguas subterráneas, etc.). El agua en nuestra atmósfera, se mueve desde un depósito o reservorio a otro, a través de los diferentes procesos que se observan en la *Figura 2*; entre ellos están la Precipitación, Infiltración, Escorrentía, Flujo de agua subterránea, Evaporación, Evapotranspiración, Sublimación, Condensación

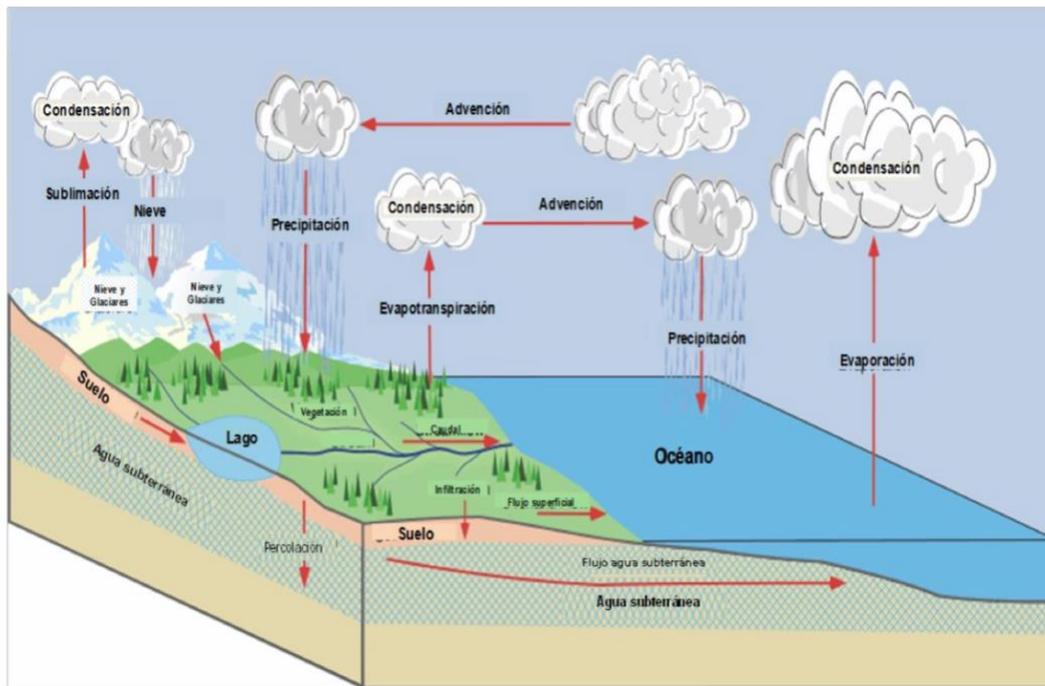


Figura 2. Ciclo Hidrológico. Fuente: (Ordoñez, 2011)

Los océanos suministran la mayor parte del agua como producto de la evaporación. De dicha agua evaporada, el 9% se transporta a las zonas continentales donde los factores climatológicos inducen la formación de la precipitación, y el 91% es devuelto a las corrientes oceánicas por medio de este proceso también. El desequilibrio entre la tasa de evaporación y precipitación, sobre la tierra y el océano, se corrige por la escorrentía y el flujo de agua hacia los océanos (Ordoñez, 2011).

El Ciclo Hidrológico es la sucesión de etapas que atraviesa el agua al pasar de la tierra a la atmósfera y volver a la tierra: evaporación desde el mar, suelo o aguas continentales, la condensación de nubes, precipitación, acumulación en las masas de agua o el suelo y su evaporación nuevamente. El ciclo involucra un proceso de transporte re circulatorio e indefinido; su movimiento indefinido se debe a dos causas principales: la primera es el sol, que proporciona la energía necesaria para elevar el agua y llevar a cabo el proceso de evaporación, y la segunda es la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada de precipite y que haya escurrimiento (Ordoñez, 2011).

10.4.1.1 Precipitación

Según Musy (2011) citado por (Ordoñez, 2011), la precipitación es toda agua que cae en la superficie de la tierra, de forma líquida (lluvia, llovizna, etc.), sólida (nieve, granizo, etc.) y las precipitaciones ocultas (rocío, heladas, etc.). La precipitación constituye la única entrada principal al sistema hidrológico continental. Para la formación de precipitación se requiere la condensación del vapor de agua atmosférico.

Existen diferentes tipos de precipitación: convectiva, orográfica y frontal. La convectiva resulta de una subida rápida de las masas del aire en la atmósfera; la precipitación que resulta de este proceso es generalmente tempestuosa, de cortos períodos de tiempo, intensa y de poca extensión espacial. La orográfica se relaciona con la presencia de una barrera topográfica, como una montaña; su característica depende de la altitud, de la pendiente, de su orientación, y de la distancia que separa el origen de la masa de aire caliente del sitio de levantamiento, en general son de intensidad y frecuencia regular. La precipitación frontal se asocia a las superficies de contacto entre la temperatura de la masa

de aire (caliente y fría), de la humedad, el gradiente térmico vertical y de los diversos índices del recorrido, denominados Frentes; los frentes fríos crean precipitaciones cortas e intensas, mientras que los calientes generan precipitaciones de larga duración pero no de mucha intensidad (Ordoñez, 2011).

10.4.1.2 Mediciones de precipitación

Es necesario cuantificar las variables del ciclo hidrológico, para el caso de esta investigación, es particularmente importante la cuantificación de la precipitación. Para ella se ha desarrollado una gran variedad de instrumentos y técnicas para obtener la información en tierra. Los instrumentos para medir la cantidad y la intensidad son los más importantes. Dentro de los instrumentos se tienen los de observación directa, registradores, acumuladores y automáticos cuya función es registrar en forma continua las actividades pluviométricas y su transmisión directa a la zona de interés para sus correspondientes análisis (Ordoñez, 2011). En Colombia, el IDEAM cuenta con una red de estaciones hidrológicas y meteorológicas que se encargan de proveer los datos de precipitación y caudales (entre otros tipos de datos).

10.4.2 Estimaciones satelitales de precipitación

Las estimaciones satelitales de precipitación han aparecido para tratar de superar muchas de las limitaciones que tienen las mediciones in situ. Varias estimaciones de este tipo se han vuelto operacionales en años recientes, con cobertura casi global y de relativamente alta resolución tanto espacial como temporal (Zambrano, 2015). La resolución espacial es la información del área de cobertura que tiene el producto satelital por pixel, y la resolución temporal es la frecuencia temporal con la que la información de la precipitación se actualiza (Jurado & González, 2013). En general las estimaciones satelitales obtienen su información desde diversos satélites: de “órbita baja” (LEO por sus siglas en inglés) que está entre los 160km y 2000km de altura y recopila los datos en el espectro de microondas, y de órbita geoestacionaria (GEO por sus siglas en inglés) que se ubican a 35.738km de la superficie terrestre y sus datos provienen de los espectros visible e infrarrojo (Zambrano, 2015).

Los satélites LEO son de información directa y precisa sobre las nubes con lluvia, tienen baja frecuencia de muestreo y cobertura espacial de carácter local. Los satélites GEO son de información indirecta sobre lluvia superficial, generan observaciones frecuentes (15-60 minutos) y son de cobertura global (entre 60°N y 60°S) (Zambrano, 2015).

10.4.2.1 Precipitación satelital TRMM

La Misión de Medición de Lluvia Tropical (en inglés The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)), es una misión conjunta entre la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio (NASA por sus siglas en inglés) y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA), lanzada al espacio en 1997 para estudiar la precipitación para investigaciones del tiempo y el clima. TRMM fue un satélite de investigación diseñado para mejorar nuestra comprensión de la distribución y variabilidad de la precipitación en los trópicos como parte del ciclo hidrológico en el actual sistema climático (NASA, 2015). La resolución espacial de TRMM es de 25km y su resolución temporal es de 3 horas, y sus productos o data sets son 3B42/3B43 y 3B40RT/3B41RT/3B42RT (RT por estar en tiempo real)

Los instrumentos que componen el satélite de TRMM son: un sensor de microondas pasivo que cuantifica vapor de agua, agua en las nubes y la intensidad de lluvia, un radar de precipitación que proporciona datos de intensidad, distribución y tipo de lluvia, un scanner visible y de infrarrojo, un

sensor de energía radiante de la tierra y las nubes y un sensor de rayos (Zambrano, 2015). Este satélite, llegó al fin de su vida útil en abril de 2015, sin embargo, el sistema encargado de revelar sus productos, cómo 3B42RT sigue en funcionamiento hasta que la misión que lo reemplazó, sea completamente satisfactoria (NASA, 2015).

10.4.2.2 Precipitación satelital GPM

Con el fin de TRMM, llegó La Medición Global de Precipitación (en inglés Global Precipitation Measurement Mission (GPM)) es una misión satelital internacional para proveer la siguiente generación de observaciones de lluvia y nieve a nivel mundial. La NASA y la JAXA lanzaron el Satélite de Observación Central en febrero del 2014, ilustrado en la *Figura 3*, cargando avanzados instrumentos que marcan un nuevo estándar para las mediciones de precipitación desde el espacio. Los datos que provee son usados para unificar las mediciones de precipitación hechas por una red internacional de satélites asociados para cuantificar cuándo, dónde y cuánto llueve o nieva alrededor del mundo. La misión GPM contribuye al avance de nuestro entendimiento de los ciclos de agua y energía de la tierra, mejora el pronóstico de eventos extremos que causan desastres naturales y extiende las posibilidades de usar información de precipitación satelital para beneficiar directamente a la sociedad (NASA, 2017). A diferencia de TRMM, la resolución espacial de GPM es de 10km y la temporal es de 30 minutos, sus productos son 3IMERGHH/3IMERGM, 3IMERGL y 3IMERGE, estos dos últimos son cercanos a tiempo real. El satélite GPM vuela a una altitud de 407km de la tierra y la cubre de 65°N a 65°S (NASA, 2017).

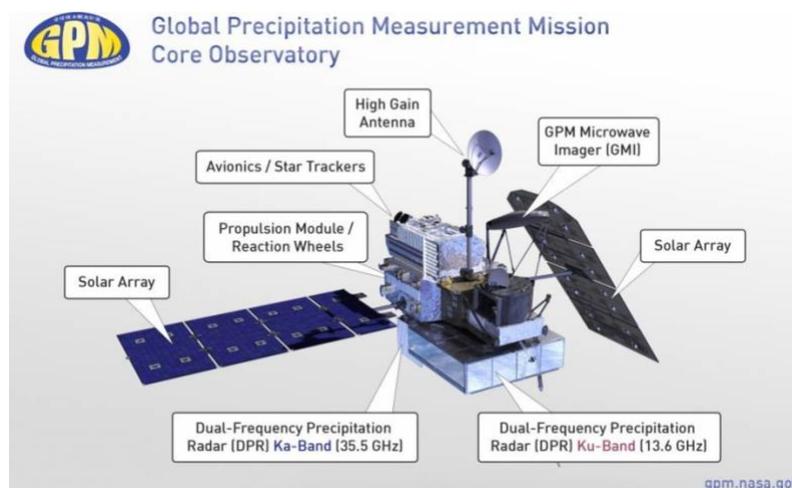


Figura 3. Satélite GPM y sus componentes. Fuente: (NASA, 2017)

10.4.3 Modelación Hidrológica

Según Sharma, Sorooshian, & Wheeler (2008), un modelo es una representación simplificada de un sistema del mundo real. El mejor modelo es aquel que provee resultados cercanos a la realidad con el menor uso de parámetros y complejidad de modelos. Los modelos son usados principalmente para el comportamiento de sistemas de predicción y el entendimiento de varios procesos hidrológicos. Los dos más importantes datos de entrada para todos los modelos son la precipitación y área de drenaje; junto con estos, características de la cuenca como propiedades del suelo, cobertura vegetal, topografía, características del agua subterránea, entre otras cosas son consideradas. Los modelos hidrológicos son considerados importantes hoy en día como una herramienta necesaria para el manejo del agua y recursos ambientales (Ganasri, Gayathri, & Dwarakish, 2015).

10.4.3.1 Modelo hidrológico

Los modelos son una representación simplificada de un sistema real complejo llamado prototipo, bajo forma física o matemática. De manera matemática, el sistema real está representado por una expresión analítica. En un modelo hidrológico, el sistema físico real que se representa generalmente es la 'cuenca hidrográfica' y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera un modelo matemático ayudará a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener conocimiento de entradas (inputs) al sistema y salidas (outputs) a partir del sistema, para verificar si el modelo es representativo del prototipo (IDEAM, 2014).

Se observa en la *Figura 4*, una representación de un modelo hidrológico; hay un Sistema Real que es aquel que existe realmente, la cuenca por ejemplo. Para este sistema, existen 3 modelos que en conjunto forman el hidrológico; el conceptual que cómo su nombre lo dice es el que conceptualiza el sistema real, de manera que se pueda dividir en diferentes partes para facilitar su entendimiento, el matemático que son las fórmulas y algoritmos necesarios que van a alimentar al modelo computacional, que es finalmente el que va a representar el sistema. La salida de los modelos hidrológicos varía dependiendo de las metas y objetivos del modelo. Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escurrimiento, mientras que otros están diseñados para ver a las tormentas individuales. El resultado más común es el hidrograma (IDEAM, 2014).

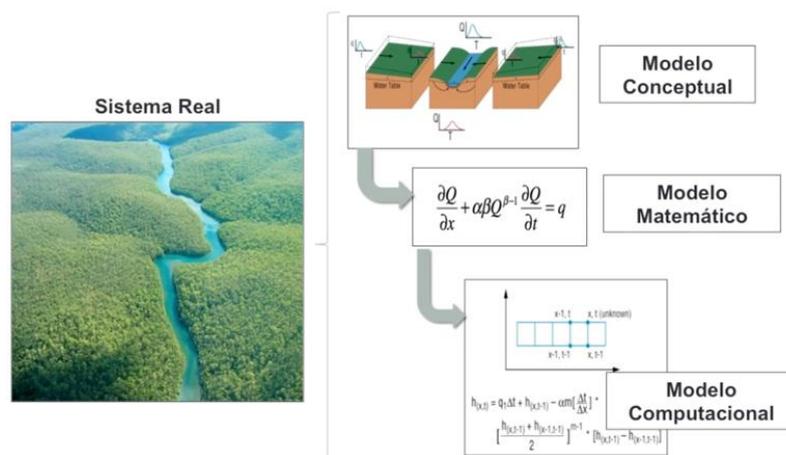


Figura 4. Modelo hidrológico. Fuente: (Vergara, 2018)

Los modelos matemáticos tienen diferentes tipos de clasificación, según la caracterización que el modelador haya adaptado o asignado para el modelo. Algunas dimensiones que estos pueden poseer son de tipo espacial por las características espaciales dentro del modelo, temporal por las características temporales dentro del modelo, aspectos del modelo son los parámetros del modelo, realización de la variable son la cantidad de datos de entrada del modelo, lineabilidad se refiere a la complejidad del sistema, autonomía se refiere a la relación del modelo con la variable del tiempo y continuidad que es la formulación matemática del modelo (Vergara, 2018; Jurado & González, 2013).

Existen diferentes formas de clasificar los modelos, para hacer más específica la funcionalidad del modelo. En la *Tabla 1* se muestran los diferentes criterios y categorías derivadas de los mismos.

Tabla 1. Características de las dimensiones de modelos matemáticos

Clasificación de Modelos	Dimensiones del Modelo
--------------------------	------------------------

Temporal	Dinámico: Considera el comportamiento del sistema con respecto al tiempo. Estático: No considera el sistema con respecto al tiempo.
Espacial	Distribuido (3D-2D): Se considera la variación de sus componentes con respecto al espacio. No Distribuido (1D): Asumen valores promediados en espacio para cada variable en el modelo.
Base Estructural	Físicos: Resuelven ecuaciones basadas en leyes de la física con relación a los aspectos teóricos del sistema a modelar. Empíricos: Son construidos a partir de datos observados.
Variable de interés	Determinista: La variable dependiente resulta de una única realización del modelo. Estocástico o Probabilístico: Utilizan múltiples realizaciones del modelo para estimar la variable de interés usando probabilidad.
Linealidad	Lineal: Predice el valor de una variable a través de otras. No lineal: Requiere del uso de métodos numéricos para obtener aproximaciones de su solución.
Autonomía	Autónomo: La estructura del modelo (ecuaciones) no cambia con respecto al tiempo. No autónomo: La estructura del modelo si cambia con respecto al tiempo.
Continuidad	Continuo: Las ecuaciones del modelo son formuladas en su forma original o natural. Discreto: Reformula las ecuaciones originales.

Fuente: (Vergara, 2018) Adaptada de: (Jurado & González, 2013).

10.4.3.2. Costo computacional

Dentro de la modelación hidrológica, es de gran importancia considerar el costo computacional que requieren cada una de las simulaciones que son realizadas, ya que elevar la resolución de terreno y por ende la precisión, se eleva el costo computacional especialmente en cuestiones de tiempo, además, es un factor a considerar al momento de realizar un sistema de predicción nacional en tiempo real. Una resolución gruesa puede ser eficiente en términos de tiempo, ya que tiene una menor cantidad de datos y por ende es más rápida, pero dada esa resolución, se pueden llegar a omitir datos importantes de diferenciación de un área compleja, mientras que una resolución fina puede ser muy específica en sus delimitaciones y características del terreno, pero toma un tiempo mayor.

En la *Figura 5* se muestran aproximaciones de la realidad geográfica de un área que tiene 1km² de extensión. Dicha área se puede representar en 1 píxel de resolución espacial de 1km, en 4 píxeles de resolución de 500m o en 100 píxeles de resolución de 100m. Esta área, por ejemplo, tiene un río además de diferentes capas de cobertura vegetal, y dependiendo de la resolución espacial, las características que se le determinen al píxel (o los píxeles) va a ser diferente. Al tener mayor resolución, hay mayor detalle y por ende el costo computacional se eleva conforme a esta y con esto, se eleva también el tiempo que requiere una simulación.



Figura 5. Costo computacional de las simulaciones. Fuente: elaboración propia

10.4.3.3. Sistema de modelamiento hidrológico EF5

El Sistema Integrado Para Previsión de Inundaciones o Crecidas Repentinas (EF5 por sus siglas en inglés) es un programa basado en C++ para conducir investigaciones y simulaciones hidrológicas distribuidas operacionales. Fue diseñado en el laboratorio de Hidrometeorología y Teledetección (HyDROS) de La Universidad de Oklahoma en Estados Unidos en conjunto con la NASA. EF5 contiene dos componentes principales de balance hídrico y dos métodos de enrutamiento que pueden ser mezclados y emparejados. Los componentes del balance hídrico se basan en el modelo hidrológico distribuido CREST (Coupled Routing and Excess Storage) y el modelo hidrológico SAC-SMA. Un diagrama del sistema de modelamiento EF5 se presenta en la Figura 6. El modelo hidrológico EF5 es el modelo implementado para todas las simulaciones realizadas en el proyecto sobre la cuenca de Mocoa.

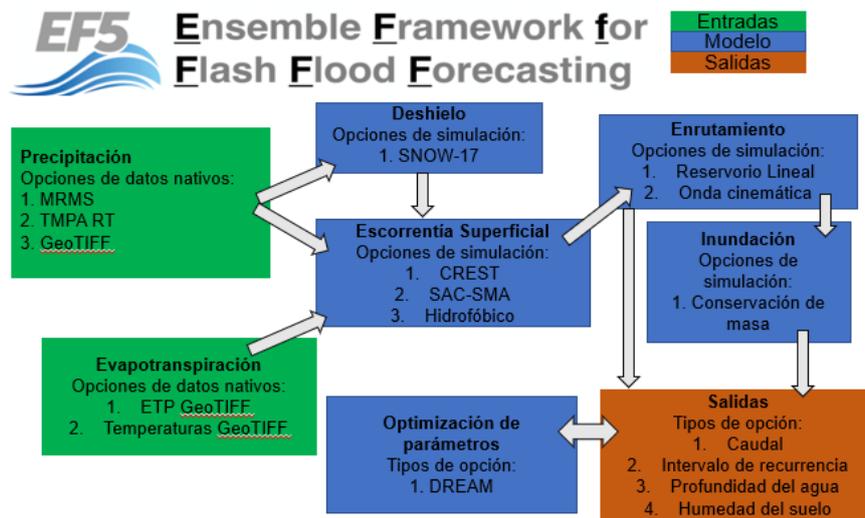


Figura 6. Sistema de modelamiento hidrológico EF5. Adaptado de (The University of Oklahoma, 2018)

10.4.4 Modelos de predicción de inundaciones

Las inundaciones repentinas al ser tan catastróficas y peligrosas, requieren de modelos y sistemas que puedan tratarlas en tiempo real, de tal manera que se pueda contribuir a la mitigación de desastres, al mejor ordenamiento del territorio, y a la caracterización de cuencas que son propensas a ser inundables. Los modelos deben estar también integrados con Sistemas de Información Geográfica adecuados de tal forma que la información pueda ser cualitativamente analizada y que las personas sin especialidad en el tema puedan reconocer si su área de residencia se encuentra en zona de riesgo, especialmente si dicha residencia está a pocos metros de la ribera de un río.

Se presentan a continuación, algunos modelos de predicción de inundaciones que se encuentran en funcionamiento y contribuyen como sistemas de alerta temprana.

10.4.4.1 FLASH

El Proyecto de Locaciones Inundadas e Hidrogramas Simulados (Flooded Locations And Simulated Hydrographs Project (FLASH) fue lanzado en 2012, como respuesta a la demostración y disponibilidad en tiempo real de observaciones precisas de precipitación en alta resolución del proyecto MRMS/Q3 (Multiradar-Multisensor) (NSSL, 2012). El Sistema MRMS fue desarrollado para producir datos de precipitación y tiempo severo para mejorar la capacidad de toma de decisiones en cuanto a pronósticos de tiempo severo, alertas, hidrología, aviación y predicción del tiempo numérica; es un sistema con algoritmos automatizados que rápida e inteligentemente integran flujos de datos de múltiples radares, observaciones en superficie y en el aire, sistemas de detección de rayos, y modelos de satélites y pronósticos (NSSL, 2014). La meta principal de FLASH es mejorar la precisión, sincronización y especificidad de alertas de inundaciones repentinas en los Estados Unidos, salvando vidas y protegiendo infraestructura (NSSL, 2012; Gourley et al, 2017).

FLASH es un sistema de predicción de crecientes súbitas en tiempo real; de manera general, es un mapa de los Estados Unidos en el que se ven todos los ríos del país de colores diferentes dependiendo del caudal del río, precipitaciones y por ende la amenaza que cualquiera de estos pueda presentar en un momento dado. FLASH es la base para el sistema que se quiere implementar para Colombia en un futuro, la razón de este proyecto, es poder llegar a un nivel de predicción como este.

10.4.4.2 CREST

El modelo hidrológico distribuido Coupled Routing and Excess Storage (CREST) fue desarrollado por la Universidad de Oklahoma y un equipo de la NASA y es utilizado para la detección y predicción de eventos de inundación extremos, para evaluación estadística e hidrológica de productos de precipitación multi-satelitales y para mapeo de inundaciones en cuencas sin calibrar. Ha sido implementado en varios sistemas, incluyendo en FLASH, sobre los Estados Unidos, Namibia y en el Sistema de Demonstración Global de Simulación Hidrológica y Monitoreo de Inundaciones (<http://eos.ou.edu>). CREST modela la transformación de precipitación a escorrentía con la aplicación de la curva de infiltración variable (Zhao, Liu, & Singh, 1995; He, y otros, 2016).

10.4.5 Tecnología en el estudio de la vulnerabilidad de desastres naturales

La tecnología de los sistemas de información geográfica nos facilita la evaluación y máxima apreciación de los fenómenos naturales y nos proporciona una visión clara de situaciones que de otra forma no podrían ser ilustradas, como los huracanes, las áreas inundables y aquellas donde existe un alto riesgo de que se produzcan deslizamientos. De esta manera las tecnologías actuales abren un mundo de posibilidades para producir o adquirir imágenes de diversos tipos que nos permiten diagnosticar situaciones de riesgo y vulnerabilidad de la población y prevenir situaciones de emergencia.

La identificación de los peligros naturales antes de que ocurran es una parte importante de cualquier plan de emergencia. En los planes de emergencia el tener conocimiento de las áreas vulnerables y de riesgo es fundamental. Pero el análisis de vulnerabilidad y de riesgo necesita de herramientas de apoyo que faciliten el proceso. Es por esto que integramos los Sistemas de Información Geográfica (SIG) que nos permiten colocar en un mismo plano la información que tenemos para analizar las situaciones vulnerables, y a la vez modelar situaciones que simulan los eventos naturales, para así poder estimar los posibles daños y localizar dónde es necesaria la intervención para mitigar efectos adversos. La combinación de los datos de los SIG con los datos estadísticos de probabilidades, riesgos, población, infraestructura y actividad económica, social y cultural permite diseñar planos de exposición a los eventos naturales, de gran utilidad en la planificación. (Martha Quiñones, 2003) En este artículo mencionado se puede aclarar el porque es importante la identificación de peligros naturales para tener una correcta prevención y planeación ante estos, además de saber que sitios son más vulnerables para que estén más preparados.

A continuación, se describen algunas ventajas de los SIG; hay varias razones para que las agencias en los países de América Latina y el Caribe se beneficien con un SIG: puede ser sorprendentemente barato, se pueden evitar equipos muy costosos y técnicos altamente especializados seleccionando adecuadamente el sistema y su aplicación. La principal restricción puede no ser falta de fondos sino falta de personal y equipo apropiado; (Burden, 2009), se puede multiplicar la productividad de un técnico, puede dar resultados de mejor calidad que los que se obtienen manualmente, sea cual fuere el costo respectivo. Puede facilitar la toma de decisiones y mejorar la coordinación entre agencias cuando la eficiencia es lo que más interesa. Las aplicaciones del SIG en el manejo de peligros

naturales y planificación del desarrollo sólo están limitadas por la cantidad de información disponible y por la imaginación del analista. Generalmente, con la información fácilmente disponible sobre eventos naturales (registro de anteriores desastres), investigación científica (artículos, ponencias, boletines, etc.) y cartografía de peligros (fallas sísmicas, ubicación de volcanes, llanuras de inundación, patrones de erosión, etc.) se tiene material suficiente para llevar a cabo una evaluación preliminar con un SIG del estado de los peligros naturales y orientar las actividades de planificación del desarrollo. (OAS, 1993)

10.4.5.1 SIG para reducción de riesgos de desastre

“Hoy en día, el mundo se enfrenta a muchos problemas: cambio climático, sequía, epidemias globales, conflictos violentos y persistente pobreza. Tecnología tal como los SIG ofrece la posibilidad de análisis visual y nos permite ver límites políticos, tendencias poblacionales y diferencias socioeconómicas. También ofrece la habilidad de obtener y verificar datos. Cabe resaltar que “usando la tecnología de los SIG podemos analizar y ver donde un desastre natural había ocurrido previamente y cómo ha impactado el paisaje. Igualmente, se puede intentar predecir dónde es más probable que ocurra un desastre natural” Entendiendo cómo los desastres pasan, la comunidad internacional puede desarrollar nuevos y más eficientes métodos para reducir futuros riesgos de desastre. (United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR), 2012)

10.5 Marco normativo

En la Tabla 2. se menciona la legislación existente en Colombia en cuanto a la prevención y atención de desastres. Cabe resaltar en este marco la Constitución Política de 1991, pues es aquella que rige al país en la actualidad, incluidos los términos ambientales y de riesgo de desastres.

Tabla 2. Síntesis de normativa en el tema de Gestión del Riesgo en Colombia

Norma	Descripción
Constitución Política de Colombia	En el artículo 79 se establecen el derecho de las personas a tener un ambiente sano.
Decreto Ley 2811 de 1974	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.
Ley 09 de 1979	Por la cual se dictan medidas sanitarias. En el primer artículo de esta Ley se establecen normas y procedimientos para la protección del medio ambiente; la Ley establece las normas generales que servirán de base a las disposiciones y reglamentaciones necesarias para preservar, restaurar y mejorar las condiciones sanitarias en lo que se relaciona a la salud humana.
Decreto ley 919 de 1989	Por el cual se organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de desastres, determinando responsabilidades, estructura organizativa, mecanismos de coordinación e instrumentos de planificación y financiación a escala nacional, regional y local. Establece obligatoriedad de trabajar en prevención de riesgos naturales a nivel urbano.
Ley 99 de 1993	Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio

	ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental -SINA- y se dictan otras disposiciones. Establece que la prevención de desastres será materia de interés colectivo y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos serán de obligatorio cumplimiento.
Decreto 93 de 1998	Adopta el Plan Nacional de Prevención y Atención de Desastres (PNPAD), definiendo objetivos, principios, estrategias y programas de Política Nacional
Ley 09 de 1989	Define responsabilidad de las autoridades municipales en tema de la seguridad de los habitantes de las zonas urbanas ante peligros naturales, la obligatoriedad de mantener actualizado el inventario de las zonas que presenten altos riesgos para la localización de asentamientos urbanos.
Ley 388 de 1997	Define mecanismos que permitan al municipio, la prevención de localización de asentamientos humanos en zonas de alto riesgo.
Ley 1523 de 2012	Política Nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.
Decreto 4147 de 2011	Por medio del cual se crea y reglamenta la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – Colombia
Decreto 1807 de 2014	Por medio del cual se incorporan los planes de gestión de riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial de los municipios (Planes que se regulan bajo la Ley 388 de 1997)

Fuente: Adaptada de (Romo, 2015)

Política Nacional Ambiental

Comisión Intersectorial de Políticas y Gestión de la Información (COINFO): Es aquella comisión que provee los lineamientos para estandarización de la información geográfica y los Sistemas de Información Geográfica a nivel nacional.

Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, el cual se originó en el año 2015

10.6 Marco geográfico

10.6.1 Localización y geomorfología

El Municipio de Mocoa (San Miguel de Agreda de Mocoa) está ubicado en la parte norte del Departamento del Putumayo, sobre la cordillera oriental colombiana, fisiográficamente comprende una variada gama de geoformas que van desde laderas altas de cordillera hasta planicies ligeramente onduladas. De su área total, 1.263 kilómetros, la mayor extensión comprende zonas de montaña, correspondientes a laderas altas de cordillera, cuyas características geomorfológicas son pendientes mayores al 75%, valles en V y suelos superficiales. Estarían ubicados en la parte alta de la cuenca del río Mocoa y el Río Cascabel, en estribaciones del Cerro Juanoy, su altura sobre el nivel de mar oscila entre 2.000 y 3.200 metros (Alcaldía de Mocoa, 2017).

Posteriormente se identifican las zonas de Laderas Bajas de Cordillera, correspondientes a superficies de transición entre las zonas de alta montaña y el Piedemonte. Se caracterizan por alturas entre 1.200 y 2.000 msnm. Estas zonas estarían ubicadas en los nacimientos de los Ríos Pepino, Yumiyaco, Mulato, Campucana, la parte media de la subcuenca del río Mocoa y la parte alta de la serranía del

Churumbelo. La Unidad de relieve siguiente se denomina Piedemonte Cordillerano y corresponde a zonas de colinas altas y bajas, con terrazas fuertemente disectadas y con pendientes que oscilan entre 10% y 50%, la Capital del Departamento se podría ubicar dentro de esta zona fisiográfica. La altura sobre el nivel del mar estaría entre 600 y 1.200 metros. Por último, se clasificarían como Planicies Ligeras y Medianamente onduladas, a las geformas que caracterizan las zonas de Puerto Limón, el Picudo y las colinas bajas del Piedemonte cordillerano. La pendiente varía entre 0 y 10% de su altura sobre el nivel del Mar y va desde los 400 a 600 metros. Como punto de referencia, se tiene que Mocoa se encuentra a 618 km de Bogotá D.C (Alcaldía de Mocoa, 2017).

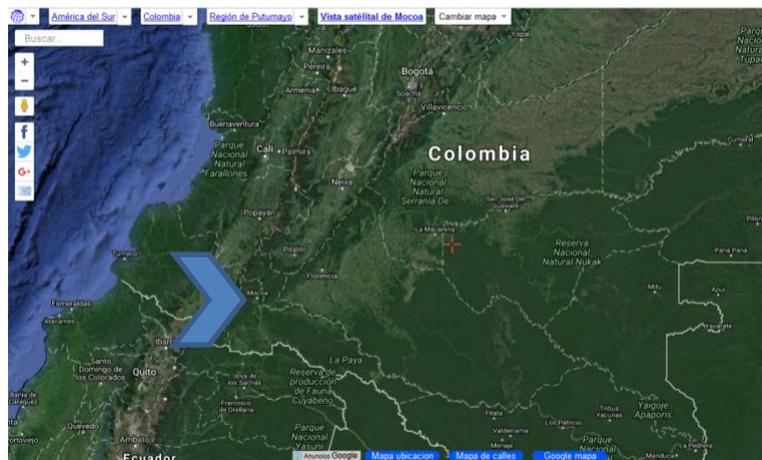


Figura 7. Ubicación de Mocoa, en el departamento del Putumayo en Colombia. Fuente: Google Earth.

10.6.2 Clima y sistemas productivos

Mocoa es de clima templado, muy húmedo, con una temperatura promedio de 22.9° C; el promedio de lluvia total anual es de 3832mm durante los meses de enero, febrero, octubre, noviembre y diciembre, las lluvias registran un descenso moderado en sus volúmenes, en comparación con el resto del año. En estos meses llueve alrededor de 20 días por mes (IDEAM, 2018).

El municipio tiene una precipitación promedio anual superior a los 4000mm ubicada en una de las áreas de mayor precipitación de toda la cuenca amazónica y por ende, con una riqueza de ríos, quebradas y drenajes superficiales de todo nivel, que surcan la cordillera hacia la planicie amazónica. Como muchas en este territorio, se ubica en la falda de la montaña, con cercanía a ríos y quebradas, como el caso del Mocoa, Pepino, Mulato y Sangoyaco. (Botero, 2017)

En Mocoa predomina la ganadería de tipo extensivo, caracterizada por la utilización de grandes extensiones de tierra con baja capacidad de carga, predominan los pastos naturales con tendencia a la ampliación de la frontera agrícola, lo cual implica una deforestación permanente para la ampliación de potreros. Existe la tendencia a incrementar cada vez más las áreas de potreros lo cual implica seguir presionando cada vez más el recurso bosque. Los productores dentro de las practicas culturales que utilizan deforestan una determinada área, la cual se quema, y posteriormente se establecen cultivos transitorios como maíz, yuca y plátano como antesala para la implementación de potreros para el pastoreo extensivo del ganado (...) La piscicultura ocupa también un lugar importante en la economía del municipio de Mocoa. Posee ventajas comparativas como la disponibilidad del recurso hídrico, comercialización asegurada a nivel local por su proximidad a la cabecera municipal, que se constituye en el principal centro de consumo del Departamento (MAVDT - CORPOAMAZONÍA, 2009).

10.6.3 Cobertura vegetal

Según la caracterización de las coberturas vegetales en Mocoa, por medio de la metodología CorineLandCover adaptada para Colombia, hecha en el 2010 por el IDEAM, junto con la Ficha Técnica de los Patrones de las Coberturas de Tierra de la Amazonía Colombiana determinada por el Sistema de Información Ambiental Territorial de la Amazonía Colombiana (SIAT-AC), se establecen las características generales e identificación de coberturas vegetales al año 2012 (Rojas, 2015). En Mocoa existen territorios artificiales, es decir zonas urbanizadas, existen territorios agrícolas, incluyendo pastos y áreas agrícolas heterogéneas, hay bosques naturales y seminaturales, áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, áreas abiertas con poca o sin vegetación y superficies de agua, como embalses, lagos, lagunas y ríos (Rojas, 2015). Una imagen del mapa de cobertura vegetal al año 2012, se encuentra en la *Figura 8*, dónde las coberturas más representativas son bosque denso, herbazal, zonas arenosas naturales, pastos arbolados, bosque abierto y tejido urbano.

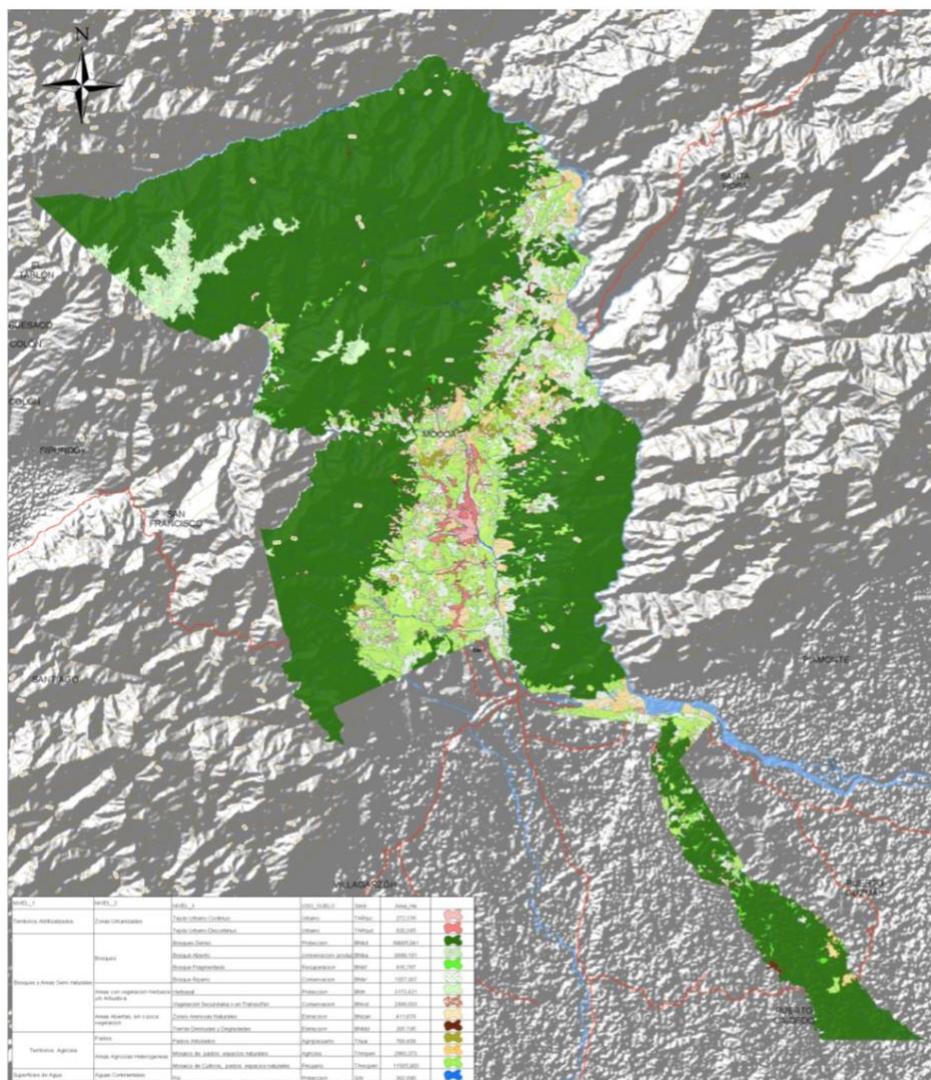


Figura 8. Cobertura vegetal en Mocoa al año 2012. Fuente (Rojas, 2015)

10.6.4 Suelos

Mocoa tiene características estratigráficas variadas en sus suelos, dentro de las cuales se incluyen material parental, areniscas y arcillas, con drenaje externo muy rápido y drenaje interno lento y

natural, en el área de Condagua, al nororiente del mapa de la Figura 7; para el área de Sangoyaco, en el centro occidente de la *Figura 8*, hay textura arcillo arenosa, y en profundidades de entre 10 y 30cm la textura es franco gravilosa; por último para el área de Mocoa se encuentra una textura arcillosa (*Rojas, 2015*).

10.6.5 Amenazas al municipio

Según el PBOT del municipio, se identifican las siguientes amenazas para el área urbana: avalanchas torrenciales, deslizamientos e inundaciones; y para el área rural: amenaza por erosión, inundación, amenaza sísmica, amenazas tecnológicas y operacionales (explotación petrolera, incendios, contaminación) y amenazas sociales (*MAVDT - CORPOAMAZONÍA, 2009*).

Los suelos y la geomorfología del área hacen especialmente inestables estos paisajes montañosos, susceptibles a la erosión y a los deslizamientos. Aún en condiciones naturales, con coberturas boscosas, es frecuente ver deslizamientos enormes en estas montañas. Sin embargo, de unos años para acá, se ha venido incrementando el proceso de deforestación. Durante varios años, recorriendo la cuenca alta del río Mocoa y proponiendo medidas de mitigación ambiental para la construcción de la Variante (VSFM), se observa cómo, aumentaba la presión de deforestación en todo su recorrido. (*Botero, 2017*)

10.6.6 Geografía del desastre

A continuación, se muestra un mapa acercado al municipio de Mocoa en el que se ven los 3 ríos que pasan por el municipio, siendo los de mayor incidencia en el desastre el Sangoyaco y Mocoa que destruyeron un barrio por completo además de todas las vidas y viviendas que se llevaron.



Figura 9. Ríos desbordados en la avalancha de Mocoa. Fuente: (Euscátegui, 2017)

10.7 Marco institucional

Las instituciones involucradas en el proyecto son principalmente La Universidad El Bosque, por ser la institución acreedora del programa de ingeniería ambiental, y es la que tiene el convenio con el Laboratorio HyDROS de la Universidad de Oklahoma, segunda institución involucrada, que es la

proveedora del sistema de modelamiento hidrológico EF5, en el cual se realiza la presente investigación.

11. Marco metodológico

A continuación, se encuentra el diseño metodológico de la investigación, el plan de trabajo y la tabla metodológica.

11.1. Diseño metodológico

En esta primera parte del marco metodológico se presenta en la *Tabla 3* una síntesis de la metodología la cual incluye objetivos (que definen las fases del proyecto en este punto y en el plan de trabajo) el enfoque, alcance, método, unidad de análisis, técnicas e instrumentos planteados para cada uno de los objetivos específicos a cumplir, cada uno de ellos representa las fases de la I a la IV del proyecto. El enfoque de la investigación a nivel general está definido como mixto porque existe manejo y análisis de los datos en los niveles cualitativo y cuantitativo (haciendo uso de específicamente 7 ecuaciones estadísticas relevantes). El alcance de la investigación en la primera fase es descriptivo, por describir la inundación de Mocoa desde las variables de extensión, ocurrencia y severidad, en la segunda y tercera es exploratorio dado el campo que se esta explorando con respecto a la evaluación de una modelación hidrológica a diferentes resoluciones espaciales y temporales sobre Colombia, y en la cuarta fase es correlacional pues relaciona los datos obtenidos en las fases anteriores en confrontaciones y un análisis comparativo. Con respecto al método y la unidad de análisis, el primero es deductivo analítico por iniciar a partir de teorías que se aplican al hecho de ocurrencia de una inundación; el segundo es definido por la habilidad del sistema de predicción de crecientes súbitas basadas en información satelital sobre la cuenca de Mocoa a diferentes resoluciones, haciendo énfasis en los ríos implicados en el desastre.

Para las técnicas e instrumentos, estos fueron divididos dependiendo del tipo de tratamiento que se le estuviera dando a la información, es decir, se inició con la recolección de información sobre la cual resaltan las técnicas de recolección de datos presentes en estaciones hidrometeorológicas del IDEAM: precipitación y caudal, reportes de impacto: mapas, noticias, artículos y reportes, precipitación satelital: de 3B42 y IMERG, caudales modelados: a partir de EF5 y los instrumentos son precisamente todas las tablas de datos y mapas obtenidos a partir del uso de dichas técnicas, adicionalmente está la herramienta de modelación hidrológica EF5 y el Sistema de Información Geográfica, ArcGIS.

Posterior a esto, se hizo la organización y sistematización de la información con técnicas de observación, clasificación y organización de los datos de las estaciones del IDEAM, los satelitales, los mapas, reportes y artículos, observación, configuración e implementación de EF5, y programación para las métricas estadísticas de período de retorno, un resultado muy importante de la investigación. Se usaron instrumentos como Excel, noticias, mapas, QGIS, Anaconda y EF5.

Para la interpretación y análisis se usaron técnicas de análisis, métricas estadísticas para análisis comparativo de datos, análisis cuantitativo de datos del IDEAM y satelitales, haciendo uso de los instrumentos en conjunto de las etapas anteriores.

Tabla 3. Diseño metodológico de la investigación

	Objetivo general			
	Evaluar y describir el impacto que tiene la configuración de resolución espacial y temporal en la habilidad de un sistema de predicción basado en información satelital para simular la ocurrencia, extensión y severidad del evento de Mocoa en el 2017 y determinar su utilidad como herramienta de aplicación a escala nacional.			
	FASE I	FASE II	FASE III	FASE IV
	Objetivos Específicos			
	Recolectar, procesar y analizar datos de precipitación, caudales, reportes de impacto y mapas que describan la ocurrencia, extensión y severidad del impacto.	Configurar e implementar el sistema de modelación de EF5 con TRMM y GPM.	Evaluar el impacto de la resolución espacial y temporal del sistema de pronóstico hidrológico en la modelación del evento de Mocoa.	Evaluar la información del modelamiento que es producida con la simulación del evento para establecer la utilidad y habilidad de esta herramienta.
Enfoque	El enfoque metodológico del trabajo de investigación es mixto, ya que se tratan métodos cualitativos y cuantitativos. La investigación cualitativa intenta hacer una aproximación global de las situaciones sociales para explorarlas, describirlas y comprenderlas de manera inductiva; además tiene diversidad de diseños cualitativos entre los cuales figuran los estudios de caso (<i>Monje Álvarez, 2011</i>). Para esta investigación aplicada específicamente para el caso de Mocoa se describen cualitativamente los datos obtenidos de las simulaciones contrastando con la información obtenida de los reportes que describen el evento. Por otro lado, el enfoque investigativo cuantitativo, plantea la unidad de la ciencia, es decir, la utilización de una metodología única que es la misma de las ciencias exactas y naturales (<i>Bonilla Castro & Rodríguez Sehk, 1997</i>); en este trabajo, se realiza tratamiento y análisis de datos a nivel estadístico, y técnicas de transformación para la normalización de datos. La evaluación de los datos obtenidos en la			

		investigación, se hace con descripciones y explicaciones, propias la investigación cuantitativa, de la pretensión explicativa se deriva la predicción, la manipulación técnica y el control sobre los acontecimientos o hechos (Monje Álvarez, 2011); para este caso, se evalúa a partir de diferentes elementos (como hidrogramas y mapas) el acontecimiento específico de la inundación de Mocoa.			
Alcance		Esta fase de la investigación tiene un alcance descriptivo (Hernández Sampieri, Fernández, & Baptista, 2004) ya que permite describir el evento de la inundación de Mocoa en términos de extensión y severidad con el uso de diferentes fuentes de información.	Estas dos fases de la investigación tienen un alcance exploratorio (Hernández Sampieri, Fernández, & Baptista, 2004), ya que se configura un sistema de modelación a diferentes resoluciones espaciales y temporales que permiten estudiar y evaluar la información de fenómenos hidrometeorológicos sobre la cuenca que abarca el municipio de Mocoa, aplicando un método innovador para la caracterización y predicción de inundaciones, no sólo con fines investigativos, sino para contribuir al desarrollo de una herramienta de predicción a nivel nacional.		El alcance de esta última fase es correlacional (Hernández Sampieri, Fernández, & Baptista, 2004) pues se pretende determinar la utilidad y habilidad de la herramienta de predicción, comparando los datos satelitales y de reportes y observaciones sobre la inundación en Mocoa, teniendo en cuenta las variables de extensión, ocurrencia y severidad.
Método		El método de investigación es deductivo analítico; porque se inicia a partir de teorías que ya están establecidas que se aplican posteriormente a un hecho particular, la inundación, con lo que más adelante se realiza el análisis de datos de cada variable de forma individual.			
Unidad de análisis		La unidad de análisis es la habilidad del sistema de predicción de crecientes súbitas basadas en información satelital sobre la cuenca del municipio de Mocoa, abarcando los 3 ríos que tuvieron parte en la inundación.			
Recolección de información	Técnicas	Recolección de datos presentes en bases de datos: estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, reportes de impacto: mapas, noticias.	Revisión bibliográfica de configuración e implementación del modelo EF5. Técnica Delphi, pues se indagó con	Recolección de resultados de datos de caudal a las diferentes resoluciones espaciales y temporales.	Síntesis de los datos obtenidos en las fases anteriores.

			expertos en el tema de modelamiento y simulaciones hidrológicas para la configuración del modelo.	Revisión bibliográfica para la obtención del período de retorno. Recolección de parámetros para la inundación.	
	Instrumentos	Información de precipitación históricas del IDEAM sobre las estaciones Mocoa Acueducto, Campucana, Patoyaco y Minchoy. Reportes noticiosos. Trabajos de investigación y artículos. Cartografía de impactos.	Datos de precipitación satelital: 3B42 e IMERG. Parámetros a priori requeridos por EF5 para las simulaciones. Sistema de Información Geográfica: ArcGIS.	Datos de precipitación satelital: 3B42 e IMERG. Datos de entrada para correr EF5. Insumos necesarios para la construcción del modelo estadístico de períodos de retorno.	Datos de las fases anteriores.
Organización, sistematización y análisis de la información	Técnicas	Clasificación y organización de datos presentes en bases de datos: estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, reportes de impacto: mapas, noticias.	Observación sistemática y configuración del modelo con la información satelital. Organización de datos de precipitación en tablas y gráficas.	Implementación del sistema de modelamiento EF5. Programación para las métricas estadísticas de período de retorno.	Organización de los datos obtenidos en fases anteriores.

	Instrumentos	Software de paquetes estadísticos (Excel) para la elaboración de tablas de los datos de precipitación. Reportes noticiosos. Cartografía de impactos. Artículos y trabajos de investigación.	Herramienta de modelación hidrológica: EF5. Sistema de Información Geográfica: QGIS. Software de paquetes estadísticos (Excel).	Herramienta de modelación hidrológica: EF5. Software de paquetes estadísticos (Anaconda Spyder) para producir hidrogramas y períodos de retorno históricos. Sistema de Información Geográfica: QGIS. Software de paquetes estadísticos (Excel).	Sistema de Información Geográfica: QGIS. Reportes noticiosos. Cartografía de impactos.
Interpretación y análisis de resultados	Técnicas	Análisis del contenido de los datos de las diferentes fuentes de información.	Uso de métricas estadísticas para establecer correlación y bias (sesgo) a partir de las tablas de los datos satelitales y las estaciones del IDEAM. Análisis cuantitativo de los datos de precipitación del IDEAM y los obtenidos en la simulación.	Análisis comparativo del impacto de las resoluciones con hidrogramas. Análisis de mapas de período de retorno e inundación a las diferentes resoluciones.	Análisis comparativo del contenido de la modelación, los reportes noticiosos y mapas. Estimación de la capacidad del modelo para detectar el evento. Inspección visual.

	Instrumentos	<p>Reportes noticiosos.</p> <p>Artículos e investigaciones.</p> <p>Mapas.</p> <p>Software de paquetes estadísticos (Excel) para la gráfica de precipitación.</p>	<p>Herramienta de modelación hidrológica: EF5.</p> <p>Sistema de Información Geográfica: QGIS.</p> <p>Software de paquetes estadísticos (Excel): Gráficas estadísticas de dispersión, valores de correlación y bias.</p> <p>Software de paquetes estadísticos (Python-Spyder) para hidrogramas.</p> <p>Productos obtenidos de correr EF5: precipitación.</p>	<p>Productos obtenidos de correr EF5: caudal, mapas de inundación.</p> <p>Productos obtenidos de las métricas estadísticas y de EF5: períodos de retorno.</p> <p>Sistema de Información Geográfica: QGIS.</p> <p>Software de paquetes estadísticos (Excel): hidrogramas de caudal.</p>	<p>Sistema de Información Geográfica: QGIS.</p> <p>Reportes noticiosos.</p> <p>Cartografía de impactos.</p>
--	--------------	--	--	--	---

Fuente: elaboración propia.

11.2 Plan de trabajo

Fase 1. Recolección de información para caracterizar el Evento de Mocoa

Dentro de esta primera fase del proyecto son descritos los diferentes tipos de datos a nivel nacional e internacional que se encontraron para describir la extensión, ocurrencia y severidad del impacto de la inundación de Mocoa.

1.1. Reportes

Con el fin de construir información y poder evaluar la habilidad del sistema de predicción y caracterizar en cuanto a las dimensiones de extensión, ocurrencia y severidad, se realizó una búsqueda bibliográfica del evento, teniendo en cuenta diferentes fuentes de información, descritas en la *Tabla 4*:

Tabla 4. Fuentes de información de reportes de la inundación de Mocoa

Fuente	Información obtenida
Reportes noticiosos	Por la magnitud del desastre, fue cubierto por muchos noticieros, periódicos y revistas a nivel nacional e internacional
Trabajos de investigación y artículos	Estudian y hacen referencia al municipio Mocoa y las cuencas de los ríos que lo atraviesan como objeto de estudio
Cartografía de impactos	Obtenida de búsqueda de reportes de la Oficina de las Naciones Unidas para la Coordinación de Asuntos Humanitario (OCHA por sus siglas en inglés) (OCHA, 2017) que será utilizada como referencia al momento de confrontar los datos en fases posteriores

Fuente: elaboración propia.

1.2. Registros y observaciones hidrometeorológicas

El IDEAM es el Instituto encargado de proporcionar los datos hidrológicos, meteorológicos e hidrometeorológicos a nivel nacional. Debido a esto, se recurrió a dicha entidad para recolectar los datos de precipitación y caudales necesarios para esta investigación. Los datos se piden por solicitud en la página web del IDEAM (<http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>), se realizó un acercamiento al área de estudio, *Figura 10* y se pidieron los datos de las estaciones que sean necesarias. Para el caso de esta investigación fueron solicitados los datos de precipitación históricos

(1978-2017) de las estaciones: Mocoa Acueducto, Minchoy, Campucana y Patoyaco (insumo utilizado en fases 1 y 2). Los datos solicitados fueron tratados en la herramienta de Microsoft Excel, para hacer las gráficas de valores totales diarios de precipitación del evento que son comparadas con las del modelo hidrológico en la sección de resultados.

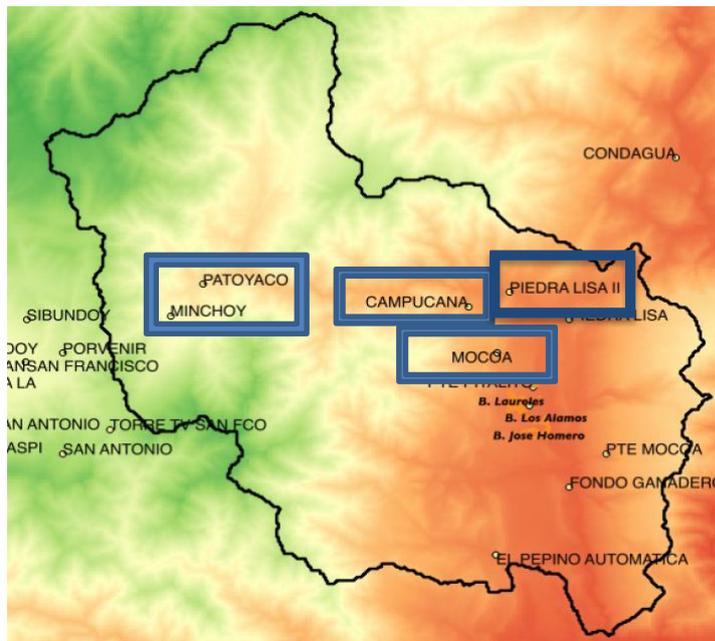


Figura 10. Estaciones tomadas para las métricas. Fuente: elaboración propia.

Las tablas con los datos de precipitación históricos se encuentran en el Anexo 1.

Fase 2. Configuración del modelo hidrológico con lluvia satelital

2.1. Configuración EF5

El software para la realización de simulaciones hidrológicas, EF5, se encuentra en línea para su descarga inmediata (<http://ef5.ou.edu/download-code/>), y se puede utilizar de manera gratuita, para realizar allí las simulaciones necesarias; para su entendimiento y correcto manejo, la página web del modelo cuenta con la documentación necesaria para un entrenamiento completo que debe realizarse previo a cualquier simulación de un estudio en particular (*The University of Oklahoma, 2018*)

Como primera medida se delimitó una cuenca que en su extensión cubriera los tres ríos implicados en la inundación: Mocoa, Mulato y Sangoyaco y que tuviera un punto de desembocadura lo suficientemente aguas abajo de estos ríos, para poder capturar el área de interés completa. Una imagen de la cuenca delimitada se observa en la *Figura 11*.

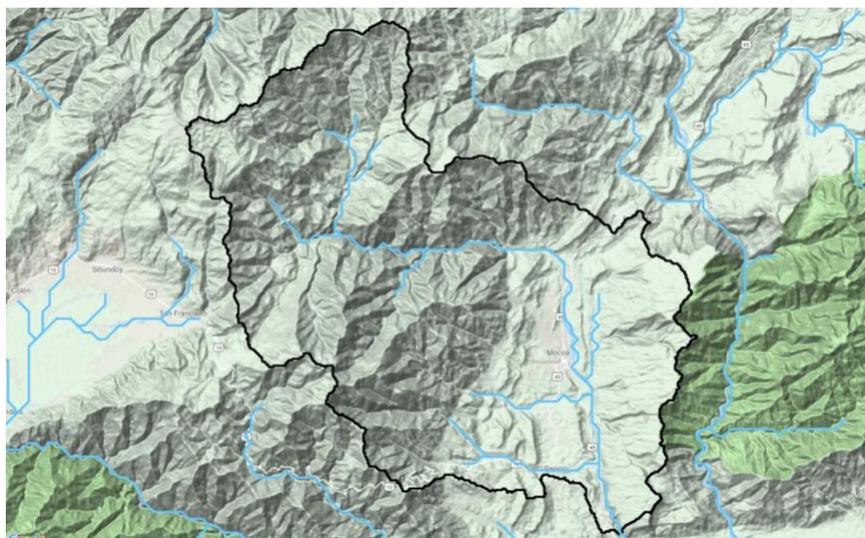


Figura 11. Cuenca de Mocoa en QGIS. Fuente: elaboración propia.

Entrando a la configuración de la herramienta de modelado, EF5 requiere información del terreno obtenida de un modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés), acumulación de flujo de agua (FACC), y dirección de flujo de agua (FDIR). El Modelo de Elevación Digital es obtenido del sitio web HydroSHEDS (*HydroSHEDS, 2013*) a partir de la Misión Shuttle Radar Topography (SRTM por sus siglas en inglés) de la NASA y con herramientas de ArcGIS se producen la acumulación y dirección de flujo. Los datos, se encuentran a las resoluciones de 1km, 500m y 100m; todos los datos se ajustaron para hacer parte únicamente de Colombia, pues por defecto, vienen de toda Suramérica.

Según Vergara, y otros (2016), EF5 es una adaptación del modelo hidrológico distribuido Coupled Routing and Excess Storage (CREST) (*Wang, y otros, 2011*) y combina diferentes representaciones físicas para la simulación hidrológica. La configuración usada en este estudio consiste del componente de balance hídrico en CREST conjunto con un modelo de onda cinemática (kw) para el enrutamiento de flujo superficial. El enrutamiento de flujo sub superficial es modelado usando una versión distribuida de reservorios lineales (*Nash, 2016*), un modelo de enrutamiento agrupado usado comúnmente en hidrología (*Moore, 2009; Chow, Maidment, & Mays, 1988; Vrugt, Gupta, Bouten, & Sorooshian, 2003*). El modelo de balance hídrico está basado en la curva de infiltración variable (*Zhao, Liu, & Singh, 1995; Zhao, Zhang, Fang, Liu, & Zhang, 1980*) para el computo del exceso de lluvia, la cual es dividida en sus componentes superficial y subsuperficial a través de un mecanismo basado en conductividad hidráulica (*Wang, y otros, 2011*). El componente de exceso de lluvia es enrutado como flujo superficial con una implementación del modelo de onda cinemática para un flujo superficial de canal rectangular ancho, así:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \alpha_0 \frac{3}{5} q^{\frac{3}{5}-1} \frac{\partial q}{\partial t} = i - f$$

Donde q es el flujo superficial en m^3/sm^2 , $i-f$ es la superficie de exceso de lluvia del balance hídrico en m/s , y α_0 es un parámetro de transporte en el terreno definido como una función del coeficiente de rugosidad de Manning y la pendiente del terreno.

Es posible emplear información geoespacial para estimar valores *a priori* para los parámetros de EF5. Su descripción se describe a continuación en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Fuentes de los parámetros a priori para la implementación de EF5

Parámetro	Descripción	Fuente
Fracción de agua impermeable (IM)	Fracción de cada celda de la red cubierta por una superficie impermeable	(Elvidge, y otros, 2007)
Capacidad máxima de retención de agua en el suelo (WM)	Requiere textura del suelo del proyecto SoilGrids, que son convertidas a tipos de suelo y posteriormente, la porosidad efectiva Green-Ampt θ_e , utilizando una tabla de búsqueda, los valores θ_e son multiplicados por una profundidad corregida del suelo (1 m)	(Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983) para el tipo de suelo y tablas de búsqueda θ_e ; (Hengl, 2014) para SoilGrids
Conductividad hidráulica saturada (K_{sat})	Las texturas del suelo del proyecto SoilGrids son convertidas a K_{sat} usando tipo de suelo y tablas de búsqueda de K_{sat}	(Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983) para tipo de suelo y tablas de búsqueda K_{sat}
Exponente de la curva variable de infiltración (b)	Las texturas del suelo son convertidas a tipos de suelo, y luego convertidas nuevamente a una b promedio con el uso de tablas de búsqueda	(Rawls, Brakensiek, & Miller, 1983) para tabla de búsqueda del tipo de suelo; (Cosby, Hotnberger, Clapp, & Ginn, 1984) para tabla de búsqueda de b promedio
Alpha superficial (α_0)	Determinado de las clasificaciones LULC, que deben ser convertidas a la n de Manning con una tabla de búsqueda	(Defourny, 2016) para tabla LULC; (Chow, Open-Channel Hydraulics, 1959) para la tabla de búsqueda de Manning
Alpha (α) y beta (β) para canales	Determinados por un modelo de predicción de parámetros relacionando temperatura promedio, precipitación y data de DEM a valores de α y β , están presentes en la ecuación: $Q = \alpha A^\beta$ <i>Ecuación 1. Caudal con parámetros de alpha y beta</i> Donde Q es caudal, A es el área transversal del canal de flujo, alpha es el factor de multiplicación y beta es el exponente.	(Vergara, y otros, 2016) para modelo de predicción de parámetros; (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005) para datos de temperatura y lluvia; (HydroSHEDS, 2013) para el DEM

Adaptada de: (Clark, y otros, 2017)

Con el fin de realizar una simulación de inundación, EF5 requiere de parámetros similares a los de onda cinemática, pero específicamente para estimar profundidad de agua como función del caudal. El algoritmo de inundación de EF5 (Figura 12) indica cuando la capacidad máxima de transporte de la corriente se supera, y el modelo mueve de forma lateral el agua hacia la superficie adyacente a la corriente, demostrando así, una inundación. El modelo estima el parámetro de profundidad de banco en los drenajes y establece si la profundidad con respecto al DEM supera la elevación a la que se encuentran los píxeles adyacentes, de ser así, los píxeles adyacentes toman la profundidad de agua que resulta por encima de la capacidad máxima de la corriente. Los parámetros, ligados a la geometría del canal, son definidos usando mediciones de caudal y de profundidad promedio, haciendo un ajuste de curva con una ecuación de potencia. En la ecuación sí los valores de A, Q y beta son constantes y aumenta el valor de alpha disminuye la onda de inundación, y si son constante los valores A, Q y alpha, aumentando beta se disminuye la onda de inundación (Vergara, 2018).

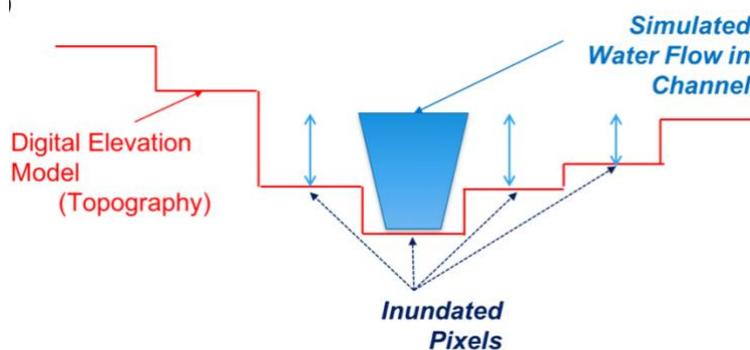


Figura 12. Algoritmo de inundación de EF5. Fuente: (Vergara, 2018).

2.2. Productos de Precipitación Satelital

El primer producto satelital utilizado en este trabajo de investigación fue el producto 3B42 de la misión satelital TRMM y el algoritmo TMPA (The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis) en su séptima versión. Los estimados de 3B42 están disponibles a una resolución espacial de 25km y una resolución temporal de 3 horas (NASA, 2016). El segundo producto satelital, IMERG, es de la misión GPM en su quinta versión. Su resolución espacial es de 10km y la resolución temporal es de 30 minutos (NASA, 2016). Se puede acceder a la información de precipitación de TRMM y GPM en línea en el sitio web de la NASA (<https://pmm.nasa.gov/data-access>).

En esta sección se realizaron hidrogramas que cuentan con la información tanto de precipitación como de caudal, para el evento de la inundación de Mocoa en primera instancia haciendo uso de las dos resoluciones espaciales y las dos resoluciones temporales de información satelital, evaluando así la capacidad de los productos satelitales de detectar la ocurrencia del evento.

Al realizar la caracterización de la habilidad de los productos satelitales 3B42 e IMERG, se aplicaron una serie de métricas estadísticas a diferentes escalas temporales, sometiéndolo a una comparación con los datos hidrometeorológicos obtenidos de las 4 estaciones del IDEAM. Estas estadísticas muestran el nivel de incertidumbre que tienen los productos a nivel espacial y temporal, y son otro factor de definición de la ocurrencia del evento.

Para evaluar la habilidad de magnitud se utilizó el Bias o sesgo, estadística que permite evaluar el porcentaje de diferencia entre los volúmenes de las tres series de datos de precipitación (hidrometeorológica y satelital 3B42 y IMERG), y es hallado con la siguiente ecuación:

$$BIAS (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100$$

Ecuación 2. Bias o Sesgo

Donde S , son las estimaciones satelitales y O , son las observaciones hidrometeorológicas. Esta métrica tiene un rango de -100% a ∞ , donde el valor ideal es cero, por lo tanto si el resultado es positivo quiere decir que el producto está sobreestimado y si por el contrario, es negativo, se concluye que está subestimado.

La estadística de coeficiente de correlación mide el nivel de asociación entre los datos hidrometeorológicos y los datos satelitales al describir la dinámica temporal de la precipitación. Tiene un rango de -1 a 1, siendo estos números el estado perfecto. Esta estadística se halla con la siguiente fórmula:

$$CC = \frac{N \sum_{i=1}^N S_i O_i - \sum_{i=1}^N S_i \sum_{i=1}^N O_i}{\sqrt{(N \sum_{i=1}^N S_i^2 - (\sum_{i=1}^N S_i)^2)(N \sum_{i=1}^N O_i^2 - (\sum_{i=1}^N O_i)^2)}}$$

Ecuación 3. Coeficiente de correlación

Conjuntamente con los valores de correlación y bias, representando indicadores estadísticos, se realizaron gráficas de dispersión para la confrontación de los productos satelitales entre sí, y para la confrontación de los productos satelitales con la información hidrometeorológica obtenida por el IDEAM en las estaciones ubicadas en diferentes puntos de la cuenca, aguas arriba y aguas abajo del municipio de Mocoa.

Las tablas con los datos satelitales versus los datos del IDEAM para realizar las gráficas de dispersión y valores de correlación y bias se encuentran en el Anexo 2.

Fase 3. Evaluación del impacto de la resolución espacial y temporal en la simulación del evento

3.1 Especificación de resolución espacial y temporal

Como es mencionado en fases anteriores, EF5 requiere de la información topográfica extraída de DEMs con la herramienta ArcGIS. Las Figuras 13-15 presentan esta información en las diferentes resoluciones espaciales (1km, 500m y 100m). Las simulaciones fueron corridas a cada una de estas resoluciones espaciales del terreno con los diferentes datos de precipitación satelital de TRMM y GPM, mencionados en la Fase 2.

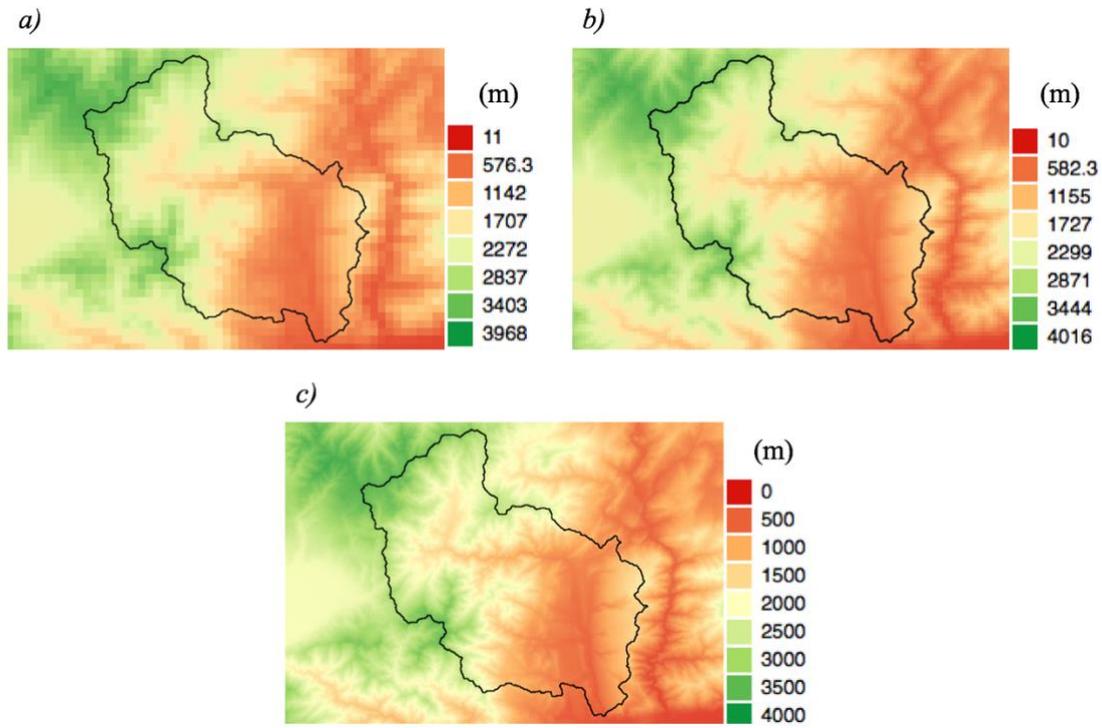


Figura 13. Capas de DEM sobre la cuenca de Mocoa; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

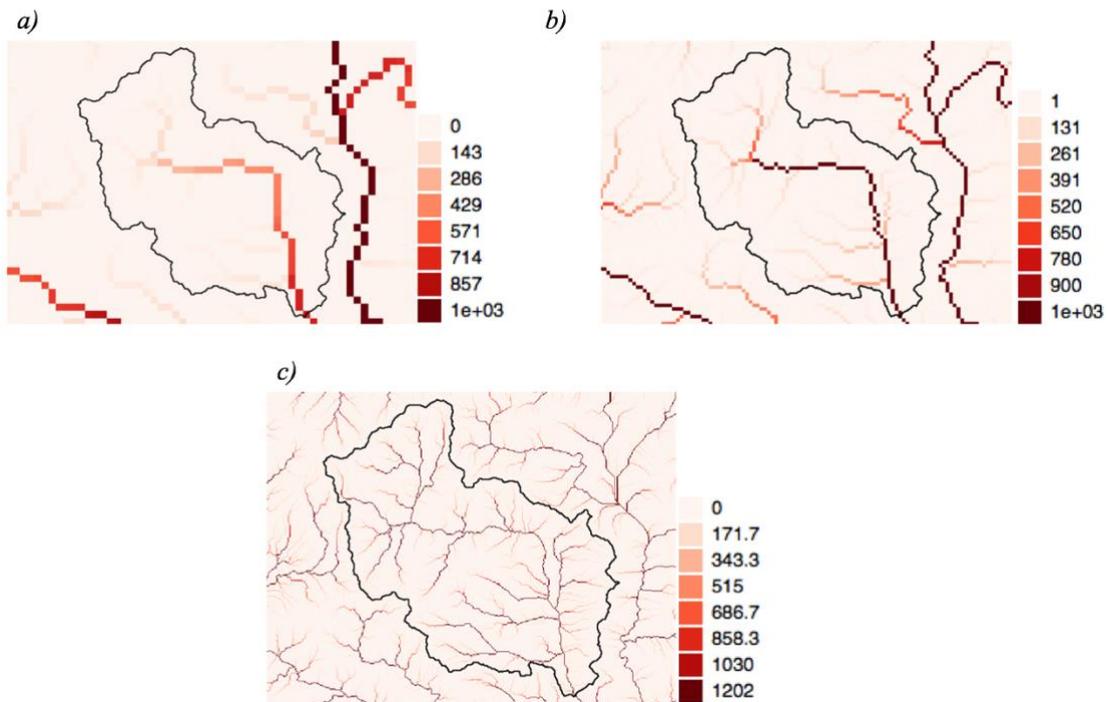


Figura 14. Capas de FACC sobre la cuenca de Mocoa; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

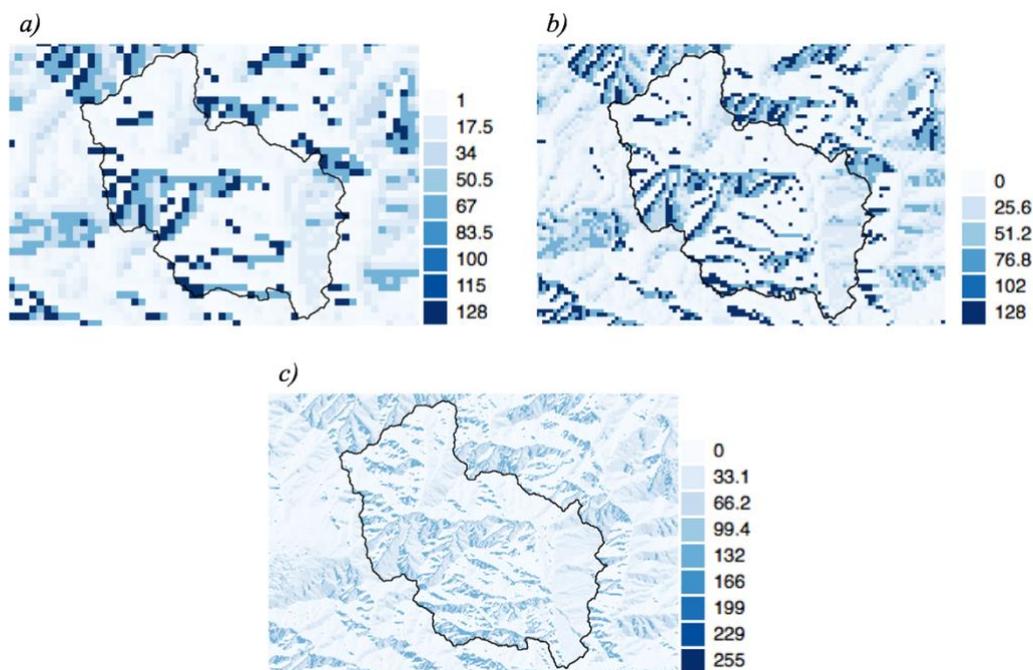


Figura 15. Capas de FDIR sobre la cuenca de Mocoa; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, y para evaluar el efecto de la resolución temporal de modelado, se realizó un experimento fijando la configuración del terreno a 100m y variando la frecuencia de lectura de las estimaciones de precipitación del producto 3B42 a 3 horas (resolución original), 1 hora y 30 minutos. La serie de simulaciones resultantes de la combinación de diferentes resoluciones espaciales y temporales es sintetizada en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Especificación de las combinaciones de resoluciones

Resolución del terreno	Resolución espacial de precipitación	Resolución temporal de precipitación
1km	Con 3B42: 25km Con IMERG: 10km	Con 3B42: Cada 3 horas Con IMERG: Cada 30 min
500m	Con 3B42: 25km Con IMERG: 10km	Con 3B42: Cada 3 horas Con IMERG: Cada 30 min
100m	Con 3B42: 25km Con IMERG: 10km	Con 3B42: Cada 3 horas Con 3B42: Cada hora Con 3B42: Cada 30 min Con IMERG: Cada 30 min

Fuente: elaboración propia.

Con los datos obtenidos de estas simulaciones se realizaron hidrogramas de caudal para dos áreas clave en la cuenca: aguas arriba, donde se encuentra la estación Piedra Lisa II y aguas abajo, donde se cubre por completo el área de la cuenca de Mocoa (640 km²), con el fin de mostrar la diferencia del evento a las diferentes resoluciones en puntos diferentes de drenaje de aguas.

Las tablas de datos con las que se mostraron las diferencias de los caudales simulados a las diferentes resoluciones se encuentran en el Anexo 3.

3.2. Construcción del modelo de severidad y análisis comparativo del impacto de la resolución

De manera que los caudales simulados puedan ser utilizados para predecir inundación, se necesita emplear un método que relacione la magnitud de los caudales con la ocurrencia de eventos. Una forma comúnmente usada en hidrología es por medio de períodos de retorno (*Bedient, Huber, & Vieux, 2008*), los cuales representan la frecuencia con la cual un determinado caudal puede ocurrir. Los períodos de retorno son usualmente expresados en años e indican la probabilidad de que un determinado valor de caudal sea igualado o superado en un año cualquiera. La relación período de retorno – probabilidad de excedencia está dada por la ecuación:

$$P = \frac{1}{T}$$

Ecuación 4. Relación período de retorno – probabilidad de excedencia

Donde P es la probabilidad de excedencia, y T es el período de retorno. Por ejemplo, el caudal asociado a un período de retorno de 25 años tiene una expectativa de ser igualado o excedido en promedio una vez cada 25 años, y tiene una probabilidad de excedencia de 0.04 (4%). Esta forma de representación de los valores de caudal permite clasificar las magnitudes simuladas de manera que se puedan detectar eventos extremos o de baja frecuencia de ocurrencia como lo son las inundaciones. En un estudio titulado *Distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations* (*Reed, Schaake, & Zhang, 2007*) se propone un método para predecir inundaciones usando simulaciones de un modelo hidrológico distribuido y períodos de retorno. En este trabajo de investigación se adopta esta metodología, descrita a continuación.

Se utilizó el resultado de la modelación de caudales horarios correspondientes a un período histórico de estudio (2001 a 2017) haciendo uso de los datos de TRMM para poder construir un modelo estadístico de períodos de retorno en cada pixel de la cuenca de Mocoa, haciendo uso de la herramienta de programación Spyder (de la plataforma Anaconda). Para ajustar el modelo se utilizaron los datos de TRMM, dado que es necesario tener por lo menos una serie de máximos anuales de 10 años, es decir, el modelo que calcula períodos de retorno se basa sólo en caudales generados con TRMM. GPM, entró en vigencia en el 2014 por lo que no cuenta con el período de 10 años, a pesar de esto, el hecho de que GPM y TRMM tengan bases de diseño y uso de sensores similares, se asumió que se puede usar GPM con el modelo basado en TRMM, esta suposición se soporta con las comparaciones mostradas en los resultados, entre los productos 3B42 y IMERG.

Esto es logrado extrayendo los caudales máximos unitarios por cada año del período histórico, de forma que se construye una serie de máximos anuales para cada uno de los píxeles. Estas series se ajustaron a un modelo de probabilidad tal como el modelo de distribución de probabilidad Normal o Log-Normal, usados comúnmente en hidrología (*Bedient, Huber, & Vieux, 2008*). Para este caso, se utilizó el modelo de distribución de probabilidad Log-Pearson Tipo 3 (LP3), recomendado para caudales asociados a inundaciones. El modelo estadístico que permite estimar el caudal asociado a un período de retorno en particular (Q_{RP}) es función de los dos primeros momentos de la distribución LP3 (la media, μ y la desviación estándar, σ) y el coeficiente de frecuencia k obtenido de una tabla de referencia basado en el tercer momento de la distribución LP3 (oblicuidad) y el intervalo de recurrencia en años (*Bedient, Huber, & Vieux, 2008*) (Ecuación 5).

$$Q_{RP} = 10^{(\mu+k\sigma)}$$

Ecuación 5. Modelo estadístico basado en parámetros de LP3

Para simplificar el uso del modelo estadístico obviando la necesidad de la tabla de referencia, se calculan los caudales asociados a períodos de retorno de 1, 2, 5, 25, 50, 100 y 200 años y se ajusta un modelo lineal relacionado al logaritmo de los caudales Q calculados y sus períodos de retorno correspondientes (Jurado & González, 2013) como se ve en la Ecuación 7.

$$\text{Log}(RP) = b + m(\text{log}(Q_{RP}))$$

Ecuación 6. Modelo lineal en escala logarítmica

Donde b es el intercepto y m, la pendiente. Los períodos de retorno se obtienen con la ecuación:

$$RP = \exp(\text{Log}(RP))$$

Ecuación 7. Período de retorno

Estos parámetros, junto con el coeficiente de determinación, habilitan el cálculo de los valores de período de retorno para cada caudal en cada píxel de la cuenca. Basado en lo sugerido por Reed et al (2007), se tomó un período de retorno de 2 años como umbral para indicar la ocurrencia de la inundación. Es decir, cada vez que el modelo produzca píxeles con valores de caudal que igualen o superen el caudal con intervalo de recurrencia de dos años, se dice que, en estos píxeles, existe una inundación. Con el uso de datos históricos para las simulaciones de caudal es posible computar los períodos de retorno sobre toda la cuenca, independiente de la disponibilidad de observaciones de caudal (Jurado & González, 2013). Los resultados de período de retorno son unos de los lineamientos que indican la ocurrencia del evento, mientras que la severidad es caracterizada dependiendo del máximo nivel de recurrencia (período de retorno) que el modelo simula para el evento.

En cuanto a la caracterización de la extensión, se definió haciendo uso de los mapas de profundidad máxima simulada durante el evento que indican las zonas de inundación sobre la cuenca. Para esto, se utiliza un parámetro de referencia con valores estimados de profundidad el banco del río (mencionado anteriormente en la configuración de EF5). Estas estimaciones son generadas entrenando redes neuronales basadas en el área de drenaje como descriptor del tamaño de la corriente. Con estas profundidades de referencia es posible identificar píxeles donde la profundidad del agua alcanza o supera la capacidad de transporte del segmento de la corriente que representan. Para simplificar la determinación de las zonas de inundación, se creó una capa binaria donde píxeles con un valor de 1 se clasifican como inundados, mientras que píxeles con un valor de 0 se clasifican como no inundados, estos son los mapas representativos de la inundación en los resultados. Adicionalmente, los mapas de flujo superficial fueron también utilizados para determinar la extensión del evento evaluando caudales unitarios. Estos caudales unitarios son utilizados rutinariamente en el servicio nacional del estado del tiempo en los Estados Unidos (US National Weather Service) para identificar zonas de riesgo por crecientes súbitas. Un ejemplo de este producto se presenta en la *Figura 16*.

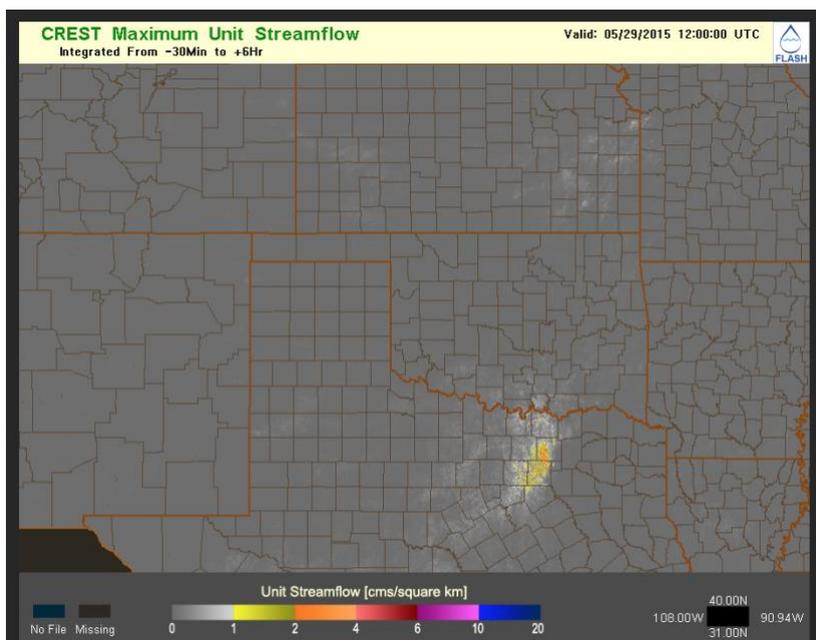


Figura 16. Caudal máximo unitario sobre Texas y Oklahoma. Fuente (OU - NOAA - CIMMS - NSSL, 2015)

Los parámetros de profundidad máxima simulada, caudal máximo y caudal máximo unitario se encuentran en el Anexo 4.

Fase 4. Evaluación de la habilidad del sistema de modelación en simular el evento

4.1. Confrontación de la modelación hidrológica con los datos de cartografía y reportes

Se hizo una comparación de las figuras obtenidas con las simulaciones realizadas incluyendo hidrogramas y mapas, versus la cartografía del evento realizada por la OCHA, los datos de las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, los reportes noticiosos de la Revista Semana, los artículos de la Universidad Nacional de Colombia y los trabajos de investigación que implican las cuencas de ríos implicados en la inundación del 2017.

Esta confrontación de datos se hace por medio de una inspección visual para describir el nivel de coincidencia que existe entre lo que representa el modelo en los mapas de inundación, los datos del IDEAM y la cartografía que registra los impactos, describiendo así, los niveles de severidad y extensión que sugieren cada una de las fuentes de información.

En síntesis, se presenta en la *Figura 17* un diagrama de las fases del proyecto:

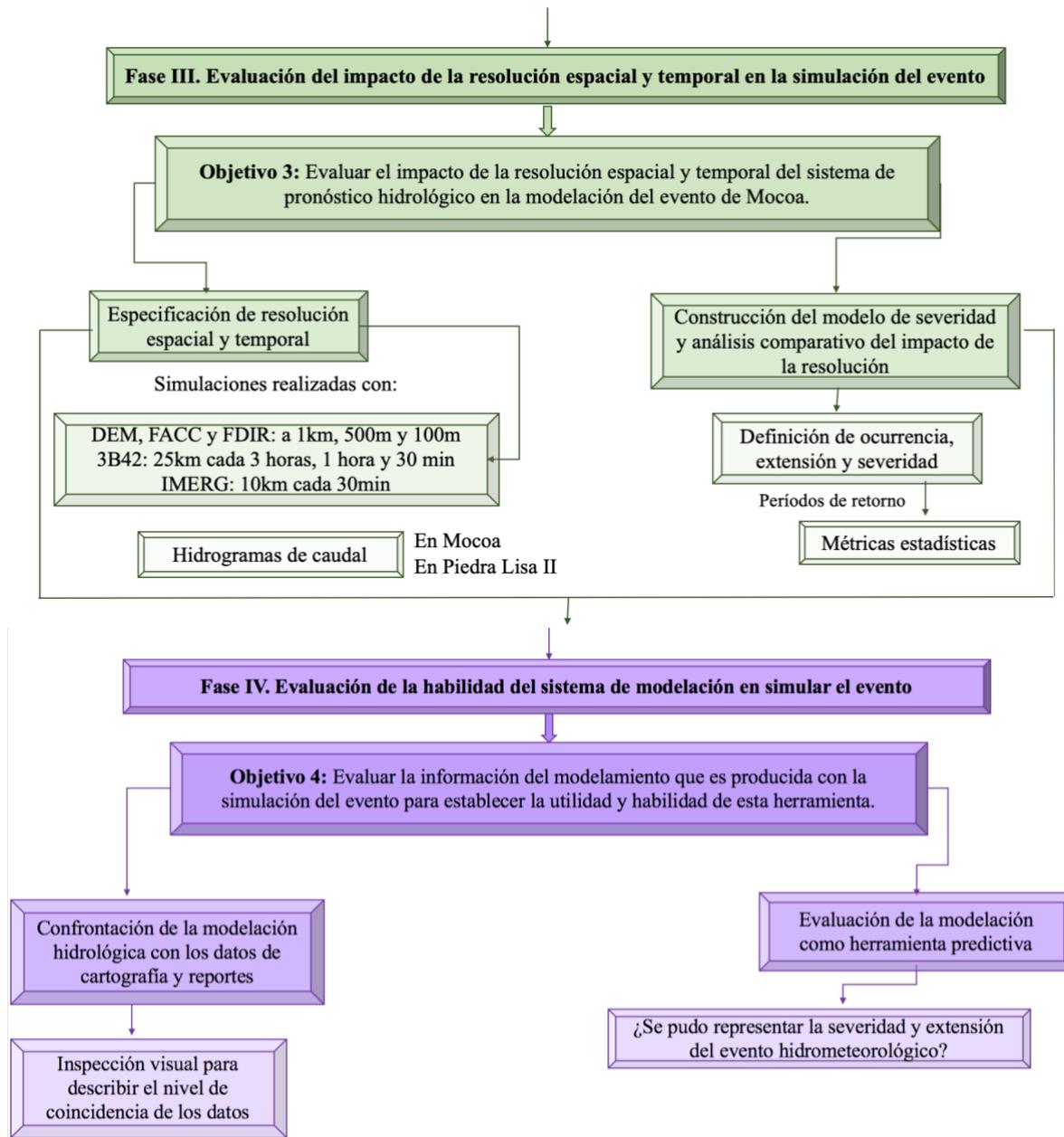


Figura 17. Esquematización del plan de trabajo. Fuente: elaboración propia.

11.2.1 Tabla metodológica

La tabla metodológica se considera un recurso importante que guía permanentemente el plan de trabajo, y así, se incorpora en el mismo, en ella se incluyen el objetivo general y los específicos, las actividades, metodología (con técnicas e instrumentos) y los resultados esperados a partir de cada objetivo específico.

Para el primer objetivo específico fue necesario cumplir con actividades como recolectar y analizar datos de precipitación de las estaciones del IDEAM que estuvieran presentes sobre el área de interés configurada para Mocoa para caracterizar ocurrencia del evento con este insumo, recopilar mapas de diferentes fuentes para compararlos con información bibliográfica y reportes noticiosos, y buscar una cartografía de impacto representativa que pudiera describir geográficamente la extensión y severidad

del evento. Estas actividades se realizaron con técnicas e instrumentos mencionados en el diseño metodológico de la investigación, y de este objetivo se espera caracterizar el evento en términos de extensión (con la cartografía de impactos), ocurrencia (con los datos del IDEAM y los reportes noticiosos), y severidad (con los mapas, valores extremos de precipitación, noticias, artículos y reportes que indicaron las áreas más afectadas).

Para el segundo objetivo específico las actividades fueron recopilar datos de entrada necesarios para configurar EF5, correr EF5 para el evento, y recolectar, procesar y analizar datos de precipitación satelital (con 3B42 y IMERG). Las técnicas e instrumentos se mencionan anteriormente (*Tabla 6*) y los resultados esperados son tener los parámetros de configuración de EF5 listos con los diferentes productos satelitales, gráficas de los productos 3B42 y IMERG, y relaciones estadísticas entre los datos de precipitación satelital y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM, para determinar la ocurrencia del evento (haciendo énfasis en la ocurrencia con la información satelital).

Para cumplir con el tercer objetivo se realizaron actividades como especificar y analizar los datos de caudal modelado a partir de las resoluciones espacial y temporal por medio de hidrogramas, construir el modelo de severidad y analizar comparativamente el impacto de la resolución (con los datos obtenidos de período de retorno) haciendo uso de mapas en la herramienta QGIS y por último comparar los valores de caudal obtenidos con EF5 y los de la estación del IDEAM haciendo uso de Excel. Lo que se espera de este objetivo es que al contar con las simulaciones a diferentes resoluciones espacio-temporales se realice el análisis correspondiente comparando hidrogramas de caudal y mapas (de período de retorno e inundación) para describir extensión, ocurrencia y severidad de la inundación.

Por último, la única actividad del cuarto objetivo fue confrontar la información obtenida por la modelación con EF5 (de período de retorno e inundación), con la obtenida por la cartografía de impactos, los artículos, investigaciones y noticias descritas y analizadas en la fase 1 de la investigación, para así estimar la capacidad del modelo para detectar la inundación. Los resultados esperados son el análisis comparativo entre los resultados de lo modelados y los registros/observaciones/reportes, y la evaluación de la información modelada para establecer su utilidad y habilidad en representar la severidad y extensión de la inundación en Mocoa.

Tabla 7. Tabla metodológica de la investigación

Objetivo		Actividad	Metodología		Resultados esperados
General	Específicos		Técnica	Instrumento	
Evaluar y describir el impacto que tiene la configuración de resolución espacial y temporal en la habilidad de un sistema de predicción basado en	Recolectar, procesar y analizar datos de precipitación, caudales, reportes de impacto y mapas que describan la extensión y severidad del impacto.	Recolectar, procesar y analizar datos de precipitación de estaciones hidrometeorológicas en tierra presentes sobre la cuenca de Mocoa.	Recolección, organización y análisis de datos presentes en bases de datos de estaciones hidrometeorológicas.	Información de caudales y precipitaciones históricas del IDEAM. Software de paquetes estadísticos (Excel).	Caracterización del evento en términos de extensión, ocurrencia y severidad, la cual será usada para satisfacer el objetivo 4.
		Recopilar mapas de diferentes fuentes para compararlos con información bibliográfica y reportes noticiosos.	Análisis de contenido de datos presentes en reportes, noticias, informes.	Reportes de impacto del evento: reportes noticiosos, artículos e investigaciones. Mapas.	

información satelital para simular la ocurrencia, extensión y severidad del evento de Mocoa en el 2017 y determinar su utilidad como herramienta de aplicación a escala nacional.		Buscar de cartografía de impacto del evento.	Análisis de contenido de la cartografía.	Cartografía de barrios afectados.	
	Configurar e implementar el sistema de modelación de EF5 con TRMM y GPM.	Recopilar datos de entrada necesarios para la configuración de EF5.	Revisión bibliográfica de configuración e implementación del modelo EF5.	Datos de precipitación satelital: 3B42 e IMERGE.	Tener la configuración del modelo EF5 lista con todos los parámetros y con los diferentes productos satelitales. Gráficas de los productos 3B42 y IMERG. Relación estadística (correlaciones, bias y dispersión) entre la precipitación satelital y la de las estaciones del IDEAM, determinando ocurrencia.
		Configurar EF5 para correrlo.	Técnica Delphi, por la indagación con expertos en el tema de modelamiento y simulaciones hidrológicas para la configuración del modelo.	Datos de entrada (a priori) para correr EF5 en mapas: DEM, FlowAcc, FlowDir, Parámetros CREST, de onda cinemática y de inundación.	
	Correr la herramienta EF5. Recolectar, procesar y analizar datos de precipitación satelital con los productos 3B42 y IMERG.	Observación sistemática y configuración del modelo con la información satelital. Organización de datos de precipitación en tablas y gráficas.	Herramienta de modelación hidrológica: EF5. Software de paquetes estadísticos (Excel y Python). Sistema de Información		

			<p>Análisis cuantitativo de los datos de precipitación del IDEAM y los obtenidos en la simulación.</p> <p>Uso de métricas estadísticas para establecer correlaciones, bias y dispersión de datos entre la información satelital y de estaciones en tierra.</p>	<p>Geográfica: ArcGIS y QGIS.</p> <p>Productos obtenidos de correr EF5: precipitación.</p> <p>Hidrogramas.</p> <p>Gráficas de dispersión.</p> <p>Tablas de correlación y bias.</p>	
<p>Evaluar el impacto de la resolución espacial y temporal del sistema de pronóstico hidrológico en</p>	<p>Especificar y analizar los datos de resolución espacial y temporal.</p>	<p>Análisis comparativo de los hidrogramas de caudal.</p>	<p>Herramienta de modelación hidrológica: EF5 y datos de entrada para correrlo.</p> <p>Datos de precipitación satelital: 3B42 e IMERGE.</p> <p>Hidrogramas.</p>	<p>Simulaciones con las diferentes resoluciones y un análisis comparativo de hidrogramas de caudal y mapas (período de retorno e inundación) entre ellas en la capacidad de cada una para describir extensión, ocurrencia y severidad.</p>	
	<p>Construir el modelo de severidad y analizar comparativamente</p>	<p>Análisis comparativo de mapas de período de retorno e inundación.</p>	<p>Software de paquetes estadísticos (Excel- Spyder):</p>		

	la modelación del evento de Mocoa.	el impacto de la resolución.		<p>períodos de retorno de caudal y gráficas correlacionales.</p> <p>Productos obtenidos de las métricas estadísticas y de EF5: períodos de retorno.</p> <p>Sistema de Información Geográfica: QGIS.</p>	
	Comparar los valores de caudal obtenidos con la simulación de EF5 a las diferentes resoluciones.	Análisis comparativo del impacto de la resolución sobre los valores de caudal simulados.	Análisis de gráficas de dispersión y correlaciones.	<p>Valores de caudal simulados con EF5.</p> <p>Software de paquetes estadísticos (Excel) para producir hidrogramas de caudal.</p>	

	<p>Evaluar la información del modelamiento que es producida con la simulación del evento para establecer la utilidad y habilidad de esta herramienta.</p>	<p>Confrontar la información obtenida por la modelación hidrológica, con la obtenida de la cartografía y los reportes noticiosos y estimar la capacidad del modelo para detectar la inundación.</p>	<p>Análisis del contenido de la modelación y de los reportes noticiosos y mapas.</p>	<p>Productos obtenidos de las métricas estadísticas y de EF5: períodos de retorno e inundación. Cartografía de impactos: barrios afectados por la inundación. Reportes noticiosos que indiquen extensión y severidad del evento.</p>	<p>Análisis de contraste entre los resultados de lo modelado y los registros/observaciones/reportes. Evaluación de la información modelada para establecer si es hábil, útil y si pudo haber representado la severidad y extensión del evento hidrometeorológico de Mocoa.</p>
--	---	---	--	--	---

Fuente: elaboración propia.

12. Resultados & Análisis

Fase I. Recolección de información para caracterizar el Evento de Mocoa

Reportes

Son presentados a continuación los artículos, reportes noticiosos y cartografía encontrada completamente relacionada con el desastre de Mocoa. Se documentó sobre el artículo Tragedia en Mocoa, cifras de la avalancha de la Revista Semana (*Euscátegui, 2017*), debido a la gran cantidad de información tanto de la tragedia, como de cifras de precipitación que se presenta. En el artículo se encuentra el número de defunciones, desaparecidos, afectados, los funcionarios implicados en el rescate y entrando en materia del evento hidrometeorológico, incluye el mapa de los ríos desbordados: Mocoa, Mulato y Sangoyaco (ilustrado anteriormente en la *Figura 9*). Con un ancho de 200m y pudiendo crecer hasta 500m durante una avenida torrencial, el río Mulato se considera de gran influencia cuando hay crecientes (*Vargas Cuervo, 2017*), lo cual permite tener un primer acercamiento a la extensión del desastre. Se encuentran descritas algunas de las razones por las cuales se desbordaron los ríos, entre las que se incluyen el uso inadecuado del suelo y la deforestación. De igual manera, como se menciona en capítulos anteriores, brinda los datos de la precipitación total del evento, 129mm, con un pico clave de 3 horas, que es una cifra comparable únicamente con un registro del año 1982 en el que llovieron 152mm en un día, pero no dio lugar a un desastre pues no había tanta deforestación ni se concentró la lluvia en un período tan corto de tiempo. Por último, este artículo contiene un dato muy importante: se sugiere que el período de retorno de esa lluvia intensa fue de 25 años.

Dentro de la búsqueda también destacan dos artículos de la Universidad Nacional (*Vargas Cuervo, 2017; Universidad Nacional de Colombia, 2017*) en el que Germán Vargas Cuervo, profesor del Departamento de Geografía, indica que en la parte alta de la cuenca del río Mocoa, los ríos Mulato y Sangoyaco, ubicadas a menos de 30km de la población, produjeron deslizamientos que contribuyeron al desastre, aumentando la severidad de lo ocurrido, lo que se demuestra con la presencia de restos de árboles en el trayecto de la avenida torrencial. Además de esto, Vargas, explica que la zona en donde se está reconstruyendo Mocoa se presentan alertas de posibles nuevos desastres por procesos torrenciales, geomorfológicos y morfodinámicos que son propios de las cuencas implicadas en el desastre y se muestran en la *Figura 18*.

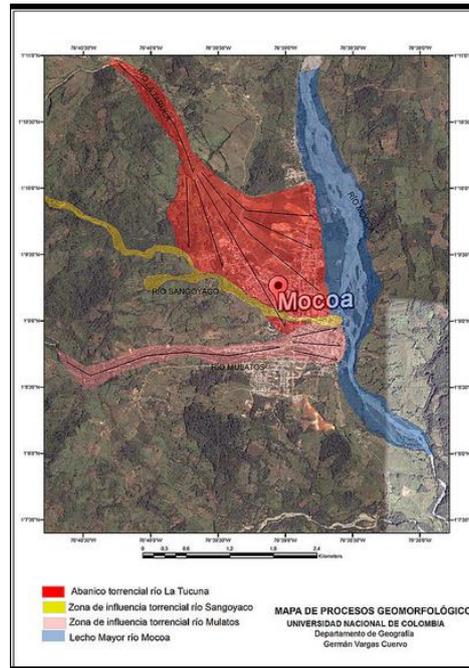


Figura 18. Mapa de procesos geomorfológicos en la zona de Mocoa Putumayo. Fuente (Universidad Nacional de Colombia, 2017)

Son presentados ahora, trabajos de investigación asociados a las cuencas implicadas en el desastre, contribuyentes al área de extensión del desastre y la posibilidad de ocurrencia que existe en estos sitios. Por una parte, está el estudio mencionado por Romo (2015) titulado Estimación del riesgo por inundación en la ribera del Río Mulato (Mocoa-Colombia), en el cual se ve la zona de vulnerabilidad por las viviendas localizadas en las rondas hídricas del río Mulato, zona que fue afectada notablemente en la inundación del 2017. También está un estudio de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de Mocoa (Jojoa, 2003), el cual presenta un mapa de amenazas por inundación, ilustrado en la Figura 19, y que incluye las áreas que fueron impactadas en el desastre a causa del desbordamiento de los tres ríos.

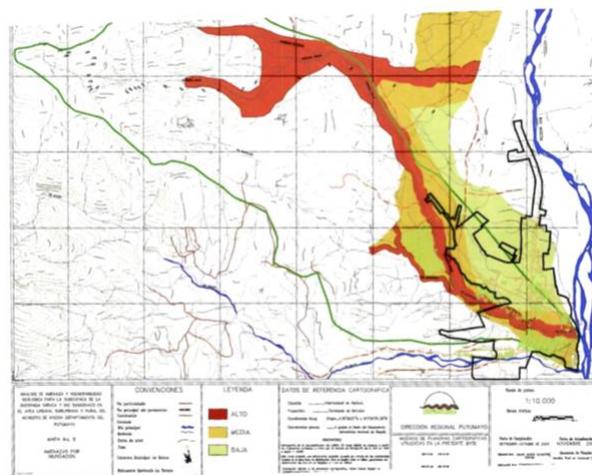


Figura 19. Zonas de amenaza por inundación en Mocoa. Fuente: (Jojoa, 2003)

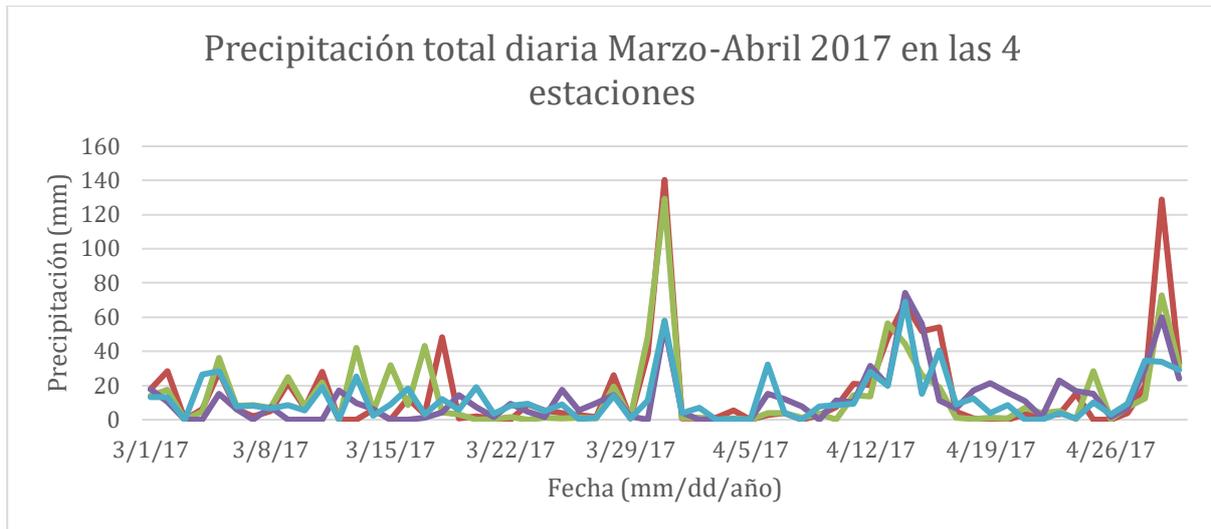


Figura 21. Precipitación total diaria de los meses marzo y abril del 2017 en las estaciones Mocoa Acueducto (color verde), Campucana (color rojo), Patoyaco (color morado) y Minchoy (color azul). Fuente: elaboración propia

Analizando la información obtenida, se observó en las cuatro estaciones 3 picos de precipitación que superan los 50mm en un solo día, el primer pico corresponde a la tormenta ocurrida entre el 31 de marzo y el 1 de abril que es aquella que los reportes noticiosos y artículos soportan, demostrando así que el evento sucedió, es decir, representando su ocurrencia; fue registrado por las estaciones y tuvo una severidad alta, por su valor tan elevado sobre los demás en el período de tiempo de los dos meses, alcanzando los 140mm para la estación Campucana y 129mm para Mocoa Acueducto. Los otros dos picos representan lluvias intensas sobre las estaciones, pero no desencadenaron ningún tipo de desastre, esto puede ser debido a que la lluvia que cayó la noche del desastre se concentró en un pico clave de 3 horas (Euscátegui, 2017) mientras que las registradas en el mes de Abril no tuvieron esta particularidad.

Fase 2. Configuración del modelo hidrológico con lluvia satelital

Configuración EF5

Contando con los datos de la cuenca seleccionada, el DEM, FACC y FDIR, se consideran ahora parámetros adicionales requeridos para correr la herramienta EF5. Son ilustrados en la Figura 22 los parámetros del modelo hidrológico CREST, en las Figuras 23, 24 y 25 los parámetros de onda cinemática para el enrutamiento de flujo superficial, y se incluyen también los parámetros necesarios adicionales para simular la inundación sobre la cuenca en las Figuras 26, 27 y 28; los parámetros de CREST se presentan a una resolución de 1km para todas las simulaciones, mientras que los de onda cinemática, se encuentran para las 3 resoluciones a comparar (1km, 500m y 100m), igual que los parámetros canalizados para la inundación.

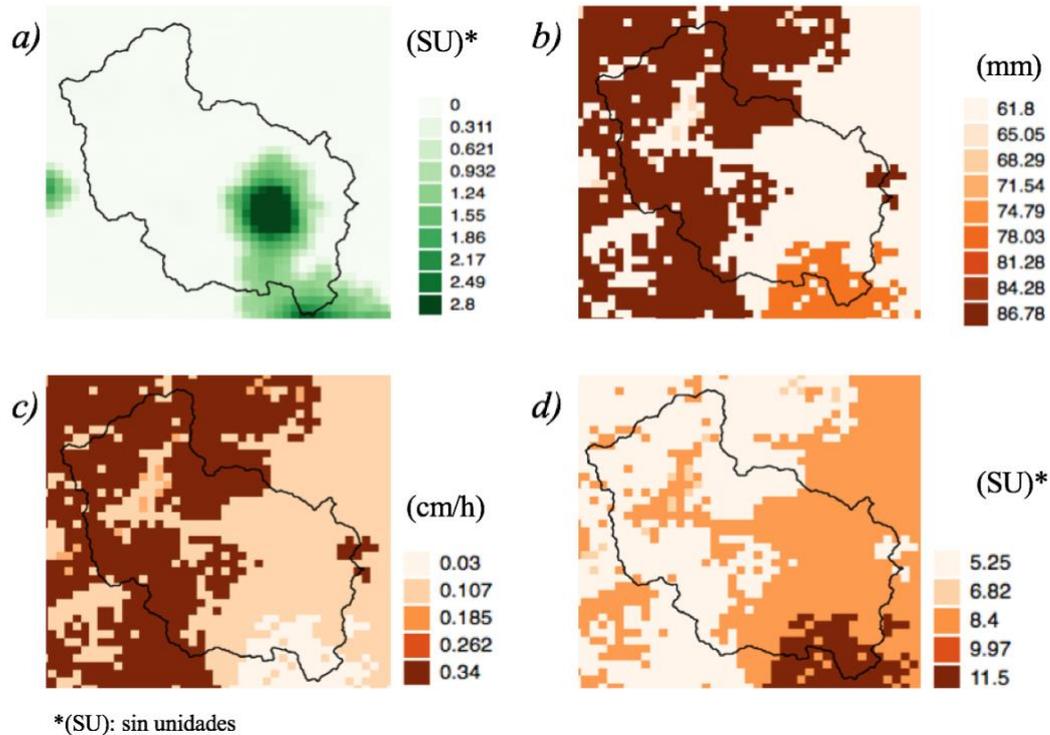


Figura 22. Parámetros del balance hídrico CREST; a) Fracción impermeable del suelo (IM), b) Capacidad máxima de retención de agua en el suelo (WM), c) Conductividad hidráulica saturada (Ksat), d) Exponente de la curva variable de infiltración b. Fuente: elaboración propia,

Analizando la *Figura 22* a nivel general, es apreciable que en la zona occidental de la cuenca predominan los valores más altos de capacidad de retención de agua, parámetro relacionado con la porosidad del suelo y de conductividad hidráulica, lo cual es congruente con las características de vegetación y suelos de esa zona, que son franco gravillosos, arcillo arenosos, y con abundante capa vegetativa natural, los suelos francos y arenosos son característicos por tener una alta permeabilidad. Observando la *Figura 22a*, se puede distinguir un valor mucho más alto que los demás de fracción impermeable del suelo, precisamente sobre el área que cubre la zona urbana de Mocoa, como se observa en las *Figuras 8* y *9*; esto indica que este parámetro de CREST, a pesar de tener una resolución no muy alta, es capaz de determinar sobre la cuenca en que sitio el suelo tiene comportamiento impermeable, que se debe al concreto y las edificaciones que hay en el municipio, mientras que en las zonas lejanas a la urbanización, las rurales, el suelo tiene una permeabilidad mucho más alta, pues el suelo ha sido menos intervenido por las personas y aún posee sus características naturales de bosque denso y herbazales (*Rojas, 2015*).

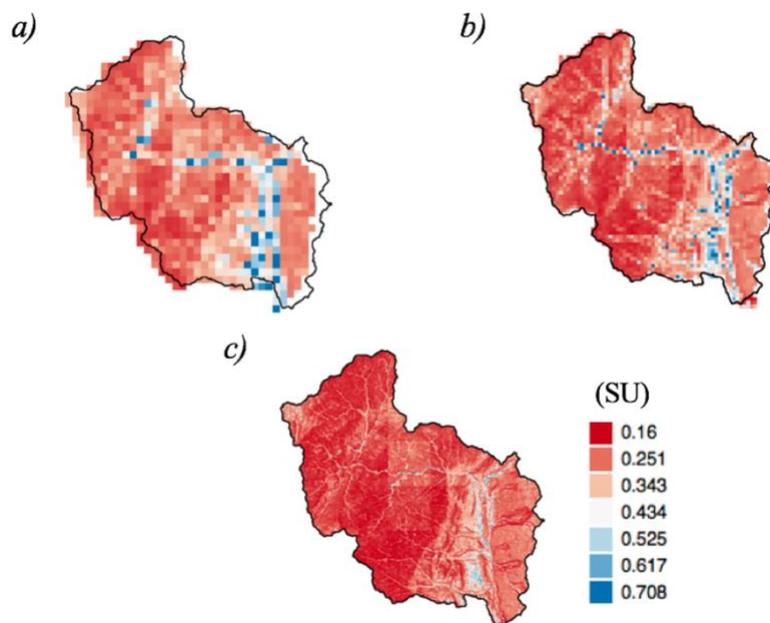


Figura 23. Parámetro Alpha superficial α_0 de onda cinemática para el enrutamiento de flujo superficial; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

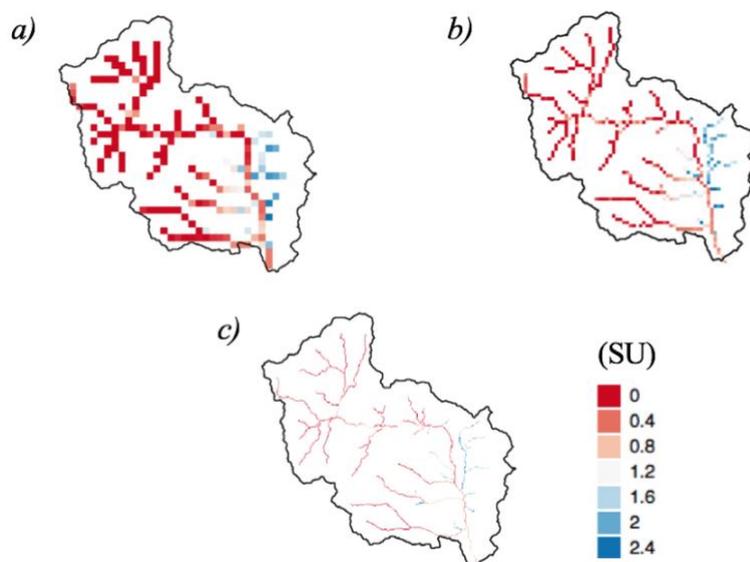


Figura 24. Parámetro Alpha canalizado (α) de onda cinemática para el enrutamiento de flujo superficial; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

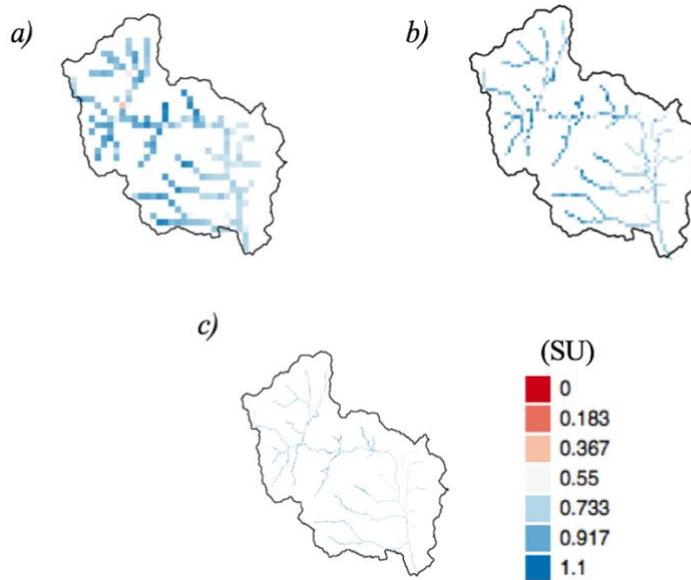


Figura 25. Parámetro Beta (β) canalizado de onda cinemática para el enrutamiento de flujo superficial; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

Al combinar la rugosidad del suelo con información de la pendiente del terreno, el parámetro Alpha 0 (Figura 23) define las velocidades del agua cuando corre sobre la tierra, haciéndola diferente en distintos puntos de la cuenca dado que el uso del suelo es variado en ella. Para las 3 resoluciones son congruentes los valores Alpha 0: en las zonas que tienen cobertura vegetal sobre la cuenca se observan los valores más bajos del parámetro, lo que conlleva a velocidades menores de flujo mientras que los valores más altos se ven directamente sobre la ronda de los ríos. En las Figuras 24 a 27, los parámetros alpha y beta corresponden a la geometría de los canales de los ríos, son parámetros de la corriente pertenecientes a la Ecuación 1 de caudal expresada en la metodología, aumentando o disminuyendo la velocidad de la onda de inundación; se observa para todas las resoluciones valores similares dentro de los flujos de los ríos, donde a valores más altos de alpha e intermedios de beta, se diferencia de los demás drenajes, el río Mocoa.

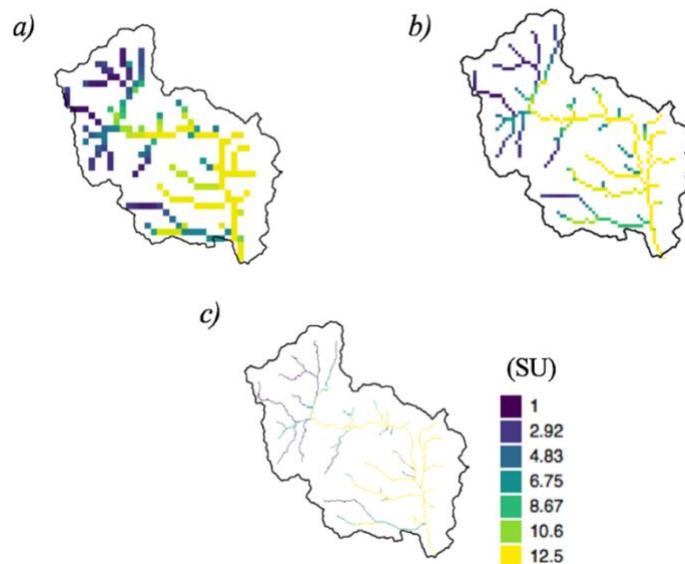


Figura 26. Parámetro Alpha (α) canalizado para la simulación de la inundación; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

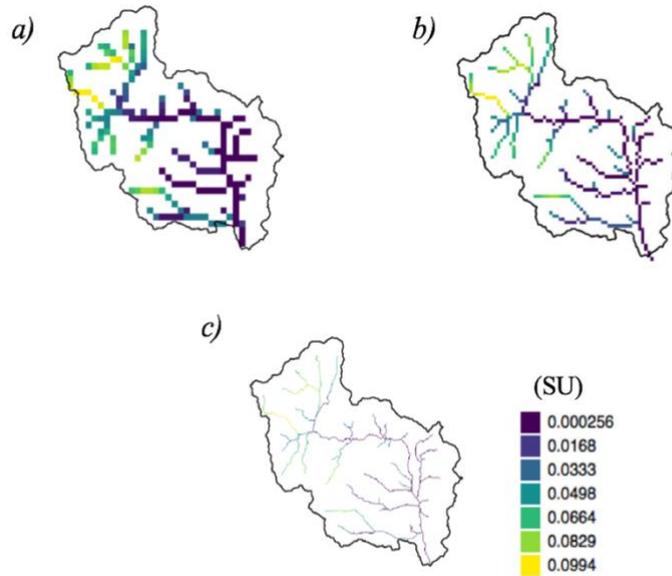


Figura 27. Parámetro Beta (k) canalizado para la simulación de la inundación; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

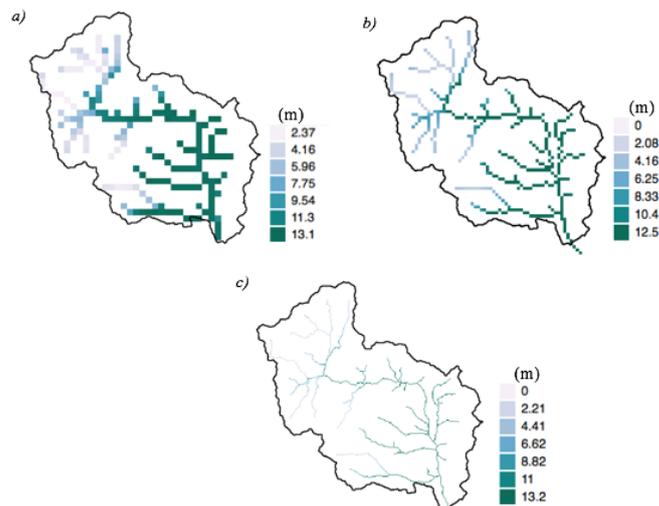


Figura 28. Parámetro Profundidad máxima de banco; a) 1km, b) 500m, c) 100m. Fuente: elaboración propia.

El parámetro de profundidad máxima de banco es insumo necesario para producir los mapas de inundación en la fase siguiente, con él, se puede observar que para las 3 resoluciones la profundidad es muy similar.

Productos de precipitación satelital

Se realizó la comparación de las series de tiempo obtenidas de las simulaciones del evento, de la precipitación (3B42 y de IMERG) y el caudal, específicamente (entre el 31 de marzo y el 2 de abril del 2017). Se observan en la Figura 29 las gráficas obtenidas de estos datos:

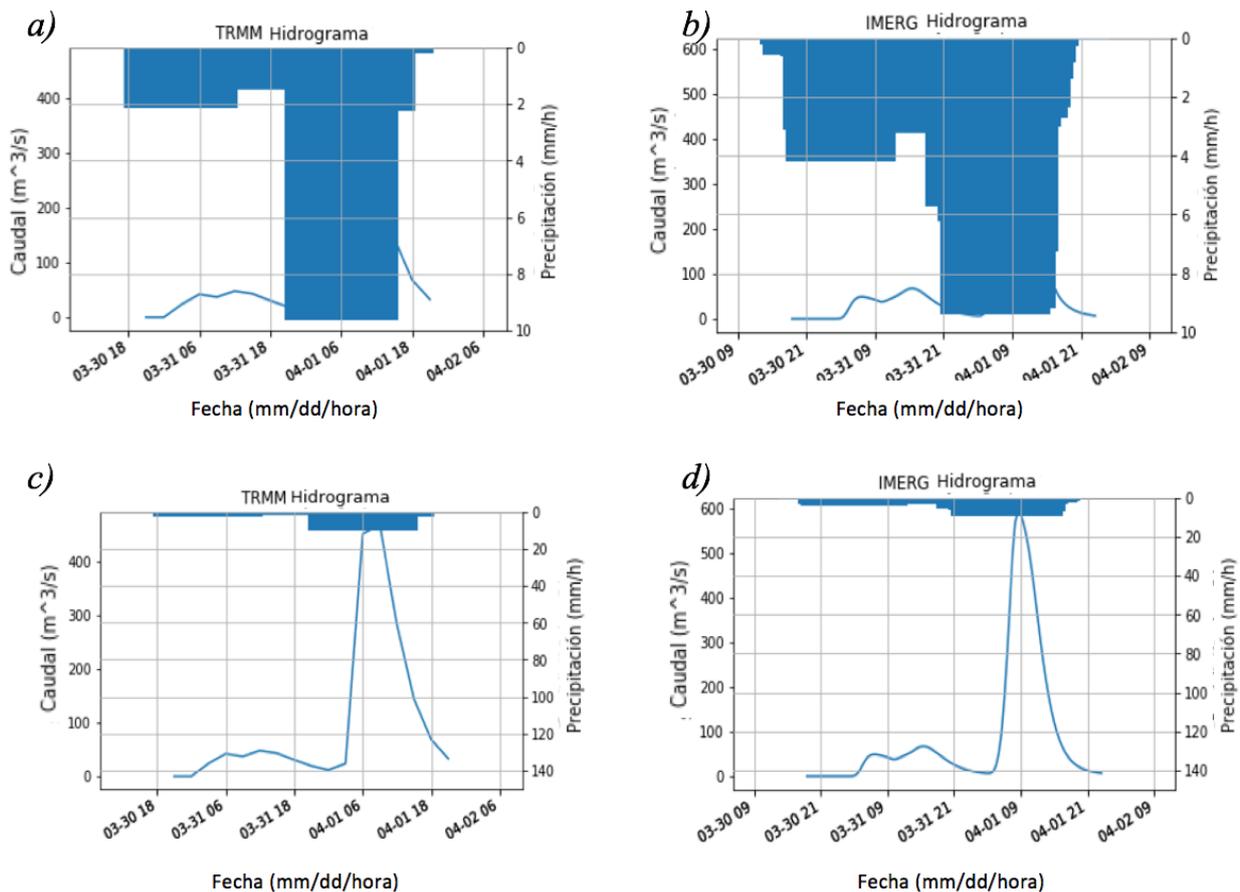


Figura 29. Comparación del evento con los productos 3B42 e IMERG en hidrogramas; a) Producto 3B42 con énfasis en precipitación, b) Producto IMERG con énfasis en precipitación, c) Producto 3B42 con énfasis en caudal, d) Producto IMERG con énfasis en caudal. Fuente: elaboración propia.

Se observa que los datos de la simulación realizada con IMERG describe la evolución temporal del evento con mayor refinamiento, pues hay una mayor cantidad de datos dada su resolución temporal de 30 minutos; es apreciable de igual manera, que los datos de 3B42 y de IMERG están relacionados y que son capaces de representar efectivamente la ocurrencia de la inundación, por sus valores elevados tanto de caudal como de precipitación en la fecha que se reporta del evento de la madrugada del 1 de abril. Dadas las lluvias causantes de la inundación es posible observar la respuesta de la cuenca observada en el modelo por los valores de caudal en el mismo período de tiempo.

La Figura 30 presenta las gráficas de dispersión entre las precipitaciones de los 2 productos satelitales y en la Tabla 8 se encuentran los valores de correlación haciendo uso de la Ecuación 3. Se ve una correlación fuerte entre los dos productos en cada una de las estaciones, pues tienen valores cercanos a 1. Esto está directamente relacionado con el hecho de que IMERG es un producto desarrollado con base en los estudios de aplicación de TRMM.

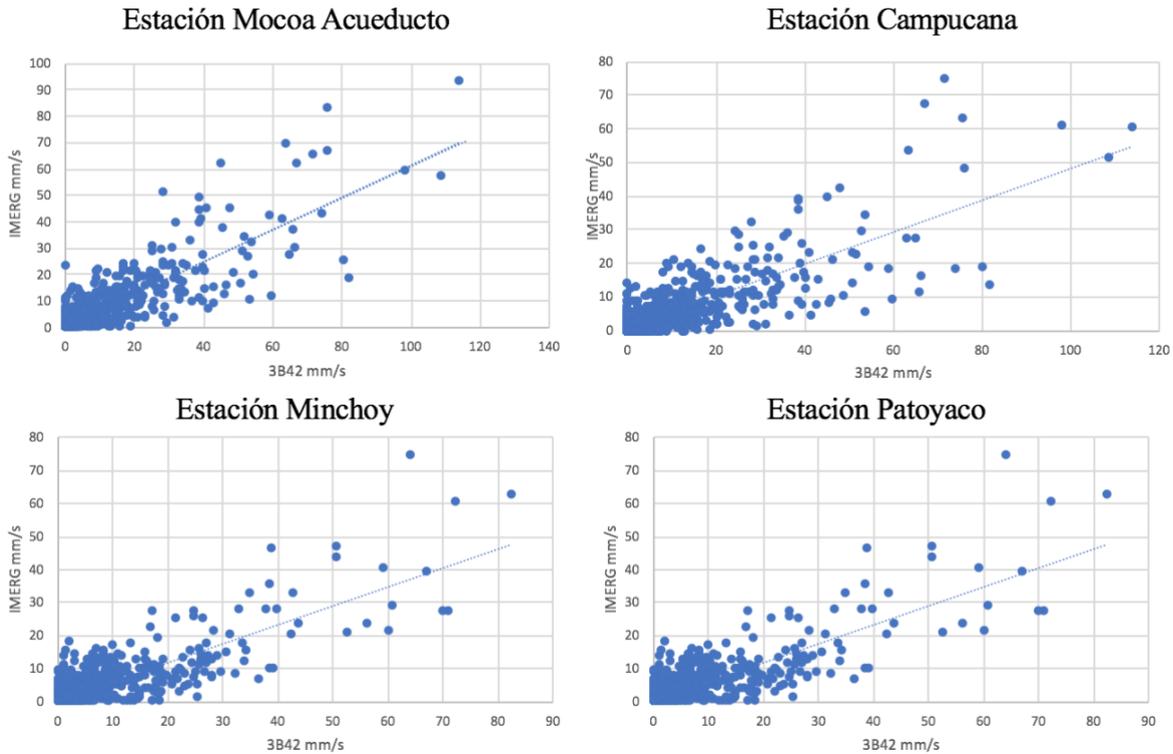


Figura 30. Gráficas de dispersión entre la precipitación de los productos satelitales 3B42 y IMERG en las 4 estaciones. Fuente: elaboración propia.

Tabla 8. Valores de correlación de los productos satelitales 3B42 y IMERG en las 4 estaciones

Estaciones	Valor de correlación
Mocoa Acueducto	0.85
Campucana	0.82
Minchoy	0.84
Patoyaco	0.84

Fuente: elaboración propia.

Con el fin de evaluar las estimaciones de precipitación de los productos satelitales, se realizaron gráficas de dispersión usando los datos del IDEAM para el período del 2014 al 2016. Para el caso del producto de 3B42, por tener una resolución espacial gruesa (25km), sobre la cuenca se ven reflejados únicamente 4 píxeles como se aprecia en la Figura 31. Al estar varias estaciones dentro de un mismo píxel se hacen las gráficas y correlaciones entre la precipitación satelital y los promedios entre los datos de las estaciones. Similarmente, para el producto de IMERG (10km) se reflejan 12 píxeles, como se observa en la Figura 32.

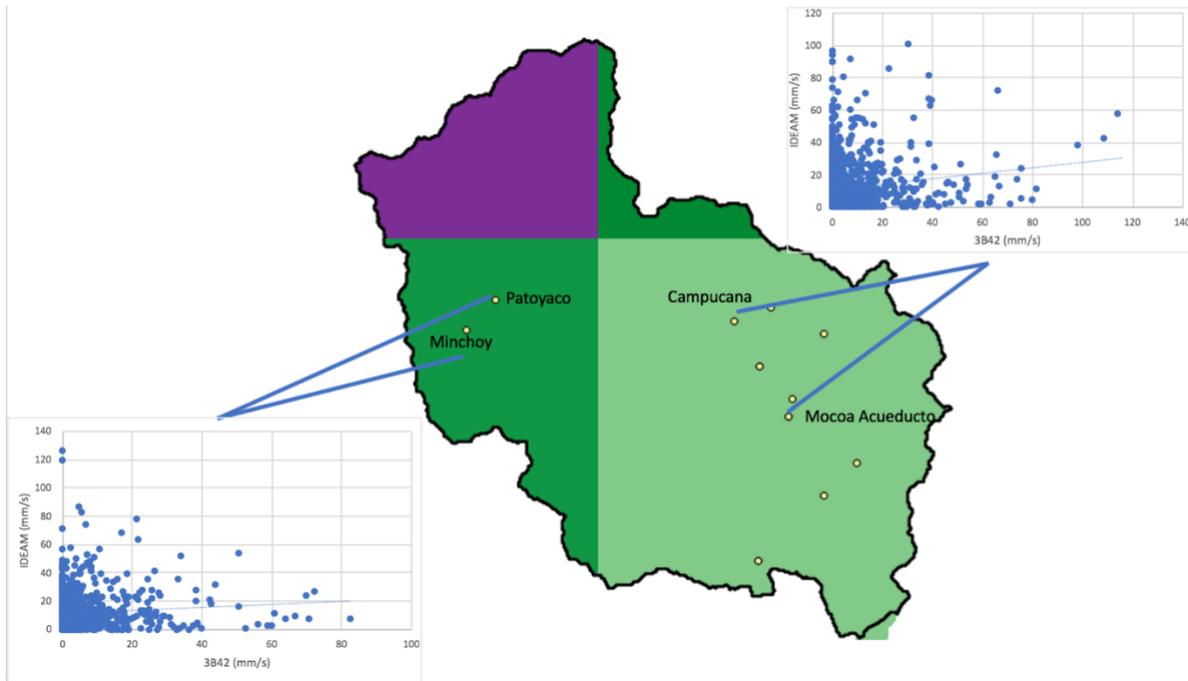


Figura 31. Correlaciones entre 3B42 y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. Fuente: elaboración propia.

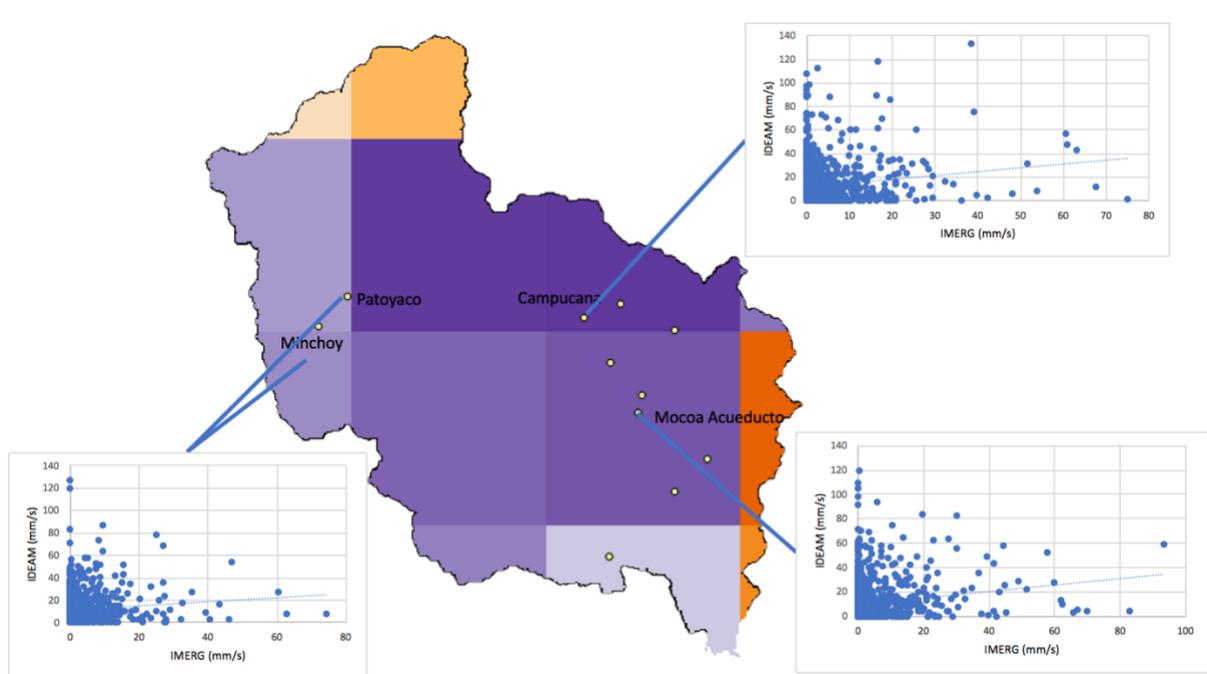


Figura 32. Correlaciones entre IMERG y las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM. Fuente: elaboración propia.

Para evaluar estadísticamente las estimaciones de precipitación, se aplicaron las métricas de Sesgo (Bias) y correlación, descritos en las Ecuaciones 2 y 3. Para la comparación entre los productos satelitales 3B42 e IMERG y las estaciones Mocoa Acueducto, Campucana, Minchoy y Patoyaco, cabe resaltar que se comparan las estaciones que están dentro de un mismo píxel, con los productos satelitales correspondientes, se aplicaron las fórmulas y fueron obtenidos los siguientes valores:

Tabla 9. Valores obtenidos de Bias y Correlación entre las estaciones hidrometeorológicas y los productos satelitales

Estaciones	Producto satelital	Bias	Correlación
Mocoa Acueducto y Campucana	3B42	-40.9357	0.1474
Minchoy y Patoyaco	3B42	-60.6680	0.07774
Mocoa Acueducto	IMERG	-56.2884	0.1614
Campucana	IMERG	-68.3344	0.1500
Minchoy y Patoyaco	IMERG	-72.9086	0.0919

Fuente: elaboración propia.

La correlación y el sesgo entre los productos satelitales y las estaciones no es ideal pues se obtienen valores lejanos al 1 y 0 respectivamente. Las gráficas de dispersión en las Figuras 31 y 32 muestran una alta dispersión y grado de no linealidad en las estimaciones satelitales con respecto a las observaciones del IDEAM, lo cual evidencia la incertidumbre existente en estos productos. Estos resultados son consistentes con lo reportado por autores como Dinku, Ruiz, Connor, & Ceccato (2010), dado que en su estudio de validación y comparación de estimados satelitales sobre Colombia comparan 6 productos satelitales con cerca de 600 estaciones del IDEAM; uno de estos productos es 3B42 y al compararlo con los datos del IDEAM si bien presenta un valor de correlación de 0.62, tiene un gráfico de dispersión similar al obtenido en este estudio. De igual manera, corroborando la habilidad de los productos satelitales con información del IDEAM, el estudio de (Jurado, y otros, 2017) sobre la cuenca del Río Bogotá, presenta también una dispersión alta sobre la cuenca, lo que indica incertidumbre considerable con el uso del producto 3B42, y que los productos satelitales tienen limitaciones al momento de resolver la variabilidad del fenómeno de precipitación a corto plazo.

Fase 3. Evaluación del impacto de la resolución espacial y temporal en la simulación del evento

3.1 Especificación de resolución espacial y temporal

Al correr la simulación en EF5 para el evento haciendo uso de los respectivos DEM, FACC y FDIR, a las resoluciones de 1km, 500m y 100m, junto con los parámetros mencionados en la fase anterior para la configuración, se obtuvieron las series de tiempo con los datos de caudal modelados en respuesta a la precipitación registrada para los dos puntos de la cuenca: Mocoa y Piedra Lisa II con áreas de 640km² y 330km² respectivamente, ilustrados en la Figura 33.

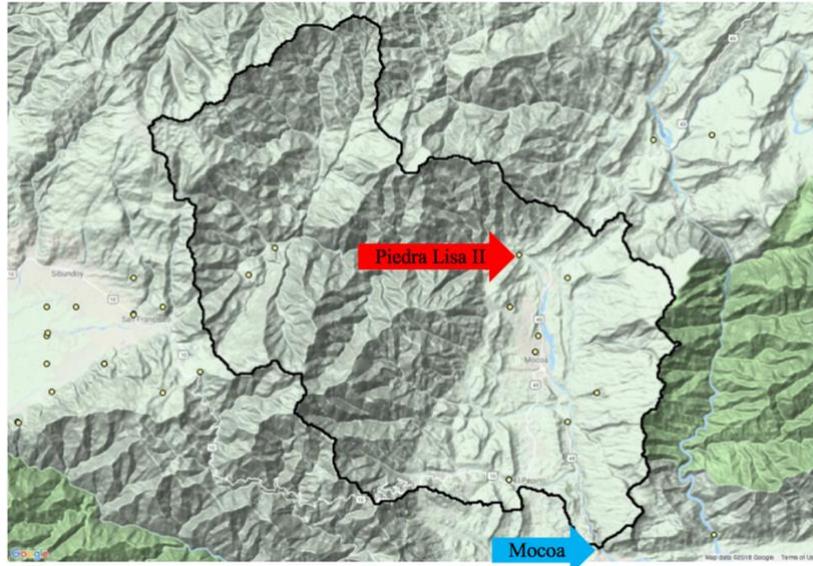
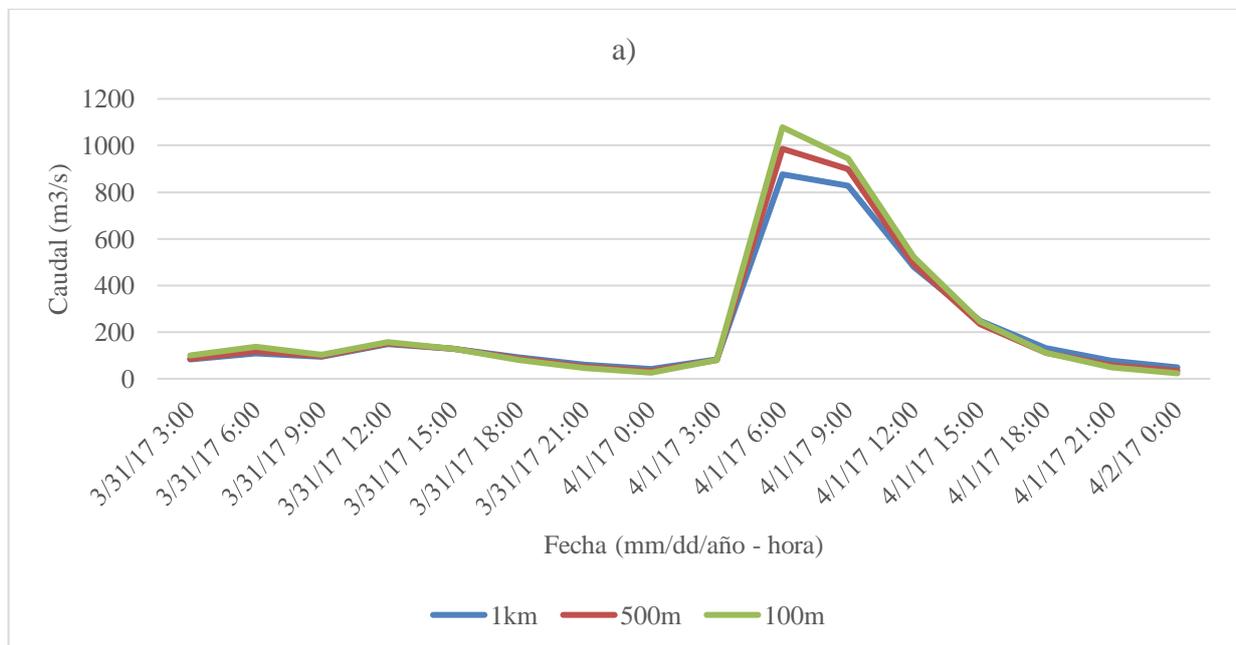


Figura 33. Puntos donde se examinaron las simulaciones de caudal. Fuente: elaboración propia.

Los hidrogramas realizados para comparar la resolución espacial se muestran a continuación (Figuras 34 a 36). Es importante recalcar que las gráficas con el producto 3B42 tienen una temporalidad de 3 horas, mientras que IMERG tiene una temporalidad de 30 minutos. El evento fue simulado iniciando a las 03:00 del 31 de marzo y concluyendo a las 00:00 del 2 de abril.



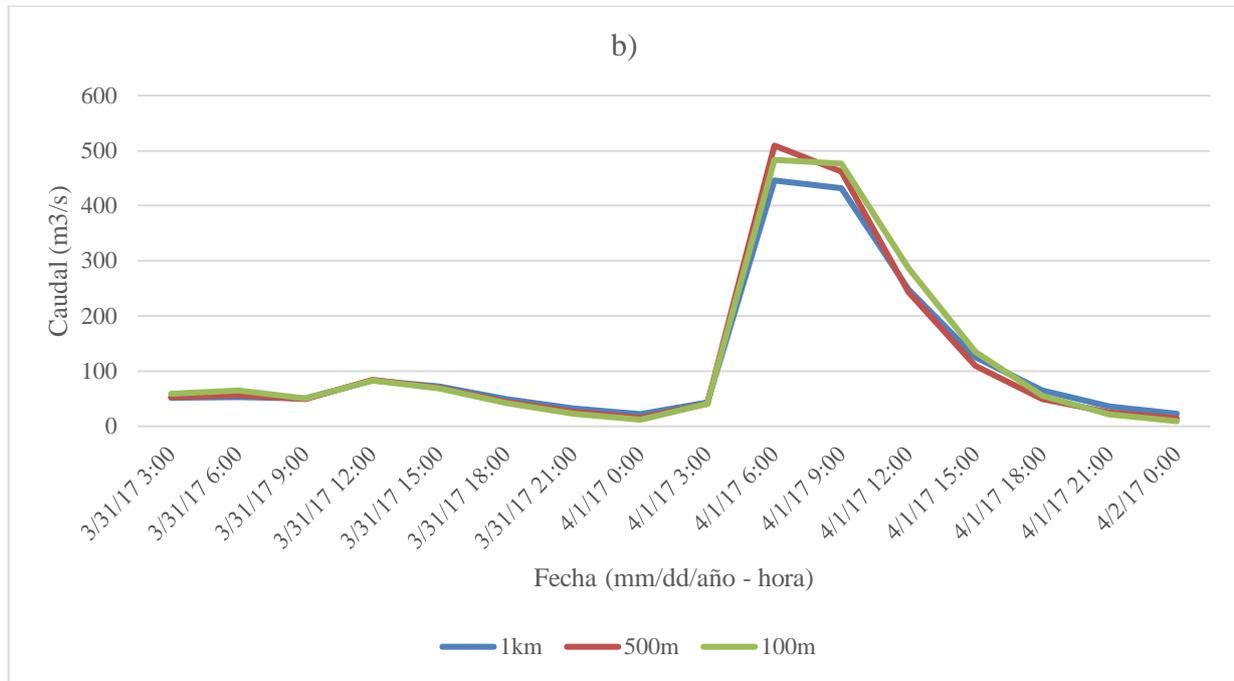


Figura 34. Hidrograma de caudales con 3B42 con respecto a resoluciones espaciales; a) En Mocoa, b) En Piedra Lisa II. Fuente: elaboración propia.

En este primer conjunto de gráficas obtenidas con el producto 3B42, la *Figura 34a* refleja una ligera diferencia en los resultados de caudales para el área total de la cuenca. Los valores entre las 03:00 del 31 de marzo y las 03:00 del 1 de abril son bastante similares, a partir de allí, se dispara el caudal a un valor muy alto demostrando la habilidad de la simulación de representar la respuesta directa a la precipitación y por ende la ocurrencia del evento; esta información es congruente con los reportes noticiosos que indican que el desastre ocurrió en horas de la madrugada. Los valores superan los $800\text{m}^3/\text{s}$ a 1km, los $900\text{m}^3/\text{s}$ a 500m y los $1000\text{m}^3/\text{s}$ a 100m, indicando así un incremento en el valor de caudal para cada una de las resoluciones, debido a que la resolución influencia la velocidad de los flujos superficiales, y por ende los picos de los caudales. El caudal y la resolución espacial tienen una relación directamente proporcional, es decir, a una mayor resolución espacial, mayor la velocidad de flujo y mayores los valores en los picos.

La *Figura 34b*, presenta valores de caudal menores que los del punto de Mocoa (*Figura 34a*), pues se encuentra aguas arriba del drenaje y cubre un área mucho menor. Los valores de las 03:00 del 31 de marzo a las 03:00 del 1 de abril son muy cercanos para las 3 resoluciones. De la misma manera que en la figura anterior, posterior a este período de tiempo se observa el pico referente al evento de inundación con valores superiores a $400\text{m}^3/\text{s}$ para 1km, y cercanos a $500\text{m}^3/\text{s}$ para 500m y 100m. Los valores de caudal se mantienen elevados por un mayor lapso de tiempo para 100m, mientras que para 500m se observa un pico máximo a las 6:00, a partir de las 09:00 comienzan a disminuir casi tan abruptamente como aumentaron.

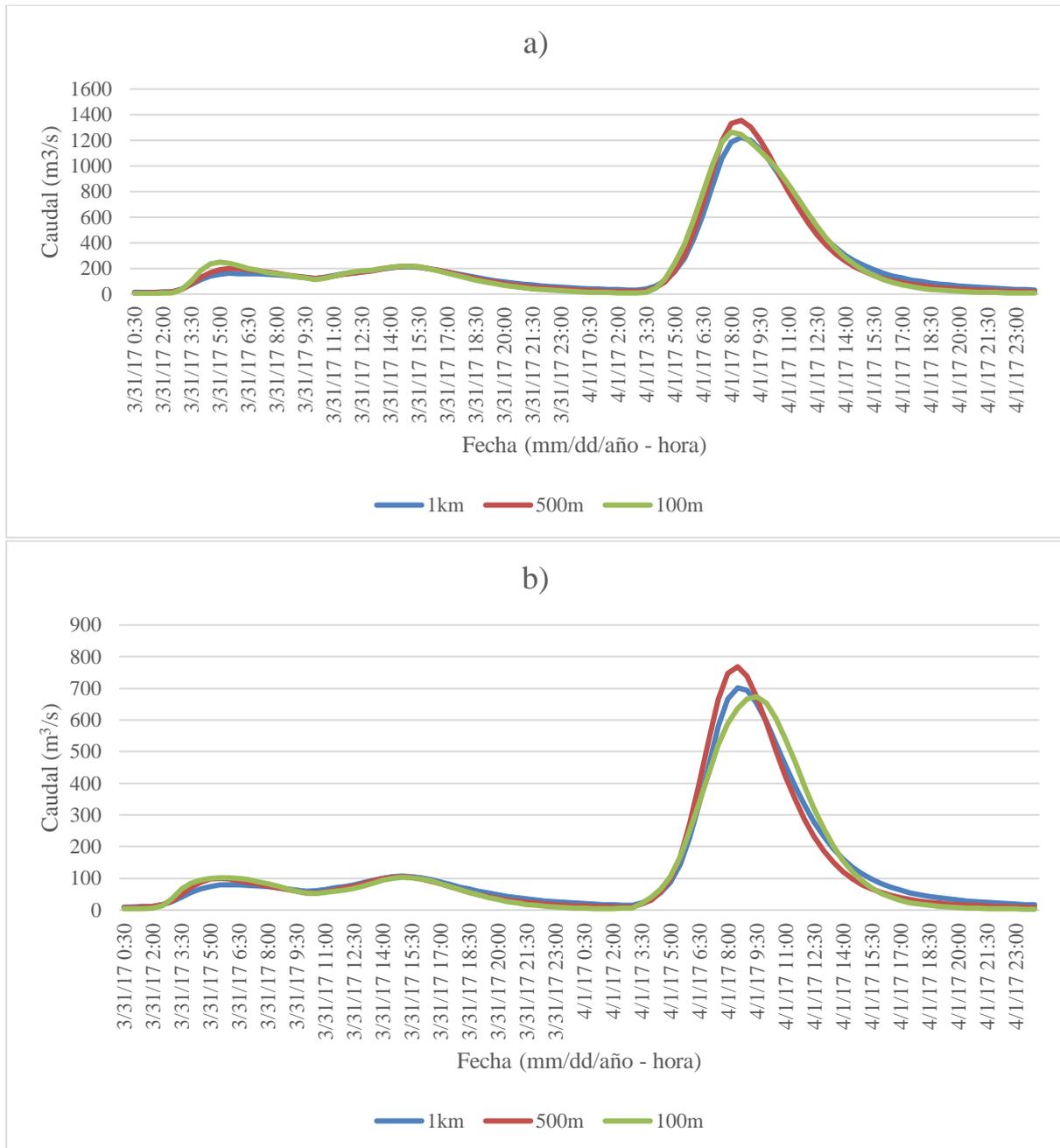


Figura 35. Hidrograma de caudales con IMERG con respecto a resoluciones espaciales; a) En Mocoa, b) En Piedra Lisa II. Fuente: elaboración propia.

Con respecto a los hidrogramas obtenidos con IMERG, debido a que este producto posee una temporalidad mayor que 3B42, se observa un trazo más fino sobre las gráficas y unas diferencias en los valores de caudal más notorias entre las resoluciones, sin implicar que sean valores muy alejados unos de otros. El pico clave del evento en Mocoa con este producto sucede alrededor de las 08:30 y 09:00 del 1 de abril, iniciando el aumento de caudal a las 03:30 hasta las 17:00, momento en que el caudal toma los valores usuales que traía antes del evento. En el punto Mocoa (Figura 35a) el caudal alcanza valores de 1200m³/s a 1km y 100m, y un valor de casi 1400m³/s a 500m, valores similares al obtenido con 3B42 a 100m (Figura 34a). El crecimiento en la curva se ve de manera menos abrupta que con 3B42, pues dada la recurrencia de los datos se puede ver un incremento en los valores más fino para las 3 resoluciones.

Para el punto de Piedra Lisa II, la *Figura 35b* muestra la sutil diferencia que hay especialmente el 31 de marzo desde las 00:30 hasta las 08:00 en los valores de caudal; el caudal en este intervalo de tiempo incrementa su variación conforme la resolución es más cercana al terreno. El pico clave de la inundación igual que en Mocoa, resulta alrededor de las 08:30 a 1km y 500m y a las 09:30 a 100m, unas dos horas más tarde que para los datos obtenidos con 3B42. El valor máximo es alcanzado en la resolución de 500m con 770m³/s, un valor mayor que el obtenido con 3B42 con las 3 resoluciones para esta área. Dado que la recurrencia es mayor y la resolución son mayores, es obtenido este valor alto de caudal, el cual puede considerarse representativo de la severidad y ocurrencia del evento.

Los hidrogramas siguientes fueron realizados para comparar la resolución temporal (3 horas, 1 hora, 30 minutos) a una resolución única espacial de 100m, haciendo uso del producto 3B42:

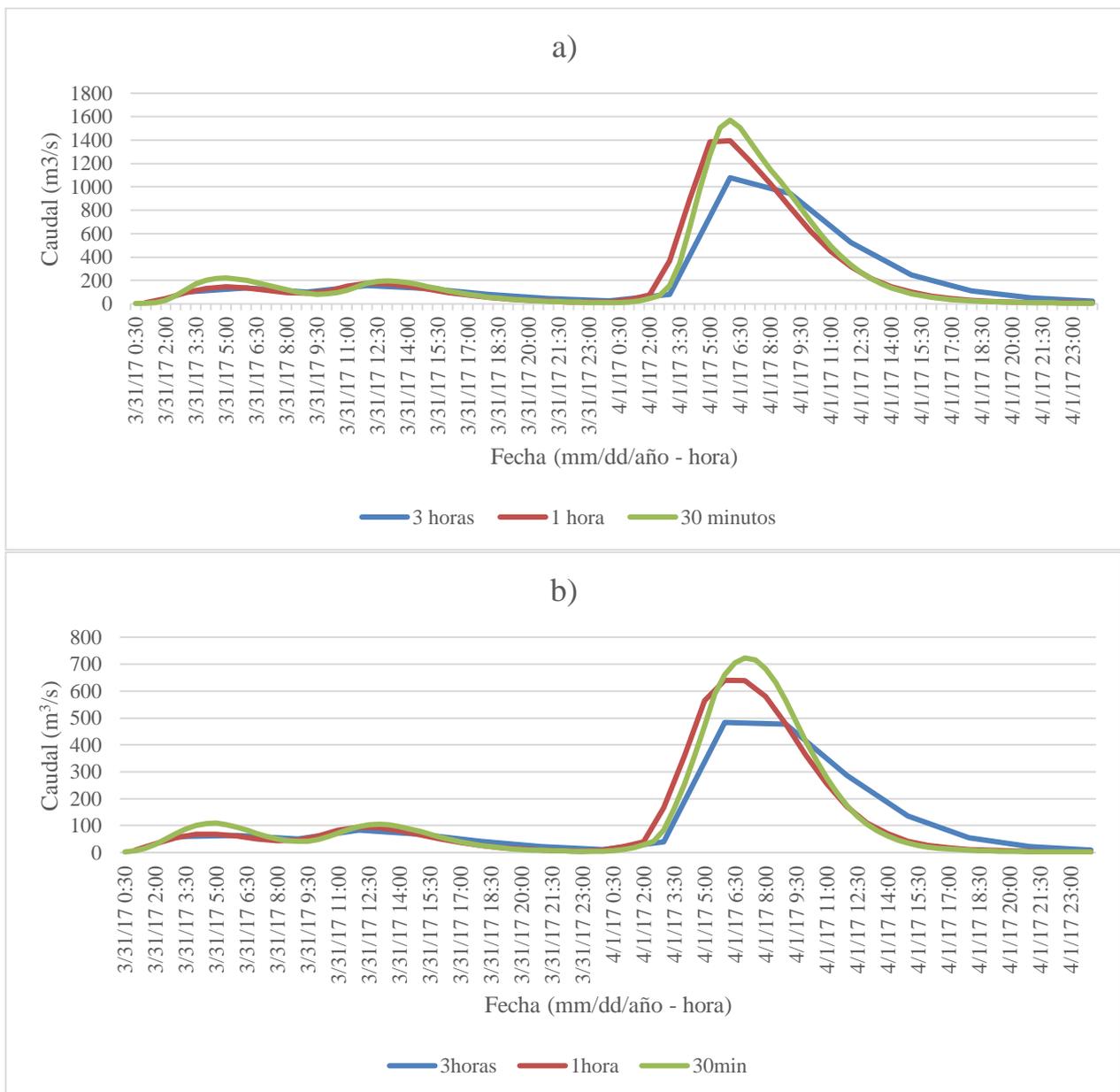


Figura 36. Hidrograma de caudales con 3B42 con respecto a resoluciones temporales; a) En Mocoa, b) En Piedra Lisa II. Fuente: elaboración propia.

En la *Figura 36a* los valores máximos de caudal obtenidos para Mocoa fueron aproximadamente $1100\text{m}^3/\text{s}$ para 3 horas, $1400\text{m}^3/\text{s}$ para 1 hora y $1570\text{m}^3/\text{s}$ para 30 minutos, ocurriendo a la misma hora: 06:00 para los 3 casos. Los dos últimos valores de caudal son los valores más altos obtenidos de entre todas las simulaciones realizadas, aunque cercanos a los obtenidos para el área de Mocoa con IMERG en las 3 resoluciones espaciales. Observaciones similares pueden hacerse con los hidrogramas de Piedra Lisa II, donde se observa una diferencia considerable entre las 02:00 del 31 de marzo y las 11:00 del 1 de abril; los datos son mucho más gruesos y con cambios rápidos y abruptos cada 3 horas, comparado con 1 hora y media hora. La simulación del evento se ve más “fluida” en la resolución de 30 minutos, igual que con IMERG y se observa claramente el pico clave a las 08:00, mientras que, en las resoluciones de 3 horas y 1 hora, el pico máximo no es tan claro. El valor para 3 horas es cercano a los $450\text{m}^3/\text{s}$, para 1 hora es aproximadamente $650\text{m}^3/\text{s}$ y para 30 minutos de $710\text{m}^3/\text{s}$. Estos dos últimos dos valores se acercan a los obtenidos con IMERG en esta misma área. Como observación general de este experimento, se puede decir que la baja resolución temporal de 3B42 tiene un efecto de atenuación alto en los resultados, lo que sugiere que la simulación de eventos requiere frecuencias más altas en las estimaciones de precipitación y de integración del modelo.

Los resultados obtenidos en esta primera parte de la Fase 3, son capaces de demostrar la sensibilidad que tienen las predicciones a las resoluciones tanto espaciales como temporales. La tecnología de los productos también juega un papel importante en los resultados de las simulaciones. Debido a que el desarrollo de productos de GPM se basó en las experiencias de diseño y aplicación con los productos de TRMM, los resultados obtenidos por IMERG y 3B42 respectivamente no son de diferencias significativas, pero si se observa una mejora considerable en la calidad de los productos, dado el aumento en resolución espacial y temporal con la que cuenta IMERG. El producto 3B42 es capaz de identificar el evento de precipitación causante de la inundación, lo cual demuestra un aspecto importante en la utilidad de estos productos. Las mejoras significativas en IMERG también pueden ser evidenciadas, particularmente en la habilidad para caracterizar el evento con mayor afinidad y precisión. Estos resultados son consistentes con los hallazgos que llevan a la NASA a adelantar actividades para un cambio completo de TRMM a GPM (NASA, 2016).

3.2. Construcción del modelo de severidad y análisis comparativo del impacto de la resolución

Al llevar a cabo el proceso de correr el modelo del 2001 al 2017, obteniendo para cada año los valores máximos anuales de caudal y valores máximos de caudal unitarios, los resultados obtenidos son la conversión del caudal máximo a período de retorno con el fin de determinar la severidad del evento ocurrido el 1 de abril de 2017 en Mocoa.

Haciendo uso de métricas estadísticas, para la obtención del período de retorno es necesario hacer uso del modelo de distribución Log-Pearson Tipo 3 (Ecuación 6). En esta ecuación se encuentran los valores de intercepto y pendiente, ilustrados para cada una de las resoluciones en las *Figuras 37, 38 y 39*. En conjunto con los mapas de intercepto y pendiente, se realizaron los mapas de coeficiente de determinación con el fin de tener información diagnóstica de la confiabilidad del modelo lineal que relaciona caudal y períodos de retorno en cada píxel.

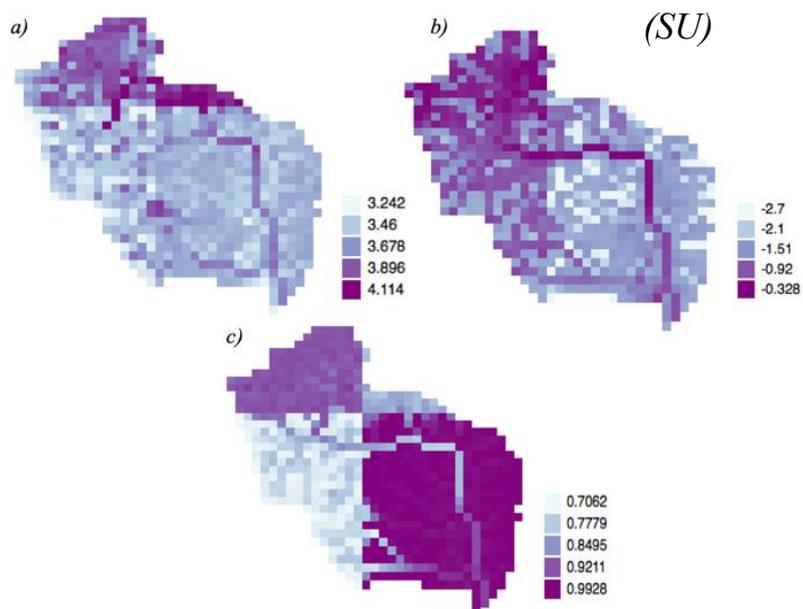


Figura 37. Parámetros del modelo lineal Caudal – Período de Retorno en la Ecuación 6 a 1km; a) pendiente, b) intercepto, c) coeficiente de determinación. Fuente: elaboración propia.

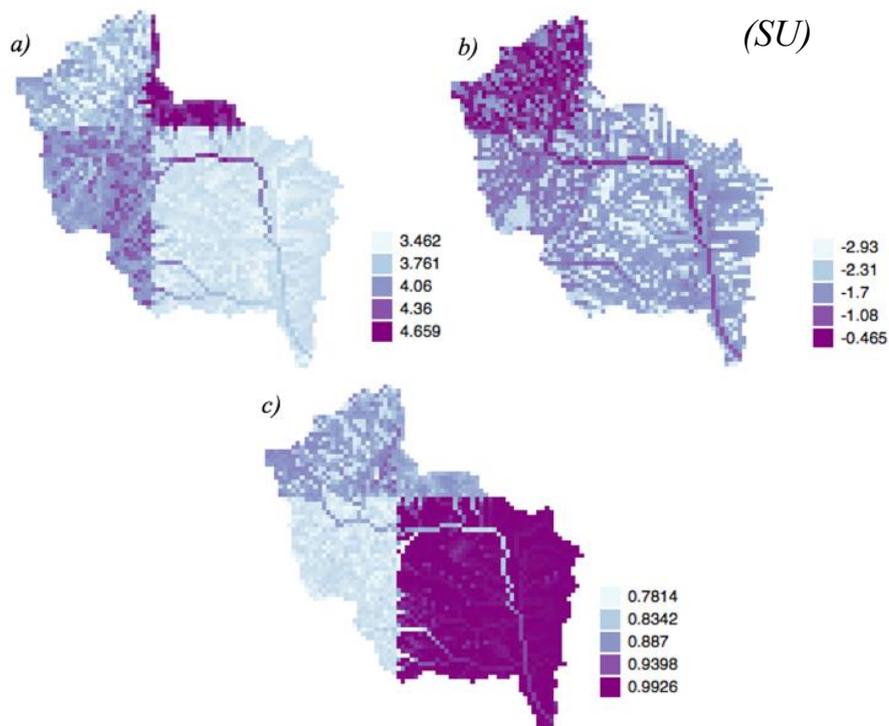


Figura 38. Parámetros del modelo lineal Caudal – Período de Retorno en la Ecuación 6 a 500m; a) pendiente, b) intercepto, c) coeficiente de determinación. Fuente: elaboración propia.

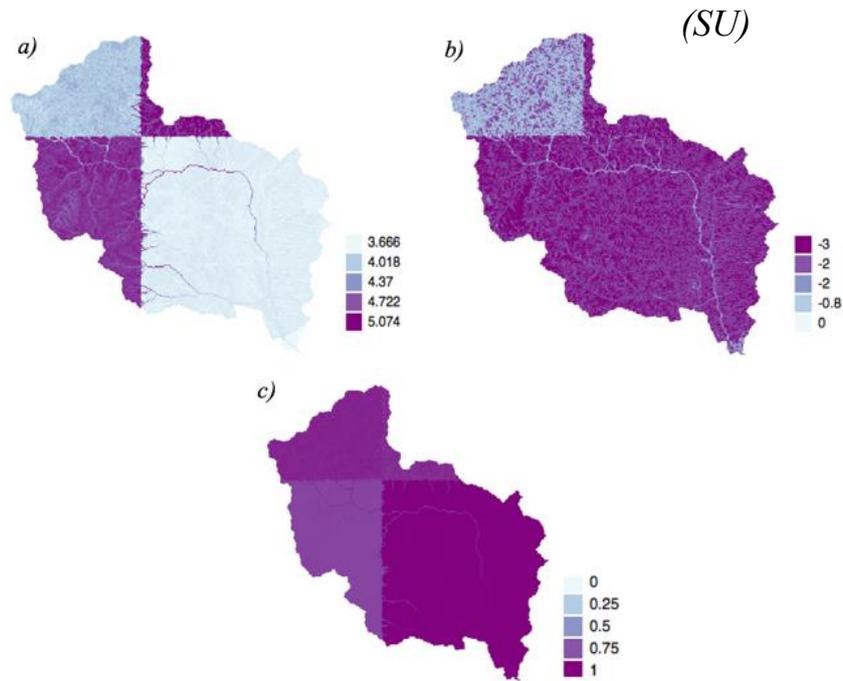
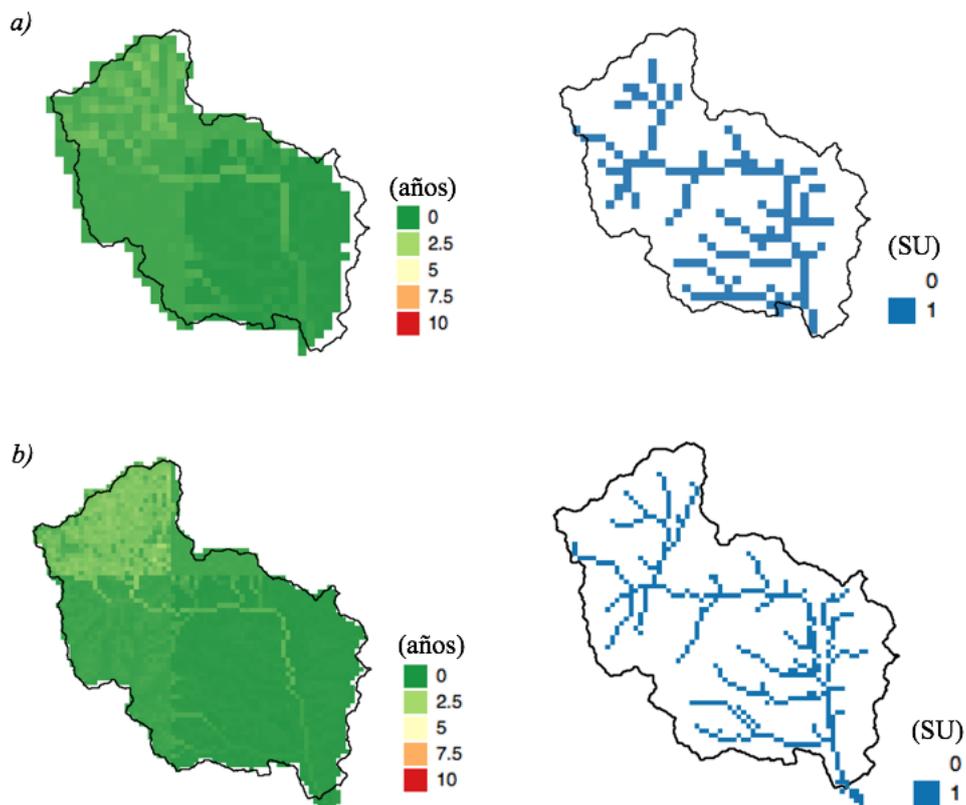


Figura 39. Parámetros del modelo lineal Caudal – Período de Retorno en la Ecuación 6 a 100m; a) pendiente, b) intercepto, c) coeficiente de determinación. Fuente: elaboración propia.

En la siguiente serie de figuras (Figuras 40 a 42) se ilustran los mapas de período de retorno y de inundación para cada una de las resoluciones espaciales y temporales con 3B42 y IMERG.



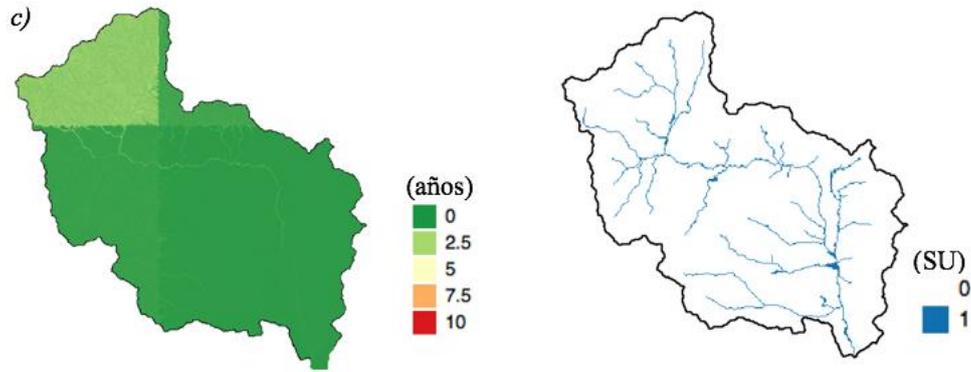
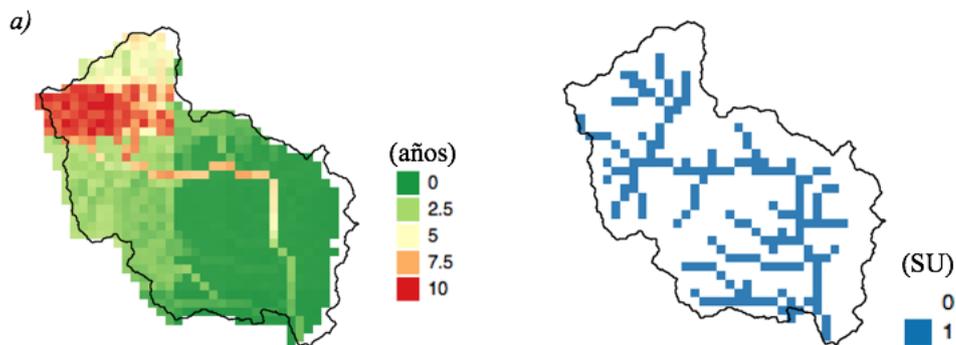


Figura 40. Mapas de período de retorno (izquierda) e inundación (derecha) con 3B42 con diferentes resoluciones espaciales; a) 1km, b) 500m, c) 100m Fuente: elaboración propia.

A partir de la Figura 40 se observa que los valores de período de retorno para las 3 resoluciones no son muy elevados ni sobrepasan los 2 años para el área donde se reportaron impactos de la inundación. En algunas partes del río Mocoa (el drenaje de color más claro sobre el verde más oscuro al oriente de la cuenca) alcanzan valores de entre 1 y 1.3 años para 1km y 500m respectivamente y de 1 año o menos para 100m. Los valores máximos con el modelo de 100m si alcanzan a superar los 3 años para la parte noroccidental de la cuenca donde están las zonas de mayor elevación, y tienen valores de poco menos que 2 años con 1km y 500m. Estos valores pueden deberse a que, al ser una zona montañosa, el movimiento de la escorrentía es rápido y tiene picos de caudal más altos relativo a las áreas de drenaje.

A pesar de que con el producto 3B42, los valores de período de retorno no sobrepasaron el umbral de 2 años que indica ocurrencia de una inundación (Reed et al, 2007), con el uso de los parámetros de inundación (Figuras 26 y 27) y los valores estimados de profundidad máxima de banco (Figura 28) se produce un resultado que indica la ocurrencia de inundación sobre el drenaje. En los gráficos de la derecha de la Figura 40 se observa que para casi todo el drenaje en las 3 resoluciones hay un valor de 1, indicando que en los cauces de las corrientes se pudo sobrepasar los valores de profundidad de banco durante el evento.



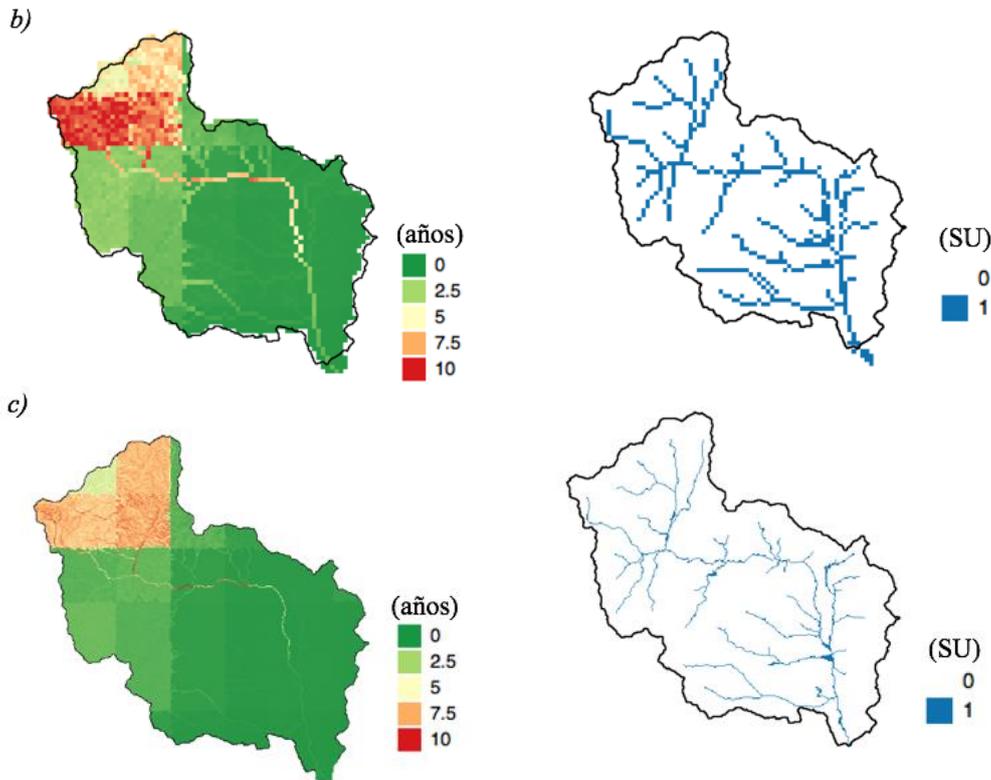
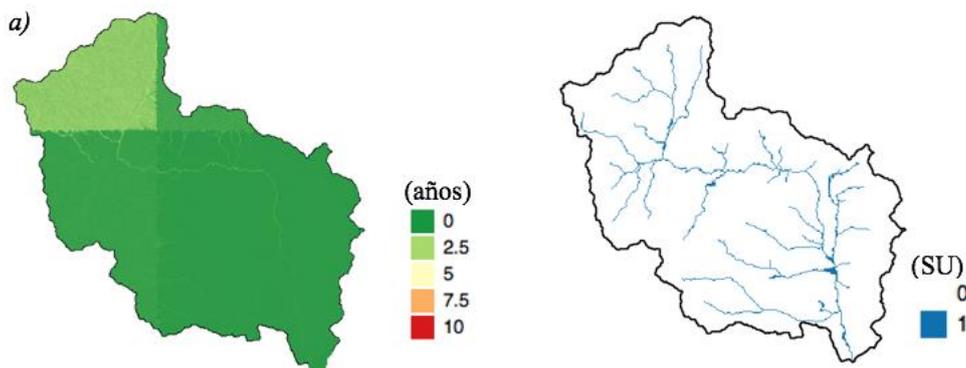


Figura 41. Mapas de período de retorno (izquierda) e inundación (derecha) con IMERG con diferentes resoluciones espaciales; a) 1km, b) 500m, c) 100m Fuente: elaboración propia.

Para el caso de IMERG, los períodos de retorno alcanzan valores superiores a los 10 años para algunos puntos en el lado noroccidental de la cuenca. A todas las resoluciones se alcanza un valor de período de retorno máximo igual o superior a 5 años sobre el río Mocoa, superando el umbral de ocurrencia de una inundación. A diferencia de 3B42, IMERG es capaz de producir unos períodos de retorno del caudal máximo más variados y con mayor magnitud, dado que al aumentar la recurrencia de los datos de precipitación con este producto se obtiene una respuesta de caudales modelados de mayor magnitud. Dado lo reportado en las diferentes fuentes consultadas en la fase 1, estos resultados pueden ser más precisos con valores de período consistentes con la magnitud del desastre.

En cuanto a los gráficos de inundación de la *Figura 41*, se pueden observar resultados similares a lo presentado en la *Figura 40*. El hecho de que este producto de la simulación resulte en casi todo el drenaje inundado sin importar la resolución de modelado o el producto satelital usado sugiere la existencia de limitaciones en el algoritmo de inundación para discriminar condiciones extremas.



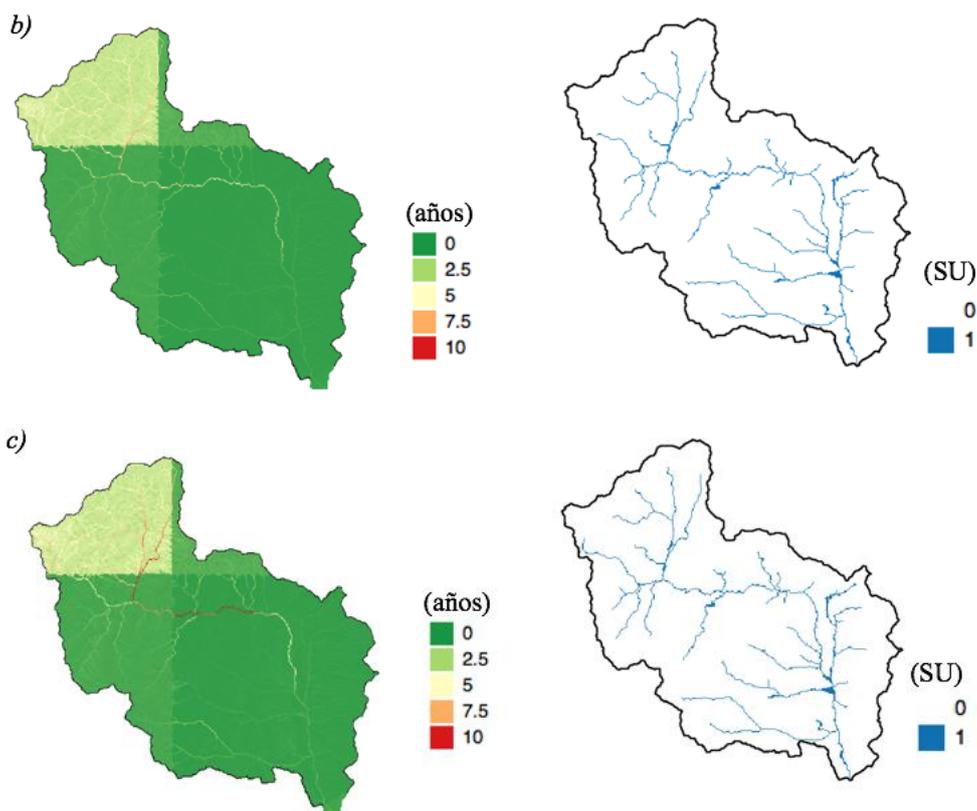


Figura 42. Mapas de período de retorno (izquierda) e inundación (derecha) con 3B42 a 100m con diferentes resoluciones temporales; a) 3 horas, b) 1 hora, c) 30 minutos. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 42 se incluyen los resultados del experimento de comparación de resoluciones temporales donde, en general, los valores de período de retorno son altos para el noroccidente de la cuenca y bajos para el oriente donde se encuentra el municipio de Mocoa y los ríos implicados en el desastre. Con respecto al río Mocoa, la simulación de cada 3 horas no supera los 2 años, mientras que la de cada hora y cada 30 minutos, superan los 2 años. Este comportamiento es consistente con lo discutido en el análisis de los hidrogramas acerca de la necesidad de altas frecuencias en las estimaciones de precipitación e integración del modelo hidrológico para simular estos eventos extremos.

Fase 4. Evaluación de la habilidad del sistema de modelación en simular el evento

4.1. Confrontación de la modelación hidrológica con los datos de cartografía y reportes

En esta última fase de la investigación, se hace una confrontación de todos los datos obtenidos que representaran ocurrencia, extensión y severidad de la inundación de Mocoa en abril de 2017. Por ende, son comparados en primera instancia dos resultados muy importantes de la investigación: los barrios afectados por la inundación según la OCHA y los mapas de inundación y período de retorno obtenidos en la fase 3. Cabe resaltar que los barrios representados en la cartografía, no necesariamente indican que cada barrio fue destruido por completo, si no que fue afectado en algún nivel por la inundación. Según la Cruz Roja Colombiana (2017), los barrios más afectados fueron aquellos cercanos a los ríos Mulato y Sangoyaco (San Miguel, El Progreso, Pablo VI, 17 de Julio), y dos barrios que estaban en gran cercanía al río Mocoa (Independencia y San Agustín). Según un estudio

de 2014 (Guzman & Barrera), ya existía un estudio sobre los barrios San Miguel y José Homero en los que se indicaba que estos barrios eran propensos a sufrir en caso de una inundación y deslizamiento. Una figura de los barrios y los ríos en acercamiento se presenta a continuación:

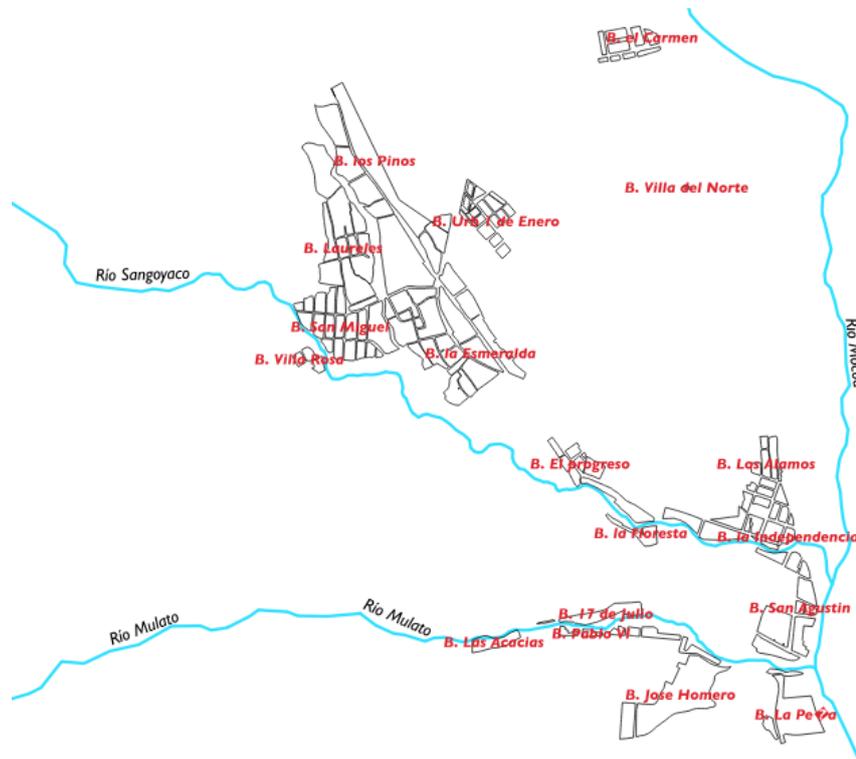


Figura 43. Barrios y ríos en la cuenca de Mocoa. Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 44 y 45 presentan los resultados con el modelo de menor resolución espacial (1km), donde se observa que las zonas donde se indica inundación intersecta muchos de los barrios, como aquellos entre los ríos Mulato y Sangoyaco. Específicamente son inundados los barrios El Progreso, La Floresta, una parte de La Independencia, José Homero, 17 de Julio, Pablo VI y Las Acacias. También se indica como inundado el área perteneciente al barrio El Carmen, que se encuentra al norte del municipio. Si bien algunos de estos barrios que en la inundación de 2017 se destruyeron por completo, como El Progreso, otro de los barrios destruidos por completo, como San Miguel sobre la parte más occidental de Mocoa y en la ribera del río Sangoyaco, no se detectó como inundado a esta resolución. Al ser una resolución baja, con píxeles muy grandes sobre la cuenca, se puede decir que toma todo el drenaje de los ríos Mocoa y Mulato, sobre la parte que los detecta, e indica que sobre ellos hay una inundación, sin necesariamente precisar geográficamente donde se encuentran los barrios. En cuanto a los períodos de retorno, con 3B42 no se sobrepasa el umbral de 2 años que indica que hay inundación. Sin embargo, los valores con IMERG si superan el umbral, con un período de retorno de entre 3 y 5 años sobre los barrios que se ven afectados en esta resolución mencionados anteriormente.

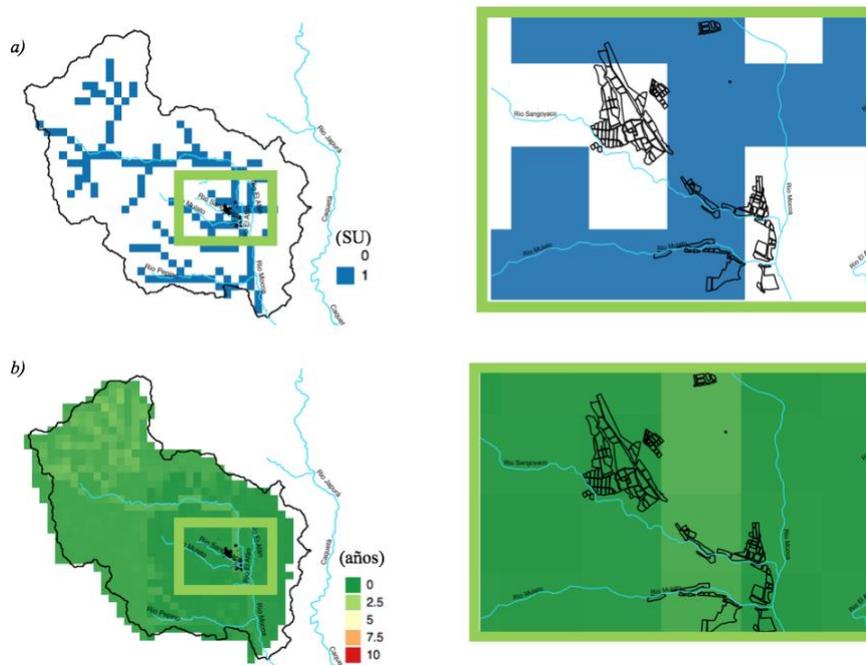


Figura 44. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 1km; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

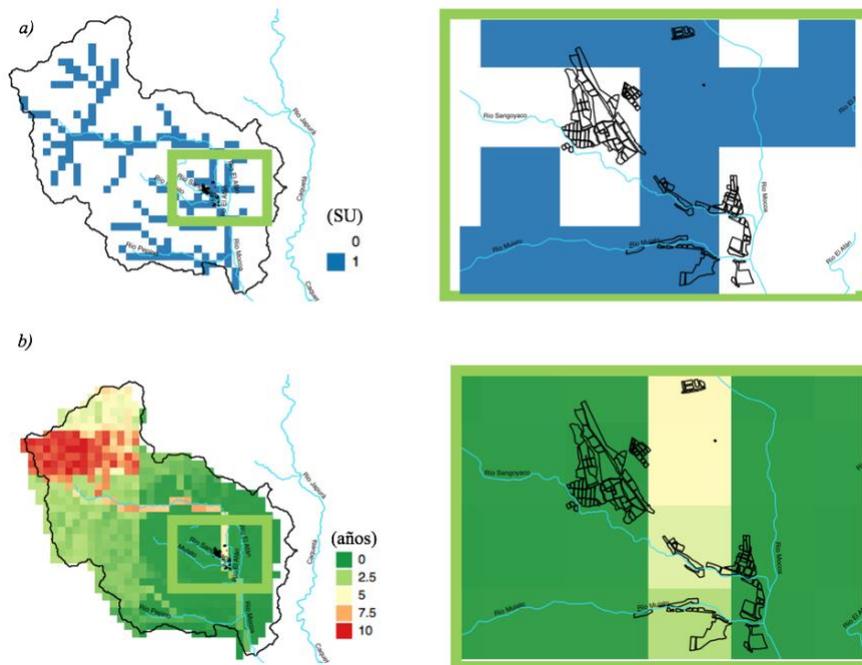


Figura 45. Contraste de barrios afectados con datos de IMERG a 1km; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

Se observan los barrios afectados contra la información obtenida a 500m en las Figura 46 y 47. En primera instancia, es posible distinguir los 3 ríos que en el caso de la resolución de 1km no se observaban claramente. Para esta resolución, los resultados de inundación también son iguales, independiente del producto satelital utilizado. Se representa con mayor precisión los barrios que

efectivamente se inundaron y se destruyeron en el evento, como lo son San Miguel, Laureles, parte de La Esmeralda, El Progreso, La Floresta, La Independencia, San Agustín, 17 de Julio, Pablo VI y Las Acacias. También cabe resaltar que el barrio del norte, El Carmen, no se ve inundado en esta resolución, como lo indican los reportes noticiosos presentados. La extensión de la inundación de Mocoa se ve representada con mayor precisión a pesar de no ser la mejor resolución espacial. En cuanto a la severidad, al igual que con la simulación a 1km no se sobrepasa el umbral de 2 años con 3B42, pero si con IMERG. Para este último, se observan períodos de retorno de entre 4 y 5 años aproximadamente pero únicamente para el río Mocoa.

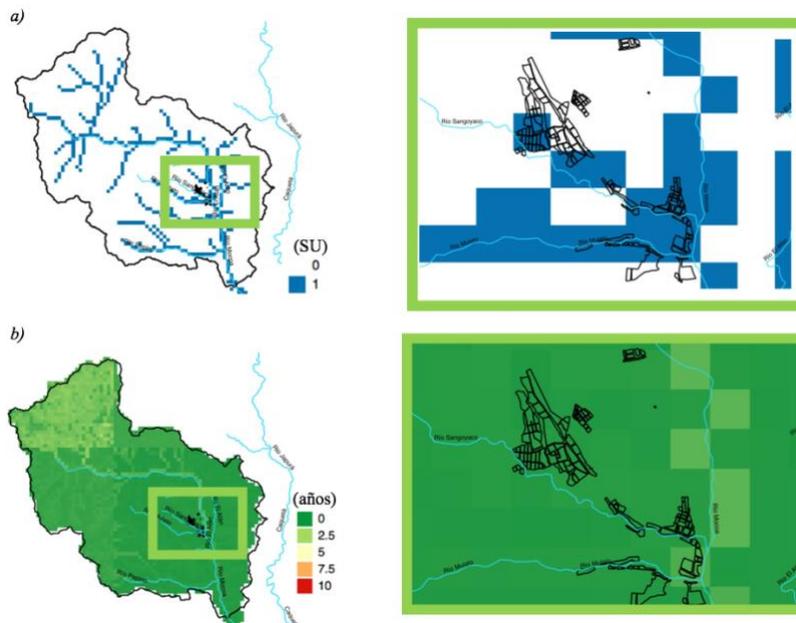


Figura 46. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 500m; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

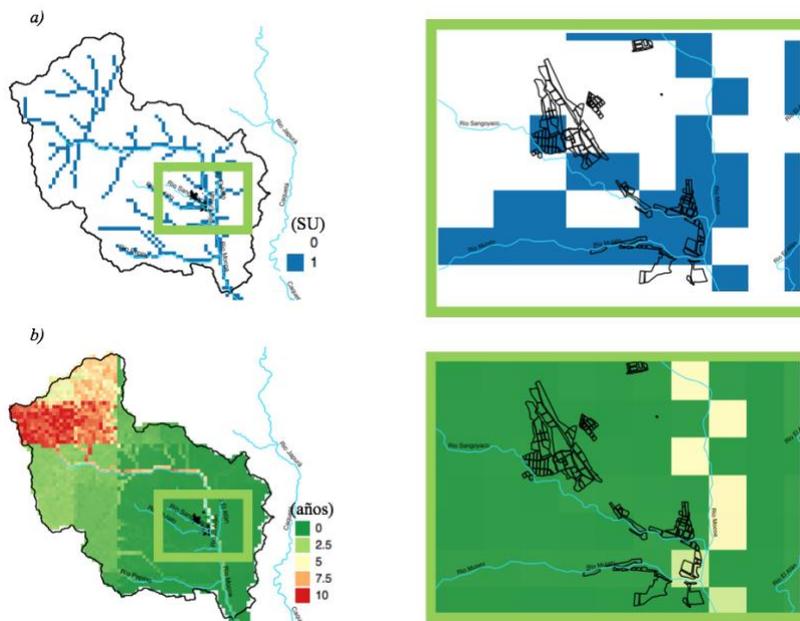


Figura 47. Contraste de barrios afectados con datos de IMERG a 500m; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

Por último, es realizada la comparación de los datos a nivel no solo espacial, si no también temporal, usando las Figuras 48 a 51. En general la resolución de 100m que las caracteriza, permite ver con gran claridad los drenajes de los ríos Mocoa, Mulato y Sangoyaco y como estos atraviesan el municipio de norte a sur y de oriente a occidente. Los mapas de inundación en estas 4 figuras indican que con una inundación se verán afectados los barrios: San Miguel, El Progreso, La Independencia, San Agustín, 17 de Julio y parte de Las Acacias, los cuales hacen parte de los barrios destruidos y afectados por la inundación. La resolución de 100m representa la extensión de la inundación a un nivel muy detallado, siendo capaz de representar con precisión todos los drenajes que están en Mocoa y en general en la cuenca, indicando así zonas de inundación mas concisas.

Evaluando la severidad, los períodos de retorno sobre la cuenca si varían dependiendo de la resolución temporal de información. La resolución a la que se diferencian mejor los drenajes para este parámetro es con 3B42 cada media hora (Figura 50) con variación en los años de período de retorno desde un año hasta 4.4 años sobre varios puntos de la cuenca en general; para el área del evento de inundación de Mocoa, únicamente con 3B42 cada media hora el umbral para inundación es superado con 3 años.

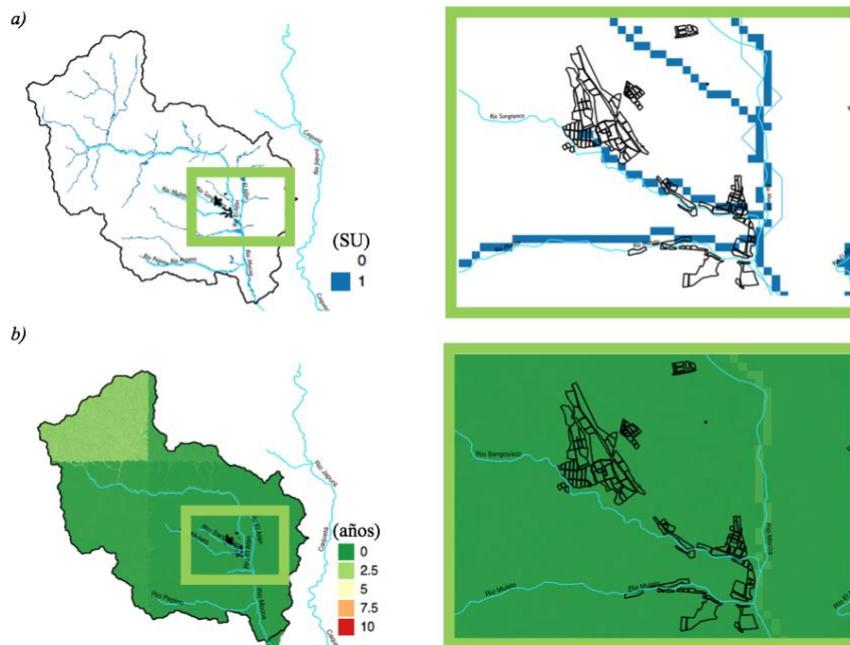


Figura 48. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 100m cada 3 horas; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

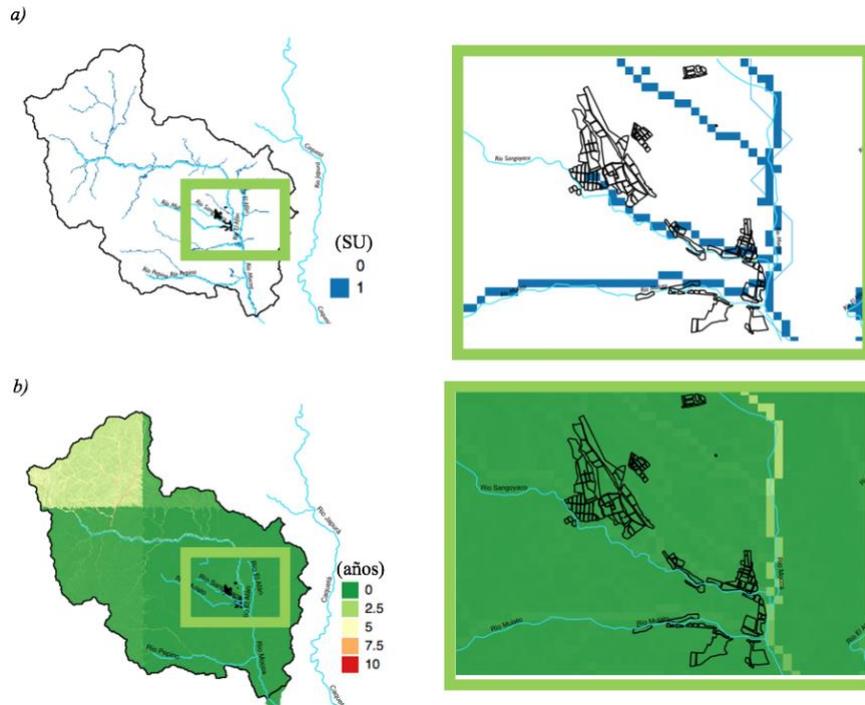


Figura 49. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 100m cada hora; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

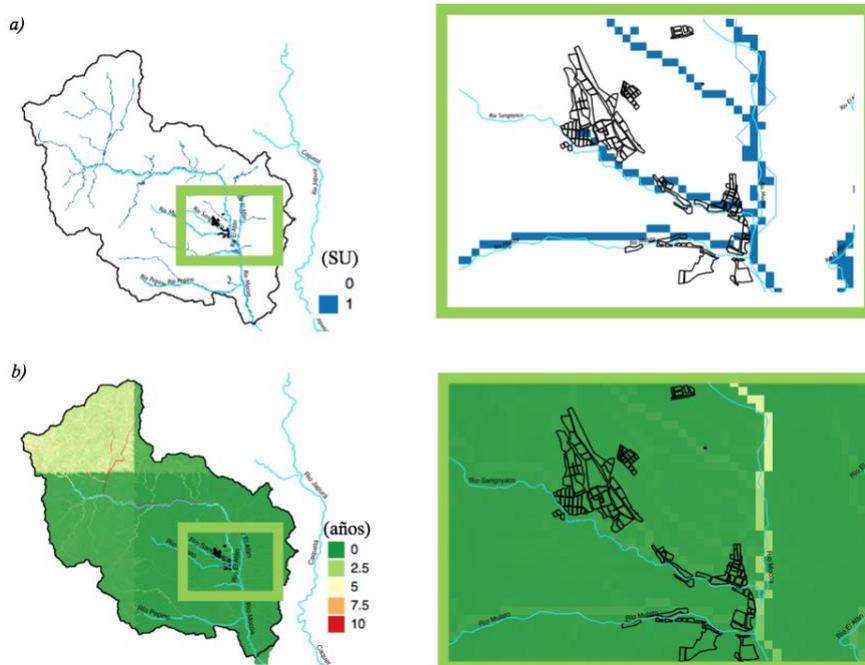


Figura 50. Contraste de barrios afectados con datos de 3B42 a 100m cada 30 minutos; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

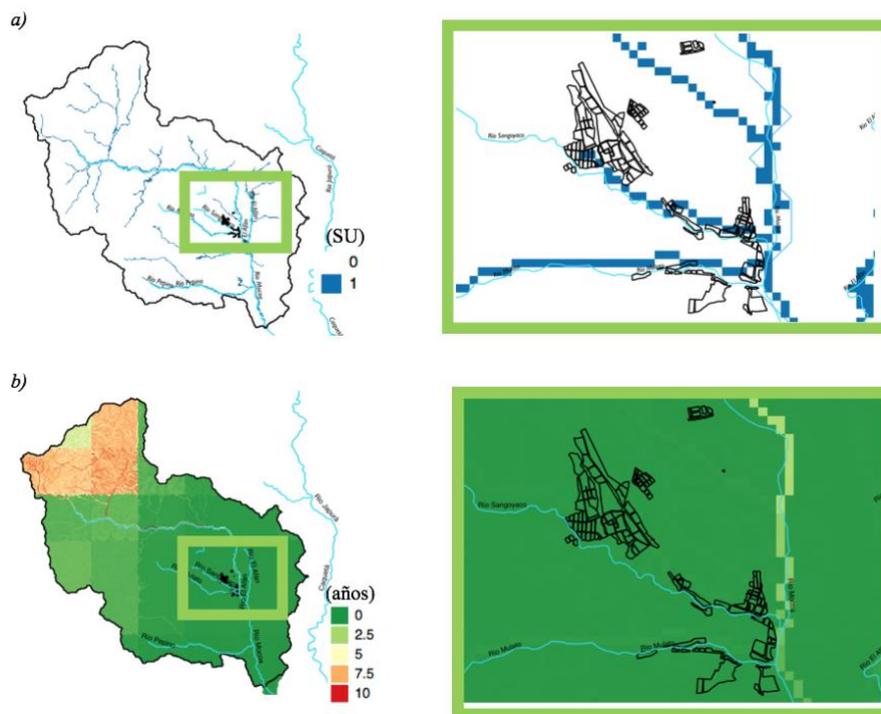


Figura 51. Contraste de barrios afectados con datos de IMERG a 100m; a) inundación, b) período de retorno. Fuente: elaboración propia

En síntesis, los resultados del modelo con lo obtenido de las fuentes bibliográficas presentan un nivel considerable de afinidad en cuanto a la descripción espacial del evento, atendiendo especialmente a los parámetros de extensión y severidad. Para todas las resoluciones, los datos de la simulación fueron congruentes con la información de los barrios afectados, a pesar de que no fuera exacta la zona de impacto de inundación. Con la información de la Cruz Roja y La Revista Semana se pudo contrastar la validez de estos datos sobre lo que el modelo fue capaz de predecir en referencia a que estas fuentes fueron la que indicaron con precisión cuales fueron los barrios afectados y destruidos.

13. Conclusiones

El objetivo de esta investigación fue evaluar y describir el impacto que tiene la configuración de resolución espacial y temporal en la habilidad de un sistema de predicción basado en información satelital para simular la ocurrencia, extensión y severidad de la inundación de Mocoa en el 2017 y con esto determinar su utilidad como herramienta de aplicación a escala nacional. La inundación de Mocoa fue seleccionada como objeto de estudio por su relevancia a nivel nacional e internacional en cuanto a crecientes súbitas sobre ríos que afectaron drásticamente a toda la capital de un departamento. Este estudio es pionero en el uso de tecnología satelital y la herramienta de modelación hidrológica EF5 para caracterizar un evento de inundación, y con los resultados obtenidos si contribuye a determinar su utilidad como herramienta aplicable para toda Colombia.

La metodología aplicada para este estudio permitió el cumplimiento total de los objetivos planteados. Cada una de las fases fue realizada de tal manera que los objetivos se relacionaran entre si y los resultados obtenidos de cada uno de ellos contribuyera a la investigación de manera integral. El cumplimiento del objetivo general se refleja en que se evaluó y describió la habilidad de cada una de las resoluciones espaciales (1km, 500m, 100m) y temporales (3 horas, 1 hora y 30 minutos) consideradas en la investigación, con el producto 3B42 de la misión satelital TRMM y el producto IMERG de la misión satelital GPM, para simular la ocurrencia, extensión y severidad de la inundación de Mocoa en el 2017 con diferentes fuentes de información y diversos análisis.

Lo anterior se hizo por medio del cumplimiento de los cuatro objetivos específicos planteados al inicio de la investigación. En primera instancia se recolectaron, procesaron y analizaron los reportes de impacto, artículos y mapas que describían la ocurrencia, extensión y severidad del evento. Fueron de gran importancia los artículos realizados por el profesor Germán Vargas Cuervo de la Universidad Nacional por su aporte al estudio sobre los procesos geomorfológicos ocurridos en la cuenca y el mapa que se provee a partir de estos. Los estudios realizados por Saira Romo y Omar Jojoa, que aportan datos de las cuencas y riberas de los ríos Mulato y Sangoyaco y como estas áreas se encuentran en amenaza por inundación. El reporte realizado por la Revista Semana detallando datos del desastre, cómo los 129mm que cayeron en un período de aproximadamente tres horas. El mapa realizado por la OCHA que presenta los barrios afectados por la inundación, el cual era ejecutable en QGIS y por ende permitió un análisis fuerte de contraste de reporte de impacto con información satelital y la información de la Cruz Roja y el alcalde de Mocoa de los barrios afectados y destrozados por completo, todo lo anterior para describir parte de la extensión y severidad, y por último para esta fase se recolectaron y analizaron los datos de precipitación y caudales provenientes de 5 estaciones hidrometeorológicas del IDEAM (4 de precipitación y una de caudal), por medio de gráficas de precipitación total diaria de tal manera que se identificará con facilidad la severidad del evento de inundación, con respecto al comportamiento usual de la precipitación.

En la segunda fase, se configuró el sistema de modelación EF5 con parámetros que describen la topografía, las propiedades hidráulicas del suelo y la geometría de las corrientes de la cuenca y así representar su dinámica hidrológica. Una vez se obtuvo todo lo necesario para la configuración del sistema, este se implemento con los productos 3B42 y IMERG. Se evaluó la correlación que tienen los datos de TRMM y de GPM, y se estimaron valores superiores a 0.8. Esto se debe a que GPM fue desarrollado con base a los algoritmos y datos obtenidos por TRMM a través de los años y por ende están estrechamente relacionados. En la comparación de los datos satelitales con las estaciones hidrometeorológicas del IDEAM para evaluar su habilidad se hizo por medio de gráficos de dispersión, valores de correlación y sesgo. Se observó alta dispersión y grado de no linealidad, evidenciando la incertidumbre existente en estos productos. Se generaron hidrogramas que describían el caudal en una primera simulación del evento específicamente detectando su ocurrencia. A partir de

esta simulación se concluye principalmente que IMERG describe la evolución temporal del evento con mayor refinamiento, dada la mayor cantidad de datos por su resolución temporal de 30 minutos comparada con la resolución temporal de 3B42 de 3 horas. Esta última da cabida a que exista un vacío de datos muy grande y por ende un efecto de atenuación del evento.

Para el cumplimiento del tercer objetivo, se evaluó el impacto de la resolución espacial y temporal en la simulación del evento con los hidrogramas obtenidos en dos puntos de la cuenca y con los mapas de período de retorno y de inundación. Con respecto a la información extraída a partir de los hidrogramas es pertinente decir que las predicciones son muy sensibles a las resoluciones tanto espaciales como temporales, y que la resolución que mejor detecta y describe el evento desde el punto de vista de los hidrogramas es la de IMERG a 500m y a 100m y la de TRMM cada hora o cada media hora. Esto sugiere que la predicción de eventos extremos requiere alta resolución tanto en las estimaciones de precipitación como en la configuración del modelo hidrológico. El análisis de mapas de períodos de retorno y de inundación permite también concluir que la mejor resolución es IMERG a 100m por su nivel de detalle. A pesar de esto, y teniendo en cuenta las consideraciones de demanda computacional que esta resolución conlleva, el uso de IMERG a 500m también describe períodos de retorno útiles en la detección de la inundación. Similar a lo obtenido con IMERG, la resolución de 100m con 3B42 cada treinta minutos también tiene una habilidad de detección de inundación satisfactoria. Esto nuevamente resalta la importancia de la configuración del modelo hidrológico con resoluciones temporales altas para la descripción de eventos extremos, independientemente de la disponibilidad de estimaciones frecuentes de precipitación.

Para cumplir el cuarto objetivo, se confrontó toda la información obtenida en la primera fase, con la obtenida en la tercera fase. Se utilizó principalmente la cartografía de los barrios afectados, los barrios destruidos y los reportes noticiosos que describen el evento y/o las amenazas en las riberas de los ríos que atraviesan el municipio. Todas las resoluciones fueron capaces de proporcionar información acerca de la extensión y severidad de la inundación. En particular la simulación a 500m con IMERG detectó con alta certeza los barrios afectados por la inundación con valores de período de retorno considerables. En los resultados de esta fase se observó que los barrios se ven afectados de menor o mayor manera con respecto a los diferentes parámetros, es decir, a todas las resoluciones hay ocurrencia del evento, la diferencia radica en que, a mayor nivel de resolución, mejor es la especificación de la extensión y severidad de la inundación.

En general, se observó que los productos satelitales son eficientes al momento de detectar la ocurrencia de precipitación, pero deficientes al momento de estimar la cantidad de precipitación diaria en los diferentes intervalos horarios de tiempo, pues en muchas ocasiones subestiman la precipitación caída, resultando también en caudales simulados subestimados. De la misma forma, el modelo pudo capturar la respuesta de crecientes de caudal ante la intensa lluvia ocurrida en la madrugada del 1 de abril, sin embargo es necesario refinar los datos del modelo hidrológico con el fin de que con el uso de IMERG, por ser el producto de la misión satelital de precipitación más reciente y mejorado de la NASA, GPM, el modelo sea capaz de indicar la respuesta rápida de un caudal a precipitación intensa en un terreno montañoso, más específicamente de piedemonte amazónico (por la ubicación de Mocoa) y por ende pronosticar a un nivel mucho más preciso la ocurrencia, extensión y severidad de una inundación.

Como observaciones finales, la herramienta de modelado de EF5 es un gran avance tecnológico que contribuye ampliamente a la predicción de inundaciones, se ha demostrado su eficacia y habilidad en los Estados Unidos y se espera que con esta investigación se contribuya a su correcta configuración e implementación en un país tropical y con las montañas andinas presentes como lo es Colombia.

Así mismo, se considera relevante destacar la pertinencia de la información y tecnologías satelitales para el abordaje y resolución de problemáticas como las desarrolladas en la presente investigación, sin que resulte necesario el desplazamiento de los investigadores al lugar específico del evento, máxime cuando se trata de equipos interinstitucionales e internacionales.

14. Recomendaciones

Este trabajo de investigación es recomendado para ser utilizado por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres en Mocoa con el fin de que actualicen su Plan Básico de Ordenamiento Territorial conforme a que el municipio está ubicado entre riberas de ríos que en períodos de invierno pueden resultar letales.

Se recomienda también en futuras investigaciones, contrastar los datos con un índice como el diferencial de agua normalizado (NDWI), pues permite identificar masas de agua y zonas de elevada saturación de humedad, analizando imágenes de satélite. También pueden ser utilizados indicadores espaciales con imágenes satelitales que específicamente muestren el antes y el después de la inundación en el municipio con el fin de evaluar desde otro punto de vista la extensión del evento.

Este trabajo puede dar pie a un amplio rango de futuras investigaciones relacionadas al tema de predicción de inundaciones y diseño de sistemas de alerta temprana en otros municipios de Colombia donde se hayan presentado catástrofes como la del presente estudio o municipios que sean propensos a las inundaciones. Esto con el fin de evaluar la habilidad del modelo en otro tipo de terrenos, como el llano, la Amazonía, el Chocó, y analizar que tan eficiente es el modelo dependiendo del terreno de tal forma que sea posible realizar ajustes que resulten en el desarrollo de un sistema de alerta por inundaciones en Colombia en tiempo real.

15. Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Mocoa. (2017). Mi Municipio. Obtenido de <http://www.mocoa-putumayo.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- Ana Campos G., N. H.-N. (03 de 2012). Obtenido de *Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia*: <http://gestiondelriesgo.gov.co/sigpad/archivos/GESTIONDELRIESGOWEB.pdf>
- BBC Mundo. (03 de 04 de 2017). La desesperada búsqueda de sobrevivientes después del deslave que dejó más de 250 muertos y centenares de heridos en Mocoa, en el sur de Colombia. Obtenido de <http://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-39469095>
- Bedient, P., Huber, W., & Vieux, B. (2008). *Hydrology and Floodplain Analysis*, 4th Edition. Pearson.
- Bonilla Castro, E., & Rodríguez Sehk, P. (1997). Cap. 2. Métodos cuantitativos y cualitativos. En *Más allá del dilema de los métodos. La investigación en ciencias sociales*. (págs. 77-103). Bogotá: Ediciones Uniandes.
- Botero, R. (01 de 04 de 2017). *Semana*. Obtenido de *¿Mocoa, furia de la naturaleza?:* <http://www.semana.com/nacion/articulo/ambientalista-rodrigo-botero-explica-deforestaciones-causa-de-tragedia-mocoa/520697>
- Burden, P. (01 de 09 de 2009). Obtenido de *GIS and Natural Hazard Management* : <https://www.geospatialworld.net/article/gis-and-natural-hazard-management/>
- Carlin, N. (2009). Saint Mary's University of Minnesota. Obtenido de *Spatial Analysis Using Geographic Information Systems (GIS) to Evaluate Areas Susceptible to Repeat Flash Flooding in La Crosse County, Wisconsin*: <http://www.gis.smumn.edu/GradProjects/CarlinN.pdf>
- Celis, J. (2016). *Evaluación del nivel de mejora en el monitoreo de sequías a escala regional en Colombia, a partir de indicadores ecohidrológicos basados en teledetección*. *Revista de Tecnología Universidad El Bosque*, 15-42.
- Centro Nacional de Apoyo para Contingencias Epidemiológicas y Desastres de México. (2017). *¿Qué es un desastre natural?* Recuperado el 08 de 11 de 2017, de <http://www.cenaced.org.mx/es/blog/item/29-que-es-un-desastre-natural.html>
- Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw Hill.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw Hill.
- Chunlu Lui, Y. L. (2017). *GIS-based dynamic modelling and analysis of flash floods considering land-use planning*. *International Journal of Geographical Information Science*, 481-498.
- Clark, R., Flamig, Z., Vergara, H., Hong, Y., Gourley, J., Mandl, D., . . . Patterson, M. (2017). *Modelamiento Hidrológico y Capacidad de Creación en la República de Namibia*. *American Meteorological Society*, 1697-1716.
- Comisión económica para América Latina y el Caribe. (2017). Obtenido de *Análisis de información sobre riesgos*: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/33658/ColombiaCapII.pdf>
- Comisión económica para América Latina y el Caribe. (s.f.). Obtenido de *Análisis de información sobre riesgos*: <http://www.cepal.org/publicaciones/xml/8/33658/ColombiaCapII.pdf>
- Cosby, B., Hotnberger, R., Clapp, R., & Ginn, T. (1984). *A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils*. *Water resources*.
- Cruz Roja Colombiana. (04 de 04 de 2017). *Emergencia Mocoa - Putumayo*. Obtenido de *Reporte de Situación* : <http://www.cruzrojacolombiana.org/sites/default/files/SITREP%20%236%20CRC%20-%20EMERGENCIA%20MOCOA.pdf>
- Defourny, P. (2016). *Land cover CCI: Product user guide version 2.5*. Obtenido de *European Space Agency*: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/download/ESACCI-LC-PUG-v2.5.pdf>

- Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S., & Ceccato, P. (01 de 05 de 2010). Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Estimates over Colombia. *Obtenido de American Meteorological Society: <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2260.1>*
- Doswell, C. (2015). *Hydrology, Floods and Droughts | Flooding*. ELSEVIER, 201-208.
- El Espectador*. (06 de 04 de 2017). Los barrios afectados en Mocoa fueron 36, no 17. *Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/los-barrios-afectados-en-mocoa-fueron-36-no-17-articulo-688180>*
- El Espectador*. (13 de 08 de 2018). Decretan calamidad pública en Mocoa tras inundaciones. *Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/decretan-calamidad-publica-en-mocoa-tras-inundaciones-articulo-805861>*
- El Tiempo*. (01 de 04 de 2017). Envían medicamentos y ayudas para afectados por avalancha en Mocoa. *Obtenido de <http://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/emergencia-por-avalancha-en-mocoa-73774>*
- Elvidge, C., Tuttle, B., Sutton, K., Baugh, A., Howard, A., Milesi, C., . . . Nemani, R. (2007). Global distribution and density of constructed impervious surfaces. *Obtenido de Sensors 7: <http://www.mdpi.com/1424-8220/7/9/1962>*
- Euscátegui, C. (03 de 04 de 2017). Tragedia en Mocoa, cifras de la avalancha. *Obtenido de Semana: <http://www.semana.com/nacion/multimedia/tragedia-en-mocoa-cifras-de-la-avalancha/520864>*
- Ganasri, B., Gayathri, D., & Dwarakish, G. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia 4, 1001-1007*.
- Gharagozlou, A. H. (2012). Environmental planning for disaster management by using GIS (A case study about flood in Mazandaran. *Recuperado el 12 de 11 de 2017, de http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/8_pdf/2_WG-VIII-2/29a.pdf*
- Guzman, C. M., & Barrera, J. A. (2014). Universidad Católica. *Obtenido de Metodología para la microzonificación de riesgos frente a amenazas naturales: caso de estudio deslizamientos e inundaciones municipio de Mocoa departamento del Putumayo: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1648/1/METODOLOGÍA%20PARA%20LA%20MICROZONIFICACIÓN%20DE%20RIESGOS%20FRENTE%20A%20AMENAZAS%20NATURALES%20CASO%20DE%20ESTUDIO%20DESLIZAMIENTOS%20E%20INUNDACIONES%20MUNICIPIO%20DE%20MOCOA%20DEPARTAMENTO%20D>*
- He, X., Hong, Y., Vergara, H., Zhang, K., Kirstetter, P.-E., Gourley, J., . . . Liu, C. (2016). Development of a coupled hydrological-geotechnical framework for rainfall-induced landslides prediction. *Journal of Hydrology, 395-405*.
- Hengl, T. (2014). SoilGrids1km—Global soil information based on automated mapping. *Obtenido de doi:10.1371/journal.pone.0105992*.
- Hernández Sampieri, Fernández, & Baptista. (2004). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw Hill.
- Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol, 25*.
- Hong, Y., Zhang, Y., & Khan, S. (2017). Investigating Satellite-Based Observations to Improve Societal Resilience to Hydrometeorological Hazard in Colombia. *En Y. Z. Yang Hong, Hydrologic Remote Sensing (págs. 349-362)*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- HydroSHEDS. (2013). HydroSHEDS. *Obtenido de Data Downloads: <https://hydrosheds.cr.usgs.gov>*
- IDEAM. (2014). Agua. *Obtenido de Modelación Hidrológica: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica>*
- IDEAM. (2014). Glosario. *Obtenido de Deslizamiento: <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario#D>*

- IDEAM. (2018). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos. Recuperado el 08 de 11 de 2017, de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21789/1Sitios+turisticos2.pdf/cd4106e9-d608-4c29-91cc-16bee9151ddd>
- IDEAM. (s.f.). Amenazas inundación. Recuperado el 08 de 11 de 2017, de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>
- IDIGER. (2018). Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. Obtenido de Caracterización General de Escenario de Riesgo por Inundación: <http://www.idiger.gov.co/rinundacion>
- IGAC & CIAT. (2007). Mejora de los sistemas de cartografía del territorio colombiano. Recuperado el 08 de 11 de 2017, de Teledetección: ftp://ftp.ciat.cgiar.org/DAPA/planificacion/GEOMATICA/Teledeteccion/Teledeteccion_Modulo.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México. (2017). Imágenes de satélite. Recuperado el 08 de 11 de 2017, de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/default.aspx>
- Jojoa, O. A. (11 de 2003). CORPOAMAZONÍA. Obtenido de Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa departamento del Putumayo: Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa departamento del Putumayo
- Jurado, M. C., & González, J. P. (2013). Evaluación de la Utilidad de Estimaciones Satelitales de Precipitación para la Modelación de Inundaciones en Sistemas de la Alerta Temprana de Cuencas de Relieve Complejo: Caso de Estudio en la Cuenca del Río Bogotá. Bogotá: Universidad El Bosque. Obtenido de Universidad El Bosque.
- Jurado, M., Gonzalez, P., Vergara, H., Ochoa, K., Paez, M., & Hong, Y. (2017). Investigating Satellite-Based Observations to Improve Societal Resilience to Hydrometeorological Hazard in Colombia. En Y. Hong, Y. Zhang, & S. I. Khan, Teledetección Hidrológica (Hydrologic Remote Sensing). Boca Ratón: CRC Press.
- Martha Quiñones, I. E. (2003). Obtenido de EL USO DE LA TECNOLOGÍA EN EL ESTUDIO DE LA VULNERABILIDAD A LOS DESASTRES NATURALES: <http://amauta.upra.edu/vol1/vol1investigacion/desastresnaturales.pdf>
- MAVDT - CORPOAMAZONÍA. (12 de 2009). Documento de Seguimiento y Evaluación del Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Mocoa Departamento del Putumayo. Obtenido de Expediente Municipal: http://www.corpoamazonia.gov.co/files/Ordenamiento/POT/Exp_Municipal_Mocoa.pdf
- Monje Álvarez, C. A. (2011). METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN CUANTITATIVA Y CUALITATIVA Guía didáctica. Obtenido de Universidad Surcolombiana: <https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/Guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf>
- Moore, R. (2009). The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. Hydrological Sciences Journal, 273-297.
- Naciones Unidas República Dominicana. (19 de 09 de 2013). Obtenido de Por cada peso que se invierte en prevención de desastres se ahorran 5 pesos en costos de reconstrucción de infraestructura: <http://portal.onu.org.do/sala-prensa/noticias/pnud-cada-peso-invierte-prevencion-desastres-ahorran-pesos-costos-reconstruccion-infraestructura/442>
- NASA. (16 de 06 de 2015). Tropical Rainfall Measuring Mission. Obtenido de Mission Update : <https://pmm.nasa.gov/TRMM>

- NASA. (25 de 10 de 2016). The Transition in Multi-Satellite Products from TRMM to GPM (TMPA to IMERG). Obtenido de https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/TMPA-to-IMERG_transition_161025.pdf
- NASA. (2017). Global Precipitation Measurement . Obtenido de *Global Precipitation Measurement Mission* : https://www.nasa.gov/mission_pages/GPM/overview/index.html
- Nash, J. (2016). *The form of the instantaneous unit hydrograph* . IAHS, 114-121.
- NSSL. (2012). FLASH improving the science behind flash flood prediction. Obtenido de *Flooded Locations and Simulated Hydrographs Project*: <https://blog.nssl.noaa.gov/flash/>
- NSSL. (2014). Multi-Radar/Multi-Sensor System (MRMS). Obtenido de *The National Severe Storms Laboratory*: <https://www.nssl.noaa.gov/projects/mrms/>
- OAS. (1993). Capítulo 5. Sistemas de información geográfica en el manejo de peligros naturales. Obtenido de <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/ch10.htm>
- OCHA. (04 de 04 de 2017). Colombia – Avalancha e inundaciones en Mocoa (Putumayo). Obtenido de *Humanitarian Response*: <https://www.humanitarianresponse.info/es/operations/colombia/document/flash-update-no-4--colombia-avalancha-e-inundación-en-el-municipio-de>
- Ordoñez, J. (2011). Cartilla Técnica: Ciclo Hidrológico. Obtenido de *Sociedad Geográfica de Lima y Foro Peruano para el Agua*: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- OU - NOAA - CIMMS - NSSL. (2015). FLASH. Obtenido de <http://flash.ou.edu/desc.html>
- Quiñones, M., & Elías, I. (2012). El uso de la tecnología en el estudio de la vulnerabilidad a los desastres naturales. . Recuperado el 12 de 11 de 2017, de *Universidad de Puerto Rico*. : <http://amauta.upra.edu/vol1/vol1investigacion/desastresnaturales.pdf>
- Rawls, W., Brakensiek, D., & Miller, N. (1983). Green- Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydrology*. Obtenido de doi:10.1061/(ASCE)0733 -9429(1983)109:1(62)
- Reed, S., Schaake, J., & Zhang, Z. (2007). A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *Journal of Hydrology*, 402-420.
- Revista Semana*. (01 de 04 de 2017). Obtenido de "Hay barrios que desaparecieron por completo": Alcalde de Mocoa : <https://www.semana.com/nacion/articulo/alcalde-de-mocoa-jose-castro-habla-de-la-avalancha-y-lo-que-necesitan/520589>
- Rodríguez, Y. (12 de 2010). *Metodología para la simulación hidrológica de eventos extremos máximos en ausencia de datos hidrométricos a escala horaria*. Scielo.
- Rojas, L. P. (2015). Análisis Cambio De Cobertura Y Uso De Suelo En Los Periodos 2002 – 2012 En El Municipio De Mocoa, Putumayo. Obtenido de *Universidad Nacional Abierta y a Distancia*: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/3410/1/27362021.pdf>
- Romo, S. P. (15 de 07 de 2015). Universidad de Salzburg. Obtenido de *Estimación del riesgo por inundación en la ribera del Río Mulato (Mocoa-Colombia)*: https://issuu.com/unigis_latina/docs/merged__11_
- Semana Sostenible*. (11 de 04 de 2017). Obtenido de *¿Cuánto le han costado a Colombia los desastres de origen natural?*: <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/costo-de-los-desastres-de-origen-natural-en-colombia/37528>
- Semana Sostenible*. (01 de 04 de 2017). Hace 9 meses estudios advertían de la tragedia en Mocoa. Obtenido de <http://sostenibilidad.semana.com/medio-ambiente/articulo/mocoa-corpoamazonia-advirtio-de-la-tragedia-por-deforestacion/37471>
- SGC. (2016). Mapa nacional de amenaza por movimientos en masa. Obtenido de http://geoportal.sgc.gov.co/Flexviewer/Amenaza_Movimiento_Remocion_Masa/

- Sharma, K. D., Sorooshian, S., & Wheeler, H. (2008). *Hydrological Modelling in Arid and Semi-Arid Areas*. New York: Cambridge University Press.
- The University of Oklahoma. (2018). EF5. Obtenido de <http://ef5.ou.edu/>
- Tomaszewski, B. (2015). *Geographic Information Systems for Disaster Management*. Recuperado el 05 de 11 de 2017, de <https://www.crcpress.com/Geographic-Information-Systems-GIS-for-Disaster-Management/Tomaszewski/p/book/9781482211689#googlePreviewContainer>
- UNESCO. (2011). *Sistemas de Alerta Temprana*. Obtenido de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/San-Jose/pdf/Panama%20MANUAL%20INFORMATIVO.pdf>
- UNGRD. (2015). RESUMEN EJECUTIVO: IMPLEMENTACIÓN DE LOS PROCESOS DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES, PARA TRANSFERIR AL FNGRD, A NIVEL NACIONAL . Recuperado el 06 de 11 de 2017, de *Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres*: http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Proyectos-Inversion/2015/proyecto_implementacion_procesos_gr_2015_2018.pdf
- Unidad Administrativa Especial del Catastro Digital. (s.f.). *Sistema de información Geográfica*. Recuperado el 08 de 11 de 2017, de IDECA: <https://www.ideca.gov.co/es/sistema-de-informacion-geografica>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR) . (12 de 04 de 2012). Obtenido de *Using GIS for disaster risk reduction* : <https://www.unisdr.org/archive/26424>
- Universidad Nacional de Colombia. (07 de 04 de 2017). Detectan alertas sobre reconstrucción de Mocoa en la misma zona. Obtenido de <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/detectan-alertas-sobre-reconstruccion-de-mocoa-en-la-misma-zona.html>
- USGS - HydroSHEDS. (2013). *Data Downloads*. Obtenido de *HydroSHEDS*: <https://hydrosheds.cr.usgs.gov/dataavail.php>
- Vargas Cuervo, G. (03 de 04 de 2017). *Desastre de Mocoa se puede repetir en otros 385 municipios*. Obtenido de *Universidad Nacional de Colombia*: <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/article/desastre-de-mocoa-se-puede-repetir-en-otros-385-municipios.html>
- Vergara, H. (2018). *Lección de Modelamiento y Simulación*.
- Vergara, H., Hong, Y., Gourley, J., Anagnostou, E., Maggioni, V., Stampoulis, D., & Kirstetter, P.-E. (2014). *Effects of Resolution of Satellite-Based Rainfall Estimates on Hydrologic Modeling Skill at Different Scale*. *American Meteorological Society*, 593-613.
- Vergara, H., Kirstetter, P.-E., Gourley, J. J., Flamig, Z., Hong, Y., Arthur, A., & Kolar, R. (2016). *Estimating a-priori kinematic wave model parameters based on regionalization for flash flood forecasting in the Conterminous United States*. *Journal of Hydrology*, 421-433.
- Vrugt, J., Gupta, H., Bouten, W., & Sorooshian, S. (2003). *A shuffled complex evolution metropolis algorithm for estimating posterior distribution of watershed model parameters*. En *Calibration of Watershed Models*. Washington D.C.: American Geophysical Union.
- Wang, J., Hong, Y., Li, L., Gourley, J., Khan, S., Yilmaz, K., . . . Irwin, D. (2011). *The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model*. *Hydrological Sciences Journal*, 84-98.
- Wu, H., Huang, M., Tang, Q., Kirschbaum, D., & Ward, P. (2016). *Hydrometeorological Hazards: Monitoring, Forecasting, Risk Assessment, and Socioeconomic Responses*. *Advances in Meteorology* 2016, 1-3.
- Zambrano, M. (17 de 11 de 2015). *Estimaciones satelitales de precipitación y otros datos públicos útiles para la modelación hidrológica*. Obtenido de *Universidad de La Frontera*: https://www.researchgate.net/profile/Mauricio_Zambrano-

Bigiarini/publication/284703879_Estimaciones_satelitales_de_precipitacion_y_otros_datos_publicos_utiles_para_la_modelacion_hidrologica/links/56562db208ae1ef92979e317/Estimaciones-satelitales-de-precip

Zhao, R., Liu, X., & Singh, V. (1995). The Xinanjiang model. Comput. Models Watershed Hydrol, 215–232.

Zhao, R., Zhang, Y., Fang, L., Liu, X., & Zhang, Q. (1980). The xinganjiang model. IASH, 351–356.