IMPACTO DE LA COBERTURA ESPACIAL Y FRECUENCIA DE MUESTREO DE PRECIPITACIÓN EN LA MODELACIÓN DE INUNDACIONES EN CUNDINAMARCA, COLOMBIA

Bryan David Niño Colmenares
Sofia Paz Vileikis

Línea de Investigación:
Manejo Integrado del Recurso Hídrico

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, octubre de 2019

IMPACTO DE LA COBERTURA ESPACIAL Y FRECUENCIA DE MUESTREO DE PRECIPITACIÓN EN LA MODELACIÓN DE INUNDACIONES EN CUNDINAMARCA, COLOMBIA

Bryan David Niño Colmenares
Sofia Paz Vileikis

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

Director:
Humberto José Vergara Arrieta

Línea de Investigación:
Manejo Integrado del Recurso Hídrico

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2019

UNIVERSIDAD EL BOSQUE

Vigilada Mineducación

SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

ACTA No: 1104

El día 29 OCT 2019, en las instalaciones de la Universidad El Bosque, se desarrolló la sustentación del trabajo de grado titulado **IMPACTO DE LA COBERTURA ESPACIAL Y FRECUENCIA DE MUESTREO DE PRECIPITACIÓN EN LA MODELACIÓN DE INUNDACIONES EN CUNDINAMARCA, COLOMBIA,** escrito por **BRYAN DAVID NIÑO COLMENARES, C.C. 1015478288 y SOFÍA PAZ VILEIKIS, C.C. 1032479607**, bajo la dirección de **HUMBERTO JOSÉ VERGARA ARRIETA, C.C. 72276638,** como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental. El trabajo fue evaluado por los jurados **FELIX DARIO SÁNCHEZ LANCHEROS, C.C. 17049510** y **HERNANDO NIÑO PARRA, C.C. 19128303**, quienes deliberaron y concluyeron que cumple con los criterios de calidad, por lo que se determina que el trabajo es **Aprobado**.

En constancia, se firma en Bogotá, D.C., 29 OCT 2019

UNIVERSIDAD EL BOSQUE Dirección

KENNETH OCHOA VARGAS
Director
Programa de Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD EL BOSQUE SECRETARÍA ACADÉMICA Facultad de Ingeniería

GERMÁN AGUDELO ASCENCIO
Secretario Académico
Facultad de Ingeniería

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 velara por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

A Dios, por las bendiciones recibidas en todo momento, por darnos la salud, la fortaleza e inteligencia para desarrollar este trabajo de investigación y por habernos permitido culminar con éxito esta grandiosa experiencia. También, por los diferentes logros conseguidos durante nuestra carrera, que son el resultado de su ayuda.

A nuestros padres, hermanos y familiares, quienes desde un inicio manifestaron su apoyo, nos brindaron su acompañamiento y confianza a lo largo de este estudio; siendo la principal fuente de motivación para seguir adelante y haber podido cumplir esta meta.

Agradecimientos

A nuestro director de trabajo de grado, el Dr. Humberto J. Vergara Arrieta quien nos dio toda la asesoría necesaria para la formulación, ejecución y finalización de este proyecto. De igual modo, resaltamos sus innumerables aportes y valioso tiempo dedicado para el desarrollo de nuestra investigación. Asimismo, damos nuevamente gracias a él, y a su familia por habernos abierto las puertas de su hogar y ser un apoyo incondicional durante nuestra estancia en Norman, Oklahoma.

De igual manera, destacamos la colaboración recibida por el grupo de profesionales egresados de la Universidad El Bosque, que actualmente cursan sus estudios de posgrado en la Universidad de Oklahoma; Andrés Vergara, Jorge Duarte y Andrea Tavera, quienes nos acompañaron y ayudaron constantemente durante todo este proceso.

Por otro lado, queremos hacer un reconocimiento al Dr. Yang Hong quién fue una de las personas que permitió realizar este trabajo de grado, por medio de la pasantía de investigación en el laboratorio HYDROS, donde puso a nuestro alcance todos los recursos y espacios necesarios para realizar este proyecto.

Por último, y no menos importante resaltamos la participación del director del programa de Ingeniería Ambiental, Kenneth Ochoa y a los docentes Diana Hernández y Ricardo Tobón pues gracias a ellos pudimos conocer este espacio de investigación y nos motivaron a encaminarnos en esta maravillosa experiencia.

1. Tabla de Contenido

1. Tabla de Contenido 7
2. Listado de Tablas 8
3. Listado de Figuras 8
4. Resumen 11
5. Abstract 12
6. Introducción 12
7. Planteamiento del problema 13
8. Justificación 14
9. Objetivos 15
10. Marcos de referencia 16
    10.1. Antecedentes 16
        10.1.1. Breve contexto de la estimación de precipitaciones en Colombia y Cundinamarca . 16
        10.1.2. Convenio de investigación entre la Universidad el Bosque y la Universidad de Oklahoma 17
    10.2. Estado del arte 18
        10.2.1. Los Observing System Experiments (OSEs) en estudios hidrometeorológicos 18
        10.2.2. Factores espacio - temporales que impactan el rendimiento de las estimaciones de precipitación para la simulación de caudales 19
        10.2.3. Aplicación de métodos de interpolación en mediciones pluviométricas de precipitación 20
    10.3. Marco conceptual 22
        10.3.1. Precipitación 22
        10.3.2. Cuencas hidrológicas 22
        10.3.3. Inundaciones 25
    10.4. Marco teórico 26
        10.4.1. Mediciones de precipitación 26
        10.4.2. Modelamiento hidrológico 28
        10.4.3. Observing System Experiments (OSE's) 31
        10.4.4. Gestión del riesgo de desastres naturales 31
    10.5. Marco normativo 33
    10.6. Marco geográfico 34
        10.6.1. Generalidades 34
        10.6.2. Unidades de paisaje 35

10.6.3. Suelo 36
10.6.4. Clima 36
10.6.5. Hidrografía 37
10.7. Marco institucional 38
11. Metodología 39
11.1. Diseño de la investigación 39
11.1.1. Enfoque, alcance, unidad de análisis, método de la investigación 39
11.2. Plan de trabajo 43
11.3. Tabla metodológica 58
12. Aspectos éticos 60
13. Resultados, análisis y discusión 61
14. Conclusiones 96
15. Recomendaciones 98
16. Referencias Bibliográficas 99
17. Anexos 106
18. Glosario de términos 109

2. Listado de Tablas

Tabla 1. Características de la cuenca de acuerdo con la densidad de drenaje. 24
Tabla 2. Características de la cuenca de acuerdo con la forma. 25
Tabla 3. Clasificación de modelos de acuerdo con su funcionalidad. 29
Tabla 4. Normatividad aplicable al presente proyecto de investigación. 33
Tabla 5. Unidades hidrológicas del departamento de Cundinamarca, distribuidas sobre parte de las cuencas del río Magdalena y Meta. 37
Tabla 6. Variables experimentales de control. 41
Tabla 7. Descripción metodológica de la adquisición de los parámetros y archivos base para la configuración de EF5. 44
Tabla 8. Cuadro metodológico de la investigación. 59

3. Listado de Figuras

Figura 1. Hidrogramas de cuencas con diferentes formas y misma área y lámina de precipitación... 25
Figura 2. Diagrama del funcionamiento del programa de modelamiento EF5. 30
Figura 3. Ubicación de Cundinamarca en Colombia 35
Figura 4. Unidades Hidrográficas del departamento de Cundinamarca. 38
Figura 5. Delimitación del departamento de Cundinamarca con los puntos de drenaje en el ráster de acumulación de flujo. 46
Figura 6. Identificación de las instancias y sus correspondientes datos. 48
Figura 7. Representación de la distribución de la red de estaciones a resolución de 10 km y 5km.... 50

Figura 8. Red sintética de estaciones optimizada a una resolución de 10 km. 50
Figura 9. Procedimiento de interpolación mediante polígonos de Thiessen. 52
Figura 10. Polígonos de Thiessen generados para el área estudio, a partir de la red sintética de estaciones. 52
Figura 11. Parámetros del modelo de ajuste. 54
Figura 12. Esquema del plan de trabajo. 58
Figura 13. Área estudio delimitada, a partir del ráster de acumulación de flujo y la división política del departamento de Cundinamarca. 61
Figura 14. Mapa de calor con curvas de nivel, correspondiente a las instancias que excedieron el umbral de periodo de retorno de 2 años, entre 2014 - 2018. 63
Figura 15. Histograma de los eventos de inundación identificados entre 2014 - 2018. 64
Figura 16. Diagrama de barras de los máximos periodos de retorno correspondientes a cada evento de inundación. 64
Figura 17. Histograma del r2 obtenido de la regresión lineal logarítmica para el cálculo de los periodos de retorno en todos los pixeles del dominio del área estudio. 65
Figura 18. Histograma del número de eventos de inundación de acuerdo con su máximo periodo de retorno, entre el periodo 2014 - 2018. 66
Figura 19. Mapa de instancias identificadas de los eventos de inundación entre los periodos de retorno de 25 – 100 años, sobre la capa de promedio climatológico de precipitaciones totales anuales y curvas de nivel de Cundinamarca. 66
Figura 20. Mapa de instancias identificadas de los eventos de inundación entre los periodos de retorno de 25 – 100 años, sobre la capa de impermeabilidad de Cundinamarca. 68
Figura 21. Diagrama de barras de la duración estimada de cada evento de inundación. 69
Figura 22. Histograma del número de eventos de inundación de acuerdo con su duración. 69
Figura 23. Diagrama de barras del área característica de cada evento de inundación. 70
Figura 24. Mapas de eventos de inundación generados a partir de las instancias de superación del umbral de periodo de retorno de cada evento de inundación, sobre la capa de ríos y curvas de nivel; a) evento 61, b) evento 89 y c) evento 1. 71
Figura 25. Mapas ráster de la métrica estadística BIAS de cada método de interpolación. 73
Figura 26. Histograma de la métrica estadística BIAS, correspondiente a cada método de interpolación. 73
Figura 27. Mapas ráster de la métrica estadística RMSE de cada método de interpolación. 74
Figura 28. Histograma de la métrica estadística RMSE correspondiente a cada método de interpolación. 75
Figura 29. Mapas ráster de la métrica estadística coeficiente de correlación de cada método de interpolación. 76
Figura 30. Histograma de la métrica estadística CC, correspondiente a cada método de interpolación. 76
Figura 31. Mapas ráster de la métrica estadística BIAS del método de interpolación IDW, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos. 78
Figura 32. Histograma de la métrica estadística BIAS, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos. 78
Figura 33. Mapas ráster de la métrica estadística RMSE del método de interpolación IDW, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos. 79
Figura 34. Histograma de la métrica estadística RMSE, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos. 80

Figura 35. Mapas ráster de la métrica estadística CC del método de interpolación IDW, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos. 81
Figura 36. Histograma de la métrica estadística CC, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos. 81
Figura 37. Mapas ráster de la métrica BIAS de las simulaciones realizadas con IDW, frecuencia horaria y diaria respecto a la cobertura de medición de 30 minutos del producto satelital IMERG. 83
Figura 38. Histograma de la métrica BIAS de las simulaciones en comparación con la frecuencia temporal horaria y diaria. 83
Figura 39. Mapas ráster de la métrica RMSE de las simulaciones realizadas con IDW, frecuencia horaria y diaria respecto a la cobertura de medición de 30 minutos del producto satelital IMERG. 84
Figura 40. Histograma de la métrica RMSE de las simulaciones en comparación con la frecuencia temporal horaria y diaria. 84
Figura 41. Mapas ráster de la métrica CC de las simulaciones realizadas con IDW, frecuencia horaria y diaria respecto a la cobertura de medición de 30 minutos del producto satelital IMERG. 85
Figura 42. Histograma de la métrica CC de las simulaciones realizadas con IDW en comparación con la frecuencia temporal horaria y diaria. 85
Figura 43. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico área de drenaje. 87
Figura 44. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico factor forma. 89
Figura 45. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación, generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico pendiente media del cauce principal. 91
Figura 46. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación, generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico precipitación media. 93
Figura 47. Histograma del error, calculado por medio de la métrica BIAS, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa. 94
Figura 48. Histograma del error, calculado por medio de la métrica RMSE, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa. 94
Figura 49. Histograma del error, calculado por medio de la métrica CC, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa. 95

Siglas

BIAS: Sesgo medio relativo
CAR: Corporación Autónoma Regional
CC: Coeficiente de correlación
DNP: Departamento Nacional de Planeación
EF5: Ensemble Framework For Flash Flood Forecasting
GPM: Global Precipitation Measurement
IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
IGAC: Instituto Geográfico Agustín Codazzi
IMERG: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM
NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio
OMM: Organization Meteorological Mundial
OSSE: Observing System Simulation Experiment
OSE: Observing System Experiment
SIG: Sistemas de información geográfica
RMSE: Raíz del Error Cuadrático Medio

4. Resumen

El presente proyecto caracterizó el impacto en la modelación de inundaciones, generado por la cobertura espacial y frecuencia de muestreo, teniendo en cuenta las características de la red pluviométrica de estaciones de Cundinamarca, dado que las redes pluviométricas se caracterizan por tener vacíos en la medición de la precipitación, tanto a nivel espacial como temporal. De esta manera, se quiso determinar el impacto que estos vacíos ocasionan en la simulación de inundaciones. Para esto se ejecutaron tres fases correspondientes a los objetivos específicos. La primera consistió en la identificación de los eventos de inundación entre los años 2014 y 2018, la segunda en la generación de las superficies sintéticas de precipitación haciendo uso de técnicas de interpolación. Finalmente, en la tercera fase se determinó el impacto de la cobertura espacial y temporal de la precipitación interpolada, en la simulación de inundaciones, junto con los factores espaciales y temporales que la influencian. De esta manera, el principal resultado consistió en que al utilizar estimaciones de precipitación a una mayor frecuencia de medición temporal y una menor cobertura de medición, el rendimiento de la simulaciones de caudales de eventos de inundaciones tiende a disminuir, presentando muchos más errores; los cuales pueden verse influenciados por factores espaciales como el área de drenaje, forma del área de drenaje, pendiente media del cauce y la precipitación climatológica de la zona. Con respecto a factores temporales (época lluviosa o seca) no se encontró que estos ejerzan alguna influencia significativa.

Palabras clave: Modelamiento hidrológico, Producto satelital de precipitación, inundaciones, red de estaciones pluviométricas.

5. Abstract

The present project characterized the impact on flood modeling, generated by the spatial coverage and sampling frequency, considering the characteristics of the rain gauge data network of Cundinamarca, given that the gauge networks are characterized by gaps in the measurement of precipitation, both in temporal and spatial resolutions. Considering this, determining the impact that these gaps cause in the simulation of floods was determined. For this, three phases corresponding to the specific objectives were executed. The first was the identification of flood events between 2014 and 2018, the second, in the generation of synthetic precipitation surfaces using different interpolation techniques. Finally, in the third phase the impact of the spatial and temporal coverage of the interpolated precipitation was determined, in the simulation of floods, together with the spatial and temporal factors that influence it. In this way, the main result was that when using precipitation estimates at a higher frequency of temporal measurement and a lower measurement coverage, the performance of the simulations of flood events tends to decrease, presenting more errors; which can be influenced by spatial factors such as the drainage area, shape of the drainage area, average slope of the channel and the climatic precipitation of the area. With respect to temporal factors (rainy or dry season) it was not found that they exert any significant influence.

Keywords Hydrological modeling, satellite product of precipitation, floods, pluviometric stations network.

6. Introducción

La ocurrencia de eventos de inundación ocasiona grandes afectaciones; a nivel rural, afecta principalmente procesos productivos agropecuarios, y en el urbano donde la creciente concentración desordenada de población en las ciudades ha provocado que sistemas de drenaje de aguas lluvias colapsen fácilmente (Quispe & Rojas, 2015). Lo anterior, poniendo en riesgo el bienestar social que puede ir desde pérdidas económicas hasta de vidas humanas (Gómez, Muñoz, & Soto, 2018). Frente a esto, una alternativa directa es la realización de estudios sobre los mecanismos de medición de lluvia para la prevención o mitigación de los impactos ocasionados por las inundaciones, los cuales permitan generar aportes a la gestión del riesgo (González & Jurado, 2014).

En ese sentido, el uso de productos obtenidos por satélites artificiales, hoy en día, constituye uno de los principales insumos, debido a que se caracterizan por tener una alta frecuencia de muestreo y de registro de datos en la mayor parte del territorio (Tian & Peters, 2010). Sin embargo, estas se encuentran sujetas a errores generados por la espacio-temporalidad de la zona, como por ejemplo: la estacionalidad del lugar (húmeda o seca), variabilidad impuesta por la orografía y la estructura de la precipitación (Sun et al., 2018). No obstante, como menciona el International Research Institute for Climate and Society (IRI, 2015), estos resultan útiles en lugares donde sistemas tradicionales de medición pluviométrica son escasos, como en países en vía de desarrollo, donde la distribución de las estaciones tiende a ser dispersa y desigual. Lo anterior, sumado a que poseen una frecuencia de medición mucho menor a la satelital, dificulta su uso en el pronóstico de inundaciones a gran escala, pues si bien, resultan siendo una buena fuente de información cuando su ubicación coincide con el área de interés, su ausencia ocasiona vacíos espaciales y temporales de registros en lugares distantes a su localización (Ureña, Vallejos, Saavedra, & Escalera, 2018). Por lo anterior, es necesaria la aplicación de procedimientos como la interpolación de datos para luego si usarlos como insumo en la modelación (Ly, Charles, & Degré, 2013).

De acuerdo con lo anterior, se observa que las diferencias existentes en el muestreo espacial y temporal de información de estas técnicas son significativas. Sin embargo, gran parte de los esfuerzos

se centran en tratar las series de datos para disminuir el error generado por estas durante la medición de la lluvia, omitiendo el impacto que puedan ocasionar dichas diferencias a la hora de simular distintos eventos de inundación, a causa de los factores espaciales, como la geomorfología de la zona, y temporales, como la estacionalidad del año en el que se desarrolla dicho fenómeno. En este orden de ideas, la presente investigación tomó caso estudio el departamento de Cundinamarca, Colombia a partir del cual se realizó un experimento enfocado en el impacto de la frecuencia de muestreo y cobertura espacial de las técnicas. Es por esto que se tuvo como único insumo de precipitación las mediciones desde satélites, las cuales fueron usadas en un primer momento para la simulación de algunos eventos de inundación entre el 2014 - 2018, y en segunda instancia, esta fue adaptada a la frecuencia de medición y actual distribución de la red pluviométrica del departamento, para posteriormente ser interpolada. Como última etapa, se realizaron simulaciones con las mediciones satelitales y las superficies interpoladas para analizar las diferencias entre estas, en función de las variables geofísicas y transitorias asociadas al error.

Finalmente, con este documento se espera contribuir a una mejor comprensión científica de las mediciones de precipitación estimada desde satélites y pluviómetros, promoviendo así que personas e instituciones no las apliquen de forma indiscriminada sobre cualquier superficie, favoreciendo la disminución de errores y la obtención de mejores resultados en los sitios de interés.

7. Planteamiento del problema

Según el Catálogo Nacional de Estaciones (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2019), el departamento de Cundinamarca cuenta con una red de 347 estaciones pluviométricas y pluviográficas operadas por la CAR, federaciones y el IDEAM, las cuales suministran mediciones físicas directas de la lluvia superficial de forma puntual (Michaelides et al., 2009; Ravelo & Santa, 2000) y su distribución espacial está diseñada bajo los criterios de la Organización Mundial de Meteorología (OMM) (IDEAM, 2018). En contraste a esto, documentos como el de López, Rojas, y Pérez (2019) mencionan que la distribución, infraestructura y operación de esta red no es la ideal. De igual forma Hurtado y Mesa (2014) en su estudio señalan que en general a nivel nacional hay grandes áreas con una deficiente cobertura espacial, incluso en regiones donde la red se supone que es densa como es el caso de la región Andina (Caicedo, 2008). Por otro lado, en cuanto a su frecuencia de operación, las lecturas son diarias, iniciando a las 7:00 horas de la mañana de un día hasta el día siguiente (IDEAM, 2018).

En general, las características de las redes pluviométricas resultan en vacíos de información, los cuales tienden a aumentar cuando se carece de una red lo suficientemente densa, limitando así la capacidad para estimar la distribución espacio - temporal de la precipitación. Esto dificulta aspectos relevantes como la capacidad de estimar la variabilidad espacial de la misma, la cual tiende a aumentar en pequeñas escalas en regiones con características geográficas y climatológicas muy complejas (IRI, 2015) que al sumarse con las bajas frecuencias de muestreo, pueden ocasionar la omisión de intervalos cortos (<1h) de alta intensidad de precipitación, afectando negativamente la estimación de la distribución espacio-temporal de la precipitación a escalas relevantes para la detección y pronóstico de amenazas hidrometeorológicas como las inundaciones.

Teniendo en cuenta lo anterior, una fuente alternativa de información de observaciones y que actualmente se ha convertido en la única forma práctica de medir la precipitación a nivel mundial corresponde a la detección remota por satélite (Tian & Peters, 2010). Esta ofrece ventajas sobre las mediciones de redes pluviométricas en cuanto a muestreo en el espacio y tiempo, dado que los sensores montados en satélites han demostrado capacidades de medición con coberturas globales y frecuencias de registro sub-diarias (Huffman, Bolvin, & Nelkin, 2017). Sin embargo, estudios realizados por Dinku, Ruiz, Connor, y Ceccato (2009) y Shen, Xiong, Wang, y Xie (2010) evidencian que estas estimaciones son afectadas por la incertidumbre asociada a la naturaleza indirecta de esta técnica de medición, donde describen errores en la precisión de distintos productos satelitales de precipitación al representar la distribución espacial, las variaciones temporales y la frecuencia de lluvia en diferentes regiones.

Frente a este panorama, el presente trabajo plantea como hipótesis de investigación que las diferencias de muestreo existentes entre estas técnicas de medición ocasionan un mayor o menor impacto a la hora de simular eventos de inundación, dependiendo de las condiciones espaciales y temporales bajo las cuales se desarrolle dicho fenómeno. Es por esto que al finalizar este estudio se dio respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo, de la precipitación estimada desde satélites y estaciones pluviométricas, en la modelación de inundaciones en el departamento de Cundinamarca – Colombia?

8. Justificación

Este proyecto de grado hace parte del Convenio de Cooperación Educativo y Científico firmado en abril del año 2000 entre la Universidad El Bosque y la Universidad de Oklahoma, y está enmarcado en el acuerdo de colaboración entre el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad El Bosque y el Laboratorio Hidrometeorológico y Teledetección HyDROS iniciado en el año 2012. En este contexto se han realizado varios trabajos de grado cuyo eje temático ha sido el uso de datos satelitales de precipitación para el modelamiento hidrológico en algunas regiones de Colombia (Celis, 2017; González & Jurado, 2014; Tavera, 2018). En contribución a lo anterior, el presente proyecto busca realizar un estudio que permita obtener resultados sobre el efecto generado en la modelación de inundaciones al contar con una alta o baja cobertura espacial y frecuencia de muestreo de la precipitación. De esta manera al estudiar estos aspectos propios de los mecanismos de estimación satelital y pluviométrica se pretende caracterizar los factores espaciales y temporales que describen dicho impacto.

Por lo tanto, es importante hacer este tipo de investigaciones enfocados en los mecanismos de estimación, pues las precipitaciones al ser unas de las principales causantes de inundaciones (Salas & Jiménez, 2019) son un componente clave a tener en cuenta en estudios para la prevención de estos eventos y de esta forma los resultados que se generen, sean un aporte para los pronósticos y a su vez para la gestión del riesgo de regiones catalogadas como vulnerables.

Este es el caso de Cundinamarca, ya que según el Índice Municipal de Riesgo de Desastres Ajustado por Capacidades realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2019) es el departamento que presenta la mayor exposición a amenazas hidrometeorológicas, pues el 62,3% de su población se encuentra ubicada en zonas vulnerables a inundaciones, movimientos en masa y flujos torrenciales, fenómenos directamente relacionados con la precipitación. Cabe aclarar que, aunque el proyecto solamente se enfocará en las inundaciones y tendrá en consideración aspectos técnicos y teóricos relacionados con el modelamiento hidrológico, los resultados que se obtengan serán un posible insumo para la investigación de otros fenómenos que se presentan en el territorio.

En este sentido, el ingeniero ambiental al tener conocimientos sobre modelamiento hidrológico, estudios estadísticos, hidrología, meteorología, informática básica, sistemas de información geográfica, entre otros, tiene la capacidad de realizar estudios interdisciplinares para generar aportes en sectores relacionados como la gestión ambiental, gestión del riesgo, planificación, etc. Desde esta perspectiva contribuye en la generación de alternativas que permitan abordar problemas tanto de daños socioeconómicos en la población (afecciones a los damnificados, posterior inversión para la reconstrucción y rehabilitación) como ecológicos (impactos antrópicos en los suelos, cuerpos de agua, vegetación, fauna, entre otros).

9. Objetivos

Objetivo general:

Caracterizar el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo de estimaciones satelitales de precipitación, en contraste con la de redes pluviométricas durante la modelación de inundaciones, para así describir los factores espaciales y temporales asociados al mismo en Cundinamarca, Colombia.

Objetivos específicos:

- Identificar eventos de inundación que exhiban diferentes características espaciales y temporales a partir de simulaciones hidrológicas con precipitación satelital en el periodo de 2014 - 2018.

- Generar superficies de lluvia que se aproximen a la variabilidad espacial y temporal capturada por la red pluviométrica de Cundinamarca, con base en mediciones satelitales de precipitación.

- Determinar los factores espaciales y temporales que influencian el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo de precipitación en la simulación de inundaciones.

10. Marcos de referencia

10.1. Antecedentes

Esta sección se construye, a partir de una contextualización general de las estimaciones de precipitación a nivel nacional, poniendo en evidencia, el actual interés respecto al estudio de herramientas que puedan mejorar la estimación de precipitaciones en el país. Finalmente, se realiza una descripción del contexto bajo el cual se encuentra adscrito el presente trabajo en el convenio académico de investigación interinstitucional.

10.1.1. Breve contexto de la estimación de precipitaciones en Colombia y Cundinamarca

Desde su creación, el 1 de marzo de 1995, el IDEAM se ha encargado de la operación y mantenimiento de la red de observaciones y mediciones hidrometeorológicas en el país, asimismo, es la fuente de información científica oficial y máxima autoridad en el área de hidrología y meteorología del país. Hoy en día, esta institución posee grandes retos, debido a la frecuente ocurrencia de eventos hidrometeorológicos extremos, lo cual exige contar con datos de las condiciones de tiempo y clima que sirvan de base para la construcción de documentos que puedan ser usados como referencia para los tomadores de decisión (IDEAM & Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres [UNGRD], 2018).

Con base a lo anterior, el IDEAM (2018), ha venido desarrollando proyectos enfocados en el fortalecimiento de la red ambiental con diferentes actividades como la implementación de una plataforma que permita la integración de *software*, la recepción, procesamiento y visualización de registros provenientes de distintas fuentes, que también están siendo ampliadas y modernizadas, como: estaciones convencionales o automáticas, radares e imágenes de satélites (IDEAM, 2018); siendo este último, un producto de información del satélite geoestacionario *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES) el cual hace la estimación satelital de la precipitación en 24 horas mediante un algoritmo ajustado y calibrado, como complemento para lugares con baja densidad de cubrimiento (IDEAM, 2019). Entorno a lo anterior, IDEAM y UNGRD (2018) también establecieron el "Protocolo de Integración de la red pública y privada de estaciones hidrometeorológicas" donde definieron actividades a futuro con el fin de integrar los diferentes sistemas de recolección y generación de información hidrometeorológica, y con ello promover el fortalecimiento de la actual red nacional.

En ese sentido, a lo largo del territorio nacional se han desarrollado distintos trabajos que estudian las consideraciones que se deben tener al optimizar las herramientas que actualmente se usan o aquellas que pueden tener un alto potencial de aplicabilidad en el ámbito de las estimaciones de precipitación en el país, como se muestra a continuación:

En primera instancia se encuentra el estudio de Pinzón, Pulido, Santa, y Gómez (2013) donde aplicaron una metodología para el diseño de una red de muestreo espacial de medición pluviométrica en el departamento de Cundinamarca, con el propósito que sirva como base para reubicar estaciones que actualmente por su ubicación no permiten un muestreo óptimo a causa de la falta de criterios técnicos en su diseño, que ocasionan defectos de traslape y discontinuidades espaciales de muestreo. En este mismo sentido, López (2014) realizó una propuesta metodológica para el rediseño de la red meteorológica del departamento de Cundinamarca, haciendo uso de las teorías de redes formuladas por

Gadín y Kagan; expertos en diseño de redes. Pues como menciona en su trabajo, en esta región hay deficiente distribución y operación de las estaciones, haciendo que áreas queden sin cobertura o cuenten con información de baja calidad.

Frente a este panorama, se encuentran estudios que presentan otras formas de responder ante dicho contexto, como lo es la investigación de Cruz y Barrios (2018) quienes realizaron un trabajo en el departamento del Tolima, donde compararon cuatro métodos numéricos para el cálculo de estimaciones de valores faltantes de lluvia, para luego evaluar los errores de estimación. Lo anterior, debido a la falta de continuidad de los registros y baja confiabilidad que presenta la actual red de estaciones pluviométricas de la cuenca del río Coello; como información de apoyo utilizaron datos de lluvia proveniente de satélites. Por otro lado, se identificó el estudio de Santos, Vargas, Obregón, & Cárdenas (2011) quienes realizaron un estudio en la ciudad de Bogotá, donde hicieron una revisión de los parámetros que los modeladores deben tener presentes a la hora de realizar una interpolación espacial, a fin conocer la variación espacial de la lluvia, la cual es omitida por la medición puntual de la precipitación de las estaciones de medición pluviométrica, siendo este un problema para la planeación y operación de los sistemas de drenaje de la ciudad.

En este orden de ideas, se encuentran otros estudios que investigan el desempeño o habilidad de otro tipo de instrumentos que pueden proveer de información a aquellas cuencas no instrumentadas, entre los cuales se encuentra el estudio realizado por Dinku, Ruiz, Connor, y Ceccato (2010) donde evaluaron siete tipos de mediciones de precipitación desde satélites en distintas escalas de tiempo y de resolución espacial para diferentes partes del país, con el fin de observar su comportamiento en diferentes entornos. Otro estudio corresponde al de Rivas (2015) donde analizó mediante parámetros estadísticos la calidad de los registros provenientes de satélite TRMM en cuanto a la precipitación media mensual frente a las estaciones pluviométricas localizadas sobre la cuenca del río Bogotá. Por otro lado, la Agencia de Noticias Universidad Nacional (2018) reportó que en un estudio liderado por el profesor Germán Poveda Jaramillo, de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, sede Medellín, evaluó la precisión del satélite TRMM en la estimación de lluvias en el país, encontrando que en ciertas regiones es más acertado que en otras.

Al finalizar la anterior investigación, se evidencia el interés de las instituciones estatales por tener un mejor conocimiento de la meteorología del país, especialmente en el ámbito de las precipitaciones, donde como se pudo notar, existen grandes retos en cuanto al mejoramiento continuo de herramientas y técnicas de medición de precipitación. Para esto, como es de saber, es indispensable contar con información que pueda servir como insumo a la hora de tomar algún tipo de decisión en torno a este tema. Es así como en los artículos revisados fue posible identificar su aporte en diversos campos como: el mejoramiento de redes pluviométricas, métodos de interpolación de datos de precipitación pluviométrica o el estudio del rendimiento nuevas fuentes de información, como lo es la precipitación medida desde satélites. Teniendo en cuenta esto, el presente trabajo, al responder la pregunta de investigación planteada espera poder aportar información en torno a un mayor conocimiento del uso de estimaciones de precipitación en la modelación hidrológica de inundaciones.

10.1.2. Convenio de investigación entre la Universidad el Bosque y la Universidad de Oklahoma

El programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad El Bosque, en aras de fortalecer el conocimiento científico de sus estudiantes, y del territorio nacional, respecto al uso de tecnologías que

permitan monitorear y pronosticar fenómenos ocasionados en el ambiente natural. Ha venido desarrollando diferentes investigaciones como se muestra a continuación:

En el estudio realizado por González y Jurado (2014) evaluaron la utilidad del producto satelital 3B42RT de la misión TRMM de la NASA, en la modelación y predicción de fenómenos de inundación en la cuenca del río Bogotá, Colombia. Para tal efecto, estudiaron la habilidad de este tipo de estimaciones de precipitación en una zona de relieve complejo, tomando como punto de comparación registros de la red hidrológica del IDEAM. Posteriormente, Celis (2017) realizó un estudio en la cuenca del río Meta donde evaluó los beneficios existentes en la detección de sequías mediante la aplicación integrada de indicadores eco hidrológicos, estimados a partir del uso de registros de monitoreo remoto en contraste con la habilidad individual del índice de precipitación. Por último, Tavera (2018) evaluó y describió el impacto de la resolución espacial y temporal con el fin de conocer la habilidad de un sistema de predicción para simular la ocurrencia, extensión y severidad del evento de Mocoa, en el año 2017, para asimismo, determinar su potencial de aplicabilidad en el territorio nacional.

10.2. Estado del arte

A continuación, se dan a conocer diferentes documentos que aportan al presente estudio información relevante para la construcción de la metodología, generación de hipótesis, análisis de resultados y algunas recomendaciones a tener en cuenta en el desarrollo de diferentes actividades del presente estudio.

10.2.1. Los Observing System Experiments (OSEs) en estudios hidrometeorológicos

Con el propósito de conocer como ha sido abordada la aplicabilidad, y en efecto, evidenciar la utilidad de este tipo de experimentación se estudiaron distintos documentos, reportándose a continuación los que tuvieron una mayor similitud metodológica al presente estudio:

Vergara et al. (2014) realizaron una investigación de la incertidumbre asociada a la resolución de los productos de lluvia obtenidos desde satélites debido a que esta corresponde a una fuente de error a la hora de ser usados en aplicaciones hidrológicas. Teniendo en cuenta lo anterior, en dicho estudio se diseñó y analizó un método que tuviera solamente en cuenta los errores aportados por la resolución espacio - temporal de los productos de lluvia. Al revisar su metodología, resultó de interés para el presente trabajo el experimento sintético llevado a cabo en la etapa de aislamiento de la incertidumbre asociada a la resolución del producto de lluvia, debido a que crearon un escenario donde las demás fuentes de error fueron ignoradas virtualmente. Para lograrlo usaron el producto de alta resolución *Multisensor Precipitation Estimation* (MPE) (a 4Km, por hora) como referencia, el cual se volvió a muestrear a una resolución más gruesa correspondiente a la de los productos satelitales de la misión TRMM, a 25 km, cada 3 horas. Con la realización de dicho escenario, los autores ejecutaron simulaciones hidrológicas a partir de las cuales determinaron algunos de los impactos generales de la degradación de la resolución en este campo de aplicación.

Vergara (2015) realizó en una de sus etapas de investigación un *Observing System Simulation Experiments* (OSSE's); usando el modelo EF5, el cual también se usó en el presente estudio. Su experimento consistió, en la calibración de un modelo distribuido a partir de series de tiempo simuladas

de flujo, las cuales fueron generadas por un segundo modelo hidrológico distribuido, considerándose, así como observaciones sintéticas, debido a que los caudales de flujo de referencia se originaron a partir de un modelo, y no de mediciones reales. Lo anterior permitió al autor conocer otros estados del sistema que usualmente para sistemas físicos reales no se encuentran disponibles. Teniendo en cuenta esto, pudo ilustrar el impacto de la calibración del modelo en la simulación hidrológica.

En el documento de Cecinati, Moreno, Rico, Veldhuis, & Langeveld (2018) investigaron y compararon las aplicaciones de *Kriging for Uncertain Data* (KUD) en la interpolación de registros de lluvia medidos por pluviómetros y la fusión de pluviómetros con radar. En la primera parte de su metodología realizaron distintos estudios por medio de experimentos sintéticos, que parten de una configuración común, con el fin de evaluar el rendimiento de la interpolación, para lo cual cambian en cada escenario alguno de los tres siguientes factores: la variabilidad del campo de precipitación, la densidad de pluviómetros y la precisión de los puntos de medición. Lo anterior, permite dar cuenta de la utilidad de los experimentos sintéticos a la hora de analizar el impacto de una variable sobre el comportamiento de un sistema lo cual será de suma importancia a la hora del diseño metodológico de la presente investigación.

Al realizar la búsqueda de los artículos de investigación sobre esta temática, no fue posible identificar un trabajo que abordara el mismo planteamiento de problema haciendo uso de dicha metodología. Sin embargo, la utilidad observada de este tipo de experimentación se destaca por medio del control de una o más variables de una determinada observación, junto con el aislamiento de posibles fuentes de error, lo cual resulta de gran relevancia a la hora de generar análisis y conclusiones mucho más confiables. De esta manera, también fue posible evidenciar el uso de otra serie de referencias al termino OSE's, como: OSSE's o experimentos sintéticos.

10.2.2. Factores espacio - temporales que impactan el rendimiento de las estimaciones de precipitación para la simulación de caudales

Los documentos citados en esta sección abordan diferentes aspectos asociados a la caracterización de los factores espaciales y temporales que influencian las estimaciones de precipitación en el modelamiento hidrológico, lo cual permite dar una guía a la hora de considerar aspectos a tener en cuenta en los análisis de resultados.

Se estudió el documento de Harris et al. (2007) el cual investigó el efecto de la incertidumbre de los datos de precipitación desde satélites en la cuenca del río Cumberland en Kentucky, Estados Unidos. Entre sus hallazgos más relevantes se encuentra que el ajuste de sesgo realizado a los datos satelitales de precipitación, si bien disminuye la probabilidad de que el modelo genere falsos picos en el flujo de corriente, este también ocasiona la pérdida de picos verdaderos durante la simulación. Es por esto que exponen la necesidad de realizar estudios que definan las precauciones que deben tener en cuenta los modeladores a la hora de realizar una aplicación hidrológica. Lo anterior, es de gran relevancia para el presente trabajo debido a que se evidencia que las técnicas de ajuste de sesgo no son suficientes, y que por el contrario es pertinente entender cómo se comporta la propagación de errores en la modelación.

En un estudio realizado por Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, y Borga (2015) se hizo una evaluación de las propiedades de error para precipitación a escala de cuenca, como de los caudales simulados en un modelo hidrológico semidistribuido, y la relación entre ellos, para distintos tipos de cuenca (tamaño

y elevación) y tormenta, al noreste de Italia. Los principales resultados sugieren que la variación del error está sujeta a una dependencia entre la escala de la cuenca y la estacionalidad, teniéndose un mejor desempeño y consistencia de las simulaciones para escalas de cuencas moderadas a grandes, en los meses de estación fría a cálida. Lo anterior, proporciona para la presente investigación información relevante respecto a las condiciones bajo las cuales puede darse una mayor o menor propagación del error al simular eventos de inundación.

En otro documento realizado por Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, Zoccatelli, y Borga (2016) se hizo un análisis de la propagación del error de precipitación satelital en simulaciones de diferentes tipos de inundaciones que ocurrieron en cuencas montañosas en los Alpes del este de Italia. En general, los resultados evidenciaron la existencia de patrones de error de acuerdo con el tipo de inundación, lo cual resulta relevante para la presente investigación puesto que las descripciones realizadas para cada situación son insumo para la sección de discusión de resultados. De igual forma, en dicho trabajo se señalan otra serie de factores, evidenciados en distintas investigaciones, como: las propiedades de la precipitación regional, la geomorfología del área, las condiciones de la cuenca, la elección de la complejidad del modelado y en conjunto las interacciones de todos estos como influyen en el rendimiento de los productos de precipitación satelital y su simulación.

La investigación realizada por Maggioni y Massari (2018) resulta importante para el presente estudio puesto que da a conocer diferentes resultados sobre el uso de productos de precipitación satelital en la modelación de inundaciones; entre los más relevantes se menciona que el impacto de las inundaciones no solo depende de las características del evento, sino también de las de la región, como lo es la densidad de población, el uso de la tierra, los factores geofísicos y climáticos. Por otro lado, en cuanto al rendimiento de los modelos hidrológicos se identificó que factores como el tipo de precipitación, la estacionalidad, la formulación del modelo hidrológico y la topografía pueden influenciarlos.

Si bien el presente estudio, no se centra en la investigación de la utilidad de un producto satelital en específico o en los errores generados por la naturaleza indirecta de estimación de lluvia. La anterior revisión documental, permitió evidenciar los posibles factores espaciales (características geofísicas del territorio) y temporales (aspectos climáticos), que se deben considerar como variables de influencia en las series de caudal simuladas para eventos de inundación, lo anterior, una vez se quiera evidenciar el impacto de la diferencia de cobertura espacial y frecuencia de medición de la precipitación.

10.2.3. Aplicación de métodos de interpolación en mediciones pluviométricas de precipitación

La siguiente investigación, se realizó con el propósito de generar una base teórica de las características de distintos métodos de interpolación, haciéndose énfasis en el rendimiento que se evidencie en el respectivo estudio y las condiciones espaciales del área donde se realizó:

En el trabajo de Diodato y Ceccarelli (2005) se emplean dos métodos de interpolación, distancia al cuadrado inversa (IDW, por sus siglas en inglés) y Cokriging Ordinario, con el fin de demostrar como al usar un modelo digital de elevación puede mejorar dicho proceso en una cuenca de 1400 km^2 al sur oeste de Italia. Los resultados indicaron que el método IDW ignora los datos de elevación, generando mayores errores de estimación. Mientras que Cokriging Ordinario al considerar la elevación ocasiona errores de precisión más pequeños, sugiriendo así los autores que, en regiones montañosas la lluvia es un factor geomorfológico importante.

Se estudió la investigación de Keblouti, Ouerdachi, y Boutaghane (2012), la cual tuvo como lugar de interés la ciudad costera de Annaba, al este de Argelia, la cual posee una baja densidad de red de pluviómetros. El objetivo de este estudio fue determinar el método de interpolación más adecuado, para ello utilizaron las técnicas de interpolación de Spline, IDW y Kriging Ordinario. Los resultados evidenciaron que Kriging Ordinario y Spline obtuvieron los resultados más ineficientes mientras que el método de ponderación inversa se posicionó como el método más representativo para caracterizar la lluvia en dicha ciudad.

En el estudio de Ly, Charles, y Degré (2013) se proporciona información de la aplicabilidad de la interpolación en la hidrología y el modelamiento hidrológico. Sumado a esto, presenta una revisión de distintos métodos de interpolación espacial de registros de precipitación de redes pluviométricas, esto de acuerdo con el tipo de enfoque: determinista (polígono de Thiessen, IDW, entre otros) y geoestadístico (Kriging en sus distintas versiones). Identificándose diferentes aspectos a tener en cuenta cuando se requiere aplicar alguna de estas metodologías, como lo es: la densidad de pluviómetros (disponibilidad de los datos de lluvia), calidad de las observaciones, topografía de la zona y la naturaleza de la lluvia de la región estudio. Lo anterior, servirá de apoyo a la hora definir los métodos de interpolación para la segunda fase de este trabajo.

En el trabajo de grado elaborado por Cifuentes (2016) se determinó la utilidad de diferentes métodos de interpolación, determinísticos como: IDW, *Global Polinomial Interpolation* y geoestadísticos como: Kriging Ordinario y Kriging Universal, en eventos climáticos en el departamento de Caldas, ubicado en la zona andina ecuatorial, usando precipitación diaria proveniente de estaciones meteorológicas. Los resultados reflejaron que la técnica de IDW mostró mayor precisión en la predicción de lluvia, con errores menores. Este estudio es de gran utilidad puesto que expone diferentes herramientas de análisis estadístico para la evaluación de las técnicas de interpolación. Además, resulta relevante puesto que las características geográficas que comparte con el área de estudio son significativas.

La investigación realizada por Cruz y Barrios (2018) tuvo como objetivo contrastar cuatro métodos para calcular datos faltantes de precipitación mensual (método de relación normal (RN), Kriging Ordinario (OK) y dos derivaciones de Cokriging Ordinario (CKO) que utilizan la elevación y datos de lluvia estimada mediante satélite como información auxiliar) con el fin de evaluar los errores de estimación. Para esto tuvieron como área de estudio una cuenca ubicada en la Región Andina del departamento del Tolima; caracterizada por tener una orografía compleja. De acuerdo con los resultados obtenidos, el método que menor error tuvo a la hora de estimar los registros de precipitación faltantes fue Cokriging, el cual tuvo la elevación como información auxiliar, concordando así con la descripción realizada de distintos artículos de investigación citados en su introducción.

Teniendo en cuenta la anterior revisión, es posible concluir que aquellas técnicas, en su mayoría métodos geoestadísticos, que tienen en cuenta la dependencia espacial, es decir, tienen la altitud como información auxiliar, proporcionan mejores resultados de interpolación, más aún si el área de estudio se caracteriza por poseer una orografía compleja; como es el caso del departamento de Cundinamarca, el cual se ubica sobre la cordillera oriental. Por otro lado, es de notar que los métodos deterministas, aquellos que no consideran la altitud, presentaron un buen desempeño en aquellos lugares con un relieve relativamente plano.

10.3. Marco conceptual

A continuación, se exponen los conceptos más importantes para la comprensión del proyecto:

10.3.1. Precipitación

La precipitación es la caída de agua desde la atmósfera hacia la superficie terrestre en forma de hidrometeoros: lluvia, nieve, granizo. Constituye la principal fuente abastecedora del ciclo hidrológico. Se genera cuando el nivel de humedad relativa del aire es del 100% y llega a su punto de saturación, instante en el que el vapor de agua se transforma en agua líquida y forma las nubes, las cuales en diferentes condiciones de presión y temperatura generan precipitación en forma de hidrometeoros (Bedient, Huber, & Vieux, 2013; De Miguel, Lado, Martinez, Leal, & García, 2009).

En este sentido, dependiendo de las condiciones nombradas, la precipitación está clasificada en tres tipos principales: ciclónica, convectiva y orográfica. Con respecto a la primera, también llamada frontal, resulta del movimiento de masas de aire que por sus diferencias en temperatura chocan y se mueven en sentidos contrarios, el caliente asciende y el frio desciende. Se caracteriza por ser de larga duración, baja intensidad y ocurre en grandes extensiones de terreno. El segundo mecanismo se genera por el calentamiento de la superficie haciendo que las capas de aire adquieran mayor temperatura, menos presión y asciendan hasta llegar al punto en que por la baja temperatura y alta presión, empiecen el proceso de condensación. Sucede esporádicamente, su tiempo de duración es corto y se presenta en áreas pequeñas. Finalmente se encuentra la orográfica, donde una masa de aire húmedo y cálido asciende por el barlovento de una interferencia montañosa (costado frente al viento), se enfría y genera precipitación, al otro lado de la montaña (sotavento) el aire desciende seco forma regiones áridas y con poca humedad. En terrenos de altas montañas la máxima precipitación se produce antes de la divisoria de aguas y en bajas montañas sucede al pasar la divisoria de aguas, pues la masa de agua continúa ascendiendo (Bedient et al., 2013; Lozano, 2018).

De esta manera, las precipitaciones se consideran fenómenos que varían en el espacio y en el tiempo, pues múltiples factores tanto de las variables meteorológicas como de las fisiográficas ocasionan que los eventos de lluvia tengan diferentes extensiones y duraciones (Alfonso & Schnabel, 2017). De esta manera en cuencas con áreas iguales o mayores a 25 km^2 se pueden encontrar varios eventos con características diferentes (OMM, 2009).

10.3.2. Cuencas hidrológicas

La cuenca hidrológica se considera como un área terrestre que se encuentra delimitada por el relieve a partir de un divisoria de las aguas, donde las aguas, generalmente precipitadas que surgen o caen dentro de ésta, tienden a ser drenadas por un sistema hídrico superficial y subterráneamente conformado por corrientes tributarias, que conducen sus aguas a un río, mar, lago u otro cuerpo de agua (Aparicio, 1992; Lozano, 2018).

Dentro de la cuenca hidrográfica se distinguen tres sectores, que están en función de las características topográficas del medio las cuales influyen en sus procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos:

- Cuenca alta: Correspondiente a las áreas montañosas limitadas en la parte superior por la divisoria de aguas. Conocidas también como zona de cabecera de montaña, donde nacen las corrientes hidrológicas. Se caracterizan por presentar altas pendientes y velocidades de flujo, poco caudal y grandes rocas (Lozano, 2018).
- Cuenca media: En esta se unen las aguas provenientes de las partes altas. Otra de sus denominaciones es zona de transición y es donde el río principal mantiene un cauce definido Tiene pendientes moderadas, caudales mayores, velocidades menores y rocas medianas y/o pequeñas (Lozano, 2018).
- Cuenca baja: Se caracteriza por tener pendientes más suaves comparadas con las anteriores zonas. Los ríos tienen flujos lentos con presencia de arenas y limos. Asimismo se encuentra el punto de desembocadura a otro cuerpo de agua ya sea a ríos mayores, estuarios, humedales o el mar (Lozano, 2018).

Generalmente la transición entre estos sectores es específica en cada cuenca pues cada una tiene diferentes factores que controlan su flujo hidrológico. Estos se dividen en permanentes y transitorios Los primeros hacen referencia a características de los cauces, densidad de drenaje y particularidades de la cuenca (tamaño, forma, pendiente y relieve). Los segundos corresponden a la evaporación, precipitación (cantidad, intensidad y duración), la capacidad de almacenamiento del sustrato y del suelo. Cabe destacar en esta sección un factor intermedio que también interviene en el flujo hidrológico y corresponde a las actividades antropológicas como el cambio de uso de suelo con cultivos, prácticas agrícolas, deforestación, urbanización, entre otros (Londoño, 2001; Lozano, 2018).

Teniendo en cuenta lo anterior, esta parte del trabajo se va a enfocar en los factores permanentes de las cuencas. Lo referente a la densidad de drenaje y a las características de la cuenca, pues serán aspectos tratados más adelante en el desarrollo del documento:

Densidad de drenaje

Consiste en la relación entre la longitud total de los drenajes y el área de la cuenca, es una característica relevante pues manifiesta la relación entre el relieve, pendiente, suelos y vegetación. La mezcla de estos aspectos puede dar la habilidad a la cuenca de responder a fuertes precipitaciones, pues a mayor densidad habrá mayor desplazamiento del agua, subidas del caudal rápidas y con menor duración (Londoño, 2001). En este sentido esta característica se encuentra relacionada con el tiempo de concentración el cual corresponde al tiempo que tarda una gota de agua precipitada en llegar desde un punto de diseño hasta un punto de interés en la cuenca (Londoño, 2001; Reyes, Ulises, & Carvajal, 2010). En la siguiente tabla se muestra a través de la comparación de una densidad alta y baja diferentes características que puede tener la cuenca:

Tabla 1. Características de la cuenca de acuerdo con la densidad de drenaje.

Características	Densidad alta	Densidad baja
Velocidad de respuesta de drenaje a la precipitación	Rápida	Lenta
Erosión del suelo	Fácilmente erosionables	Resistentes a la erosión
Permeabilidad del suelo	Relativamente impermeable	Permeable
Duración de avenidas torrenciales	Corta	Larga

Adaptado de: (Londoño, 2001; Lux, 2016)

Tamaño o área de la cuenca

Según Lux (2016), el área de una cuenca es "la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido directa o indirectamente a un mismo cauce natural, correspondiente a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio"(p. 3). Una de las características generales atribuidas a este factor se encuentra en la relación entre su extensión y la magnitud del caudal, donde en condiciones normales los promedios mínimos, máximos instantáneos aumentan a medida que el área de la cuenca crece. Sin embargo, hay condiciones donde esta relación no se cumple debido a razones como: terrenos muy permeables, cauces extensos, zonas inundables y otros factores morfológicos particulares de la región (Londoño, 2001).

Forma

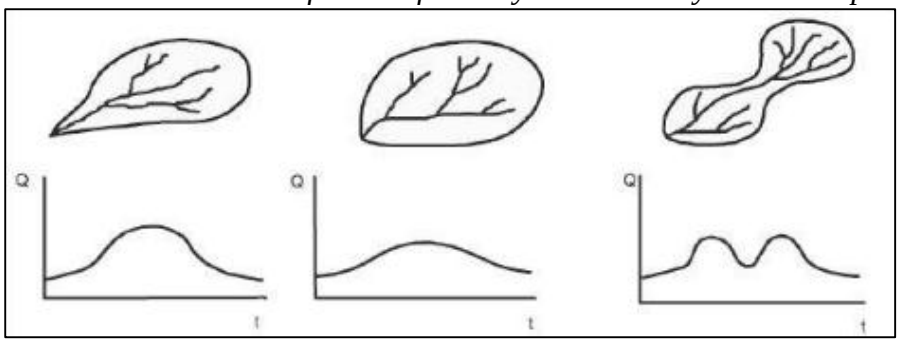
Debido a diversos factores geológicos se generan diferentes tipos de cuencas. Estos aspectos influyen en el comportamiento de la escorrentía del agua en la misma. Para representar de manera general las características que dependen de la forma de la cuenca se realizó la siguiente tabla donde, por temas prácticos, se comparan los dos extremos de tipos de formas (alargada-redonda). En este sentido, una cuenca cuya forma tienda a ser redonda presentará un amortiguamiento a crecientes bajo, pues al conservar una distribución de drenajes cuasi uniforme, el tiempo de concentración que demora en escurrir el agua en el terreno será más o menos el mismo en la mayoría de los drenajes y el canal principal estaría recibiendo casi al mismo tiempo un volumen similar al de la mayoría de sus caudales. Por lo tanto, una cuenca con tendencia alargada, al tener todos los comportamientos nombrados en el ejemplo anterior, pero con un carácter irregular, poseerá una mejor capacidad de amortiguación. Estas características explican en parte las razones por las que en eventos con características similares y con una cantidad de lluvia parecida, la forma de la cuenca es quien determina los resultados, esto se puede evidenciar en la *Figura 1* donde se muestran tres cuencas con distinta forma pero la misma área y cantidad de lámina precipitada (Londoño, 2001; Reyes et al., 2010).

Tabla 2. Características de la cuenca de acuerdo con la forma.

Características	Forma	
	Alargada-rectangular	Redonda-circular
Longitud del río principal en comparación a los otros drenajes	Más larga	No tan larga en comparación a los otros drenajes
Distribución de drenajes tributarios en la cuenca	Irregular	Regular
Tiempo de concentración en de drenajes tributarios	Heterogéneo	Uniforme
Picos de crecidas	Paulatino	Súbito
Amortiguamiento a crecientes	Alto	Bajo

Adaptado de: (Londoño, 2001; Reyes et al., 2010).

Figura 1. Hidrogramas de cuencas con diferentes formas y misma área y lámina de precipitación



Fuente: Guerrero, s. f. (como se citó en Londoño, 2001).

Relieve y pendiente

Con respecto a la pendiente es una característica que se encuentra directamente relacionada con la velocidad de la escorrentía, el tiempo de concentración y la probabilidad de inundación de una región. En pendientes o inclinaciones altas hay una tendencia a que se generen crecientes en tiempos relativamente cortos porque hay un aumento de velocidad de flujo, sucediendo lo opuesto en terrenos con pendientes bajas. Por otro lado, el relieve es un factor que influencia más que todo la densidad de drenaje, pues la presencia de terrenos montañosos propicia en la cuenca densidades de drenaje altas y lo contrario cuando tiendan a ser más planos (Londoño, 2001; Lux, 2016).

10.3.3. Inundaciones

Según Jiménez y Salas (2019) las inundaciones son eventos que debido a diferentes causas como precipitación, oleaje, marea de tormenta o por problemas estructurales generan en el terreno un incremento en el nivel superficial del agua o de los cuerpos de agua provocando desbordamientos.

En este sentido, solo se tendrán en cuenta las inundaciones causadas por la precipitación. Estas se dividen en inundaciones pluviales y fluviales y son causadas por la influencia de lluvias intensas o continuas. El primer caso sucede cuando las condiciones de capacidad de retención e infiltración del

suelo son superadas y se generan acumulaciones de agua. El segundo, cuando las lluvias se presentan en cualquier lugar de la cuenca y a partir de la escorrentía de esta se supera la capacidad máxima de transporte del cuerpo de agua, el cauce se desborda e inunda los terrenos aledaños. Pueden ser inundaciones lentas las dadas en terrenos con poca pendiente y súbitas donde pequeñas corrientes evolucionan en magnitud y tiempo muy rápidos ocasionando violentos torrentes (R. Hernández, Fernandez, & Baptista, 2014).

Las inundaciones son fenómenos naturales que solo cuando implican al ser humano adquieren la connotación de peligrosidad, pues en condiciones normales el entorno físico mantiene un equilibrio donde estos eventos hacen parte de un ciclo normal, sin embargo, cuando se generan asentamientos en regiones aledañas a las rondas del río o cercanos a estos y fuera de eso hay actividades de deforestación y cambios de uso del suelo se modifica la respuesta hidrológica de la cuenca a este fenómeno aumentando su magnitud, ocurrencia y durabilidad (Salas & Jiménez, 2019).

10.4. Marco teórico

10.4.1. Mediciones de precipitación

La medición de la precipitación según la OMM (2008) consiste en obtener muestras representativas de precipitación en una región determinada. Como es un fenómeno que presenta variabilidad espacio - temporal, la representatividad se compromete con variables aleatorias, por lo que se debe contar con observaciones espaciales y continuas. Estas características proponen los retos que deben tener los instrumentos o mecanismos de medición. En este sentido existen diferentes mecanismos de medición de precipitación: los que se encuentran en la superficie terrestre (pluviómetros y radares) o los espaciales (satélites), cada uno con metodologías particulares, como la cobertura y frecuencia de medición.

En este trabajo solo se mencionarán las estimaciones pluviométricas y las satelitales pues son los métodos de medición de interés en el estudio. Teniendo en cuenta lo anterior se pretende puntualizar en las características de cobertura y frecuencia que tiene cada una.

Mediciones pluviométricas

Las mediciones pluviométricas y/o pluviográficas se caracterizan por realizar mediciones de la lluvia puntuales y directas por lo tanto los datos obtenidos de precipitación solo cubren el área próxima a la estación (Michaelides et al., 2009; Ravelo & Santa, 2000). Debido a esto, para estimar la lluvia en grandes extensiones es necesaria una red de estaciones cuyo número y distribución depende de diferentes factores como: las variables fisiográficas y con ello la variabilidad de la precipitación, estacionalidad de la región (seca o lluviosa), entre otros. En terrenos con extensas áreas planas y eventos de gran magnitud basta con una red dispersa, en cambio en regiones montañosas con lluvias variables es necesaria una red mucho más densa (Lozano, 2018). Por lo tanto, para estimar la distribución adecuada y con ello las distancias entre las estaciones, existen diferentes propuestas donde sugieren ecuaciones que determinan el número de estaciones de acuerdo con el área de la cuenca. Según Brandt Johnson y Ratnayaka en su libro *Suministro de agua* (2009) sugieren que por lo menos

debe haber una estación por cada 25 km^2, sin embargo, a medida que el terreno tienda a ser más montañoso la distancia entre estas debe ser cada vez más corta.

La frecuencia de medición por lo general dependen de las políticas particulares de cada país. En Colombia se realiza a las 7:00am de cada día en las estaciones pluviométricas, sin embargo existen las estaciones sinópticas las cuales hacen sus mediciones cada hora (IDEAM, 2018).

Frente a este panorama, se puede evidenciar que este tipo de medición se caracteriza por tener vacíos espaciales y temporales, por lo tanto, requiere el uso de procesos que permitan pasar de mediciones puntuales y con frecuencia diaria a mediciones con valores superficiales y otras frecuencias menores a las de un día. Una de las herramientas es por medio de métodos de interpolación, donde sus resultados están condicionados por la densidad de estaciones y el grado de exactitud de los cálculos estadísticos que empleen en su formulación, dado que su principio consiste por medio de cálculos estadísticos obtener superficies partiendo como fuente de datos información en este caso puntual (Fallas, 2007).

Métodos de interpolación

Los métodos de interpolación se dividen en métodos determinísticos y geoestadísticos. Los primeros parten de la ubicación de las estaciones con su valor particular y generan un promedio ponderado de los valores regionalizados. Los métodos más comunes que usan este mecanismo son: Polígonos de Thiessen (THI), Ponderación de Distancia Inversa (en sus siglas en inglés IDW), Interpolación Polinómica (PI), Spline, Regresión de la Ventana Móvil (MWR) entre otros. Los geoestadísticos se fundamentan en estadísticas que usan la autocorrelación (relaciones estadísticas entre los puntos medios), emplean variables auxiliares y proporcionan medidas de certeza y precisión. Uno de los métodos de esta categoría se llama Kriging, el cual tiene diferentes variaciones con el mismo principio básico mencionado los cuales son Kriging Simple, Ordinario, Universal, de Deriva Externa, Residual y Cokriging, entre otros (Ly et al., 2013).

Mediciones desde satélites

Las mediciones desde satélites se realizan mediante sensores remotos los cuales por medio de la teledetección captan de manera indirecta y a larga distancia la información sobre un objeto, área o fenómeno sin tener contacto directo con el mismo. El objeto de estudio emite o refleja radiación electromagnética de acuerdo con su naturaleza particular, la cual es capturada por los sensores. De esta manera ha sido posible identificar características de las nubes como la reflectividad, la temperatura los efectos de dispersión/emisión de gotas de lluvia o partículas de hielo, entre otros (OMM, 2018)

Existen dos técnicas de teledetección: las activas y las pasivas. En la primera, los sensores emiten un haz de radiación artificial al objeto estudio para captar la respuesta que este refleja. En la segunda (pasiva), se analiza únicamente la radiación natural que emite el objeto por sí solo bajo la luz solar. Ambas utilizan combinaciones de sensores de rayos infrarrojos y microondas (OMM, 2008). De esta manera, para poder estimar la lluvia se utilizan los productos satelitales de precipitación los cuales combinan diferentes sensores, técnicas de teledetección y algoritmos, permitiendo determinar la lluvia en una cobertura de grandes extensiones a intervalos de tiempo continuos (Dinku et al., 2010).

Por lo tanto, las mediciones desde satelitales permiten obtener información en muchas regiones de la Tierra donde todavía sigue siendo una tarea difícil por la alta variabilidad espacial de la precipitación y

la escasez de las redes de observación principalmente en océanos, desiertos y áreas montañosas debido a que no es factible monitorear completamente la precipitación con redes convencionales de lluvia (Tian & Peters, 2010).

Uno de estos, es la Misión de medición de lluvias tropicales (TRMM por sus siglas en inglés) de la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), el cual fue lanzado al espacio el 27 de noviembre de 1997. Su propósito fue proporcionar el primer conjunto de datos detallado y completo en cuatro dimensiones de la distribución de la lluvia y el calentamiento latente sobre los océanos tropicales y subtropicales muy poco muestreados (Su, Hong, & Lettenmaier, 2008). Dentro de sus características se encuentran como instrumentos de medición 5 tipos principales y como productos de precipitación tiene aproximadamente 12 de los cuales los más usados y populares son el 3B42RT y 3B43RT, estos generan grillas de precipitación donde cada píxel mide 25 km (resolución espacial) cada 3 horas (resolución temporal). Desde su lanzamiento la investigación continua ha permitido utilizar el mismo sistema de datos y satélites para abordar los problemas de escala climática, como el uso de servicios de datos para aplicaciones de precipitación, monitoreo de inundaciones que a menudo requieren soporte de servicios de datos de precipitación casi en tiempo real (Liu, Ostrenga, Teng, & Kempler, 2012). Actualmente es un satélite que funciona parcialmente, su vida útil total fue hasta el año 2015, quedando solo en funcionamiento los productos de precipitación mencionados hasta el 31 de diciembre de 2019 (NASA, s. f.).

El sucesor de la misión TRMM es llamado *Global Precipitation Measurement* (GPM) también creado por la NASA y la JAXA, fue lanzado al espacio el 27 de febrero de 2014. La misión GPM está diseñada para realizar mediciones a altitudes más elevadas y lluvia ligera y/o nieve, ubicación de tormentas, pronóstico de inundaciones, advertencia de deslizamientos, entre otros (Hou et al., 2014). Dentro de sus instrumentos principales se encuentran un sensor de lluvia activo y otro pasivo, los cuales caracterizan las propiedades físicas de los hidrometeoros de diferentes tamaños, uno de los productos de precipitación más usados es IMERG, el cual tiene una resolución espacial de 10 km y temporal de 30 minutos, características de mayor resolución comparadas con las de TRMM (E. B. Cabrera, 2016). Esta misión planea estar en funcionamiento como fecha estimada hasta febrero de 2024 (G. Huffman et al., 2018).

10.4.2. Modelamiento hidrológico

El modelamiento hidrológico, o como lo nombran en el volumen II de la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM (2009) modelización de sistemas hidrológicos, consiste en la extracción de información sobre un objeto o sistema y representarlo mediante una imitación de aspectos relevantes o de interés en el estudio que se pretenda realizar. De esta manera se considera como una analogía práctica del objeto o sistema real, donde a partir de su simulación o predicción en un modelo, se obtiene el comportamiento en determinada condición.

En ese sentido, un modelo consiste en la representación simplificada y aproximada de un sistema u objeto real que considera los procesos que se dan dentro del espacio junto con su transformación, describiendo los componentes básicos y más importantes del mismo por medio de cálculos matemáticos y estadísticos. Con lo anterior en el contexto hidrológico uno de esos sistemas son las cuencas donde de manera general la precipitación es la entrada, la cuenca es el medio donde se desarrollan los procesos y las salidas son el flujo concentrado en el sistema hidrológico que es cuantificado como el caudal. En algunos casos el flujo subsuperficial y la evaporación cuando no

contribuyen al caudal modelado son salidas consideradas como pérdidas. De esta manera el modelo considera las entradas y salidas como variables hidrológicas medibles las cuales, a partir de la simplificación del sistema, permiten simular su comportamiento (Pascual & Díaz, 2016).

Existen diferentes tipos de modelos y maneras de clasificarlos ya sea por la forma de representar las superficies, el enfoque matemático, el planteamiento de procesos hidrológicos o sus funcionalidades y características como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. Clasificación de modelos de acuerdo con su funcionalidad.

Clasificación de modelos	Caracterización
Temporal	*Dinámico:* Considera el comportamiento del sistema con respecto al tiempo. *Estático:* No considera el sistema con respecto al tiempo.
Espacial	*Distribuido*: Tiene en cuenta la variabilidad de sus componentes en el espacio. *Agregados o no distribuido:* Tiene en cuenta los valores promediados en el espacio.
Aspectos del modelo	*Empíricos:* Se basan en datos de observaciones. *Físicos:* Basados en las leyes físicas. Generan ecuaciones teniendo en cuenta aspectos teóricos del sistema que modelará
Realización de la variable	*Determinístico:* Utiliza solo un tipo de entrada de datos. *Estocástico o probabilístico:* Utiliza más de una entrada de datos.
Autonomía	*Autónomo:* La estructura del modelo no cambia con respecto al tiempo *No autónomo*: El modelo sí cambia con respecto al tiempo.
Continuidad	*Continuo:* Posee ecuaciones de manera original o natural. *Discreto*: Las ecuaciones originales son reformuladas.
Linealidad	*Lineal:* Predice el valor de una variable a través del valor de otras *No lineal:* A partir de métodos numéricos obtiene aproximaciones de la variable.

Fuente: (González & Jurado, 2014; Tavera, 2018)

Sistema de modelamiento hidrológico EF5

El Sistema Integrado para Prevención de Inundaciones o Crecidas Repentinas (EF5, por sus siglas en inglés) es un programa de modelamiento hidrológico distribuido el cual se caracteriza por estar diseñado a partir de grillas. Esto le posibilita tener una geometría más uniforme y así representar con mayor detalle los procesos hidrológicos. El programa se denomina sistema porque integra modelos hidrológicos y módulos computacionales interrelacionados. Este fue el programa que se utilizó en el proyecto para realizar las simulaciones requeridas (Gourley et al., 2017).

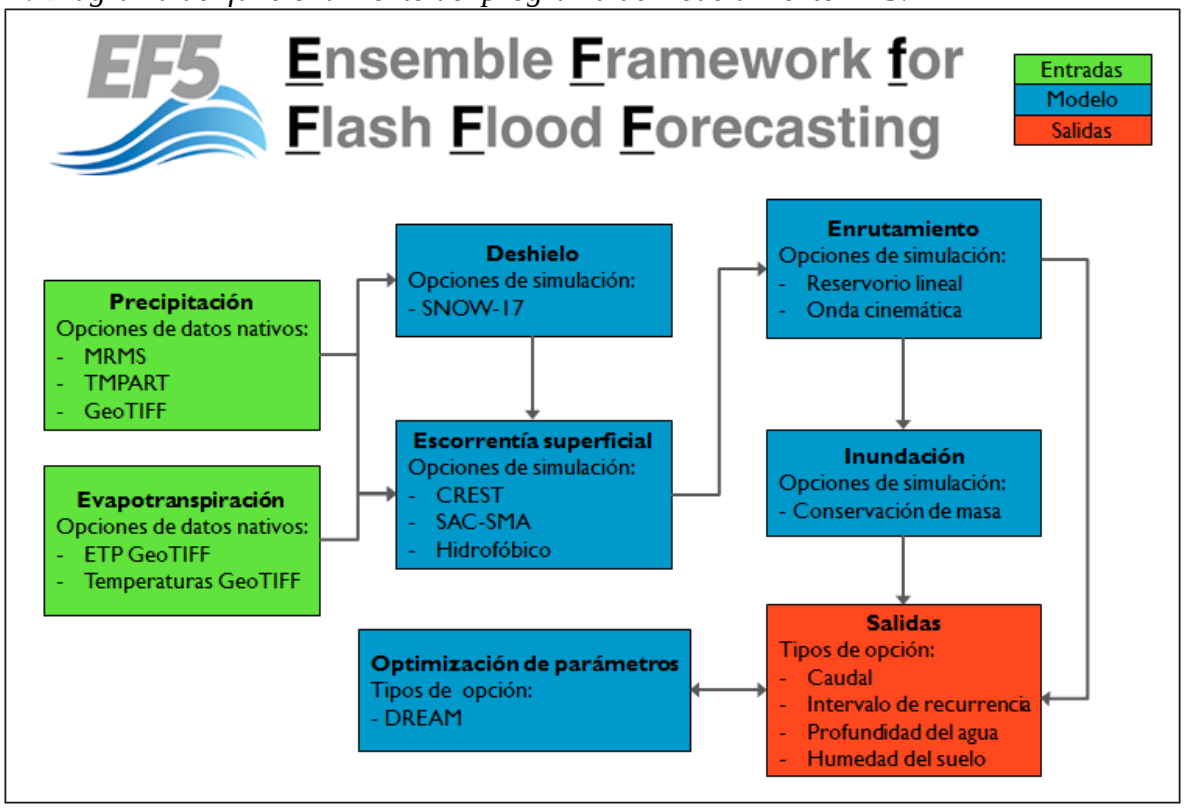
EF5 fue diseñado por el laboratorio de hidrometeorología y teledetección (HyDROS) de la Universidad de Oklahoma en Estados Unidos. Es fácil de usar y flexible por lo que se puede implementar a nivel mundial. Su arquitectura modular permite actualizaciones frecuentes del software y que se incorporen nuevos avances científicos dentro del marco de modelado si resulta necesario (Clark et al., 2016). Una de sus aplicaciones principales corresponde al modelamiento de inundaciones, ejemplo de ello es el proyecto de Locaciones Inundadas e Hidrogramas Simulados (FLASH por sus siglas en inglés) el cual se cataloga como el primer sistema en proporcionar un conjunto de productos

hidrometeorológicos a escala de crecidas repentinas en tiempo real en los Estados Unidos, en el que EF5 es el "motor" de modelado hidrológico central del proyecto (Gourley et al., 2017).

La configuración del programa tiene dos componentes principales. El primero es el balance hídrico, el cual genera la escorrentía y simula los procesos hidrológicos que se darían en la cuenca. Este componente lo desarrolla basándose en los modelos hidrológicos *Coupled Routing and Excess Storage* (CREST), *Sacramento Soil Moisture Accounting* (SAC-SMA) y el modelo Hidrofóbico. El segundo componente corresponde a los métodos de enrutamiento donde se genera el movimiento que tiene la escorrentía de acuerdo a la superficie y corrientes hídricas del terreno, esto lo realiza con base en los modelos de onda cinemática y reservorios lineales (González & Jurado, 2014; Gourley et al., 2017) (*para mayor información al respecto consultar los estudios citados*). Por lo tanto, como se mencionó de manera general en la sección de modelamiento hidrológico, en este caso las entradas principales del programa son la lluvia y la evapotranspiración potencial, donde los datos de la lluvia son obtenidos a partir de las observaciones o mediciones de precipitación que se mencionaron anteriormente. En cuanto a la simulación de los procesos hidrológicos se requiere de parámetros y archivos digitales de la región e información sobre las condiciones del terreno, de esta manera, a partir de los mismos, las entradas, el balance hídrico y los métodos de enrutamiento se podrá obtener como salidas ráster de: caudales, intervalos de recurrencia, profundidad del agua o humedad del suelo (Clark et al., 2016).

La siguiente figura ilustra el procedimiento:

Figura 2. Diagrama del funcionamiento del programa de modelamiento EF5.



Adaptado de: (Clark et al., 2016; Tavera, 2018).

10.4.3. Observing System Experiments (OSE's)

En este contexto es importante contar con instrumentos que realicen mediciones de datos confiables, es decir, que reflejen o se aproximen a la realidad del fenómeno estudiado, para esto es necesario conocer el uso de técnicas que permitan evaluar la habilidad de dichos instrumentos con el fin de generar mejoras en su rendimiento operativo. En ese sentido, se identificó el uso de los OSE's como una forma mediante la cual actualmente los sistemas de observación para la asimilación de datos son evaluados (Timmermans et al., 2015). Esta herramienta es muy similar a los *Observing System Simulation Experiments* (OSSE's), sin embargo, se diferencia de esta última en que los OSSE's son utilizados para la evaluación de nuevos datos, es decir, aquellos que son obtenidos por sistemas de observación hipotéticos que aún no existen. En general, estas dos metodologías se caracterizan por obtener información que usualmente es difícil o imposible de obtener (Masutani et al., 2010).

De esta manera, considerando que el presente trabajo se fundamentó en datos y/o características de instrumentos de medición de precipitación usados hoy en día, se consideró relevante definir la metodología de los OSE's, los cuales son experimentos de diagnóstico de observaciones reales o existentes realizados con el propósito de evaluar su habilidad de pronóstico sin una serie de datos o características específicas, conocidas como observaciones perturbadas, las cuales son sujetas a evaluación por medio de una comparación con los datos reales, entendidos como ejecuciones de control (Arnold & Dey, 1986; Masutani et al., 2010).

Según Masutani et al. (2010), la metodología de este tipo de experimentación se fundamenta en las siguientes etapas:

1. Una ejecución de control que contiene todos los registros o datos de observación usados actualmente en las operaciones diarias.
2. Una ejecución de perturbación en la que se excluyen o cambian las características sujetas a evaluación, mientras que los demás datos se mantienen constantes como modo de control.
3. Finalmente, se realiza una comparación de la habilidad de pronóstico entre los dos escenarios, basados en las ejecuciones de control y de perturbación.

10.4.4. Gestión del riesgo de desastres naturales

La gestión del riesgo de desastres consiste en un grupo de procesos y acciones de planificación, coordinación, organización y conocimientos operacionales para implementar políticas y estrategias, con el fin de reducir el impacto de desastres naturales que puedan generar algún tipo de riesgo en una comunidad, a partir de estrategias de prevención evitando que se genere, como también en caso de que se presente, conocer las operaciones necesarias de preparación y control y/o los procedimientos para una pronta mitigación y recuperación de sus efectos. De esta manera se estaría contribuyendo a la minimización de pérdidas sociales, ecológicas y económicas que puedan ser generadas (Acosta, 2013; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2012).

Según el marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015- 2030 realizado por las Naciones Unidas (2015) las medidas específicas de la gestión del riesgo de desastres a tener en cuenta por los Estados corresponden a cuatro esferas de prioridad:

1. Comprender el riesgo de desastres
2. Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo
3. Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia
4. Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para "reconstruir mejor" en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción

En este sentido la prioridad que más se relaciona con la temática abordada en este proyecto es la primera, pues, como lo dice el marco de Sendai para cumplir con esta prioridad es necesario una comprensión del riesgo en todas sus dimensiones y para ello se requiere la consideración de las diferentes actividades clave correspondientes a la misma. Donde parte de ellas se enmarcan en promover y/o utilizar mecanismos de mejora de la información, instrumentos de medición, mecanismos de comunicación, caracterización de los desastres junto con su estudio, las cuales son actividades que serán insumo para evidenciar características de las amenazas y por ende permitir obtener información sobre la exposición y/o vulnerabilidad de las personas. El cumplimiento de esta etapa permitirá la ejecución consecutiva de las otras prioridades que a pesar de que tienen enfoques determinados, es necesario comprender el riesgo en todas sus dimensiones para que las actividades de posteriores prioridades sean realizadas teniendo en cuenta lo obtenido en la primera prioridad (Naciones Unidas, 2015).

En este contexto, dependiendo del tipo de desastre se derivan procedimientos específicos para gestionarlo. Según la OMM (2009) para el caso de las inundaciones se encuentran las estrategias de la gestión de crecidas y la gestión integrada de crecidas. La primera consiste en el control de crecidas a partir de diseño de medidas estructurales (como muros de contención) y/o no estructurales (como la reforestación). De esta manera manejan cuatro estrategias para la reducción del riesgo de crecidas: la primera es la modificación de las características de las crecidas; la segunda, la minimización de la susceptibilidad social ante los daños que hayan causado; la tercera y la cuarta buscan reducir las pérdidas por habitante y sobrellevar las pérdidas (OMM, 2009).

En cuanto a la gestión integrada de crecidas, por su carácter multidisciplinario, es posible la gestión integrada del estudio del desarrollo de las tierras y los recursos hídricos en una cuenca. Por lo tanto, su objetivo se amplía a gestionar el ciclo hidrológico en las superficies, integrar la gestión de tierras y el agua, establecer metodologías participativas entre otros. Así actividades como la sensibilización del público, la educación, la comunicación y participación de las partes interesadas orientadas a la toma de decisiones transparentes agilizan la gestión de desastres en las regiones en las que se implementan (OMM, 2009).

Asimismo dentro de este campo, otros aspectos considerados son la magnitud del evento, expresado en términos de frecuencia y severidad (altura de la crecida y velocidad de ocurrencia), la exposición de las actividades humanas a las crecidas y la vulnerabilidad de los elementos amenazados, la utilización de medidas estructurales (estudio de crecidas de diseño, embalses, muros de contención, y derivación, mejoras de drenajes) y no estructurales (planificación de los usos de la tierra, gestión de las cuencas, regulación de llanuras inundables, predicción y avisos de crecidas, seguros, medidas de protección

frente a las crecidas), establecimiento de vínculos entre las partes interesadas, todas con el propósito de proporcionar soluciones integrales, flexibles e inclusivas a los eventos que se puedan presentar (OMM, 2009).

10.5. Marco normativo

La normatividad que se encuentra enmarcada dentro de este proyecto corresponde a aquellos Decretos, Leyes y Decretos ley que se refieren a cualquiera de los siguientes aspectos abordados en la *Tabla 4:* gestión de la información ambiental para la prevención y manejo de desastres naturales ocasionados por la precipitación, participación de particulares (privados) en la prevención y atención del riesgo y disposiciones legales que establezcan la responsabilidad de entes en cuanto al apoyo en la ejecución de este tipo de proyectos y el compromiso que tienen respecto a poseer sistemas y equipos de información adecuados para el diagnóstico y la prevención de desastres.

Tabla 4. Normatividad aplicable al presente proyecto de investigación.

Norma	Entidad que la expide	Propósito	Secciones de la ley que aplican
Constitución Política de Colombia de 1991	Congreso de la República de Colombia	Carta Magna de la República de Colombia.	Artículo 79
LEY 09 de 1979	Congreso de la República de Colombia	Por el cual se dictan medidas sanitarias.	Artículo 491 Artículo 498
LEY 99 de 1993	Congreso de la República de Colombia	Por la cual se crea el Ministerio del 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.	Artículo 1
LEY 1523 de 2012	Congreso de la República de Colombia	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones.	Artículo 2 Artículo 8
DECRETO LEY 2811 de 1974	Presidencia de la República	Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.	Artículo 20 Artículo 21 Artículo 22
DECRETO LEY 919 de 1989	Presidencia de la República	Por el cual se organiza el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres y se dictan otras disposiciones.	Artículo 1 Artículo 2 Artículo 10 Artículo 15

DECRETO 93 de 1998	Presidencia de la República	Por el cual se adopta el Plan Nacional para la Prevención y Atención de Desastres.	Artículo 3.

Fuente: Elaboración propia.

10.6. Marco geográfico

En esta sección se describen aspectos importantes de la geografía del departamento de Cundinamarca, con el propósito de contextualizar acerca del área estudio:

10.6.1. Generalidades

El departamento de Cundinamarca se encuentra ubicado en el centro del país en la Región andina sobre la cordillera oriental. Limita con cinco departamentos, Boyacá (parte norte y nororiental), Meta (parte oriental y suroriental), Huila (al sur), Tolima (parte suroccidental y occidental) y Caldas (parte noroccidental); como se observa en la *Figura 3* (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 2000).

En cuanto a sus altitudes, se caracteriza por tener alturas sobre el nivel del mar desde 300 m.s.n.m. por el sector del río Magdalena y el piedemonte llanero hasta más de 4000 m.s.n.m en el páramo de Sumapaz y pendientes que oscilan desde 5% hasta más de 70%, donde la mayor parte del territorio esta entre pendientes de 20% y 60% (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2006).

En este sentido, respecto a la cobertura vegetal que posee el departamento según la clasificación de Holdrige está compuesta por los siguientes pisos altitudinales: Basal tropical, Premontano, Montano bajo, Montano, y Subandino (IGAC, 2000). Sin embargo, gran parte del departamento se encuentra constituidos por pastos, generalmente para actividades productivas como la ganadería, seguido por cultivos, luego por áreas de conservación, bosques y por último forestal productor (IGAC, 2007).

Bajo su jurisdicción cuenta con 116 municipios, 15 provincias; según estadísticas de 2012 del IGAC el departamento tiene una extensión de 22.779,21 km^2 (Gobernación de Cundinamarca, 2014) y de acuerdo con la proyección realizada por el DANE (2009) en 2015 tenía una población de 10’558.824 donde 7’878.783 corresponde a la de Bogotá y los 2’680.041 habitantes restantes se encuentran distribuidos en los diferentes municipios.

Figura 3. Ubicación de Cundinamarca en Colombia

Fuente: (IGAC, 2000)

10.6.2. Unidades de paisaje

Según el Estudio general de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca realizado por el IGAC (2000) el departamento presenta cinco unidades de paisaje, y son:

- Unidad de montaña: se encuentra en la mayor parte del territorio desde el occidente hasta el oriente en altitudes donde sus pendientes van hasta mayores de 75% a rangos de 12% - 7% - 12% está compuesta por relieves como lomas, colinas, crestas ramificadas, crestas estructurales y espinazos.
- Unidad de lomerío: tiene pendientes entre 7% - 3% conformada por lomeríos, lomas y colinas.
- Unidad de piedemonte: se caracteriza por un relieve de moderado a relativamente bajo con lomas, colinas y abanicos disecados, todos estos distribuidos en terrazas.

- Unidad de planicie: está compuesta por extensas áreas con relieves ligeramente planos inclinados a ligeramente ondulados con pendientes entre 3% a 1%.
- Unidad de valle: va de suavemente inclinadas a planas, es una unidad generalmente con abanicos que han sido formados por los ríos.

10.6.3. Suelo

Los suelos desempeñan un rol clave en la resiliencia a las inundaciones (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2015), es por esto que el conocer sus características puede ayudar a determinar posibles zonas susceptibles a este tipo de fenómenos. De acuerdo, con IGAC (2016) Cundinamarca se encuentra dentro de los 24 departamentos del territorio nacional, con suelos inundables en algunas de sus regiones, especialmente, en aquellos terrenos cercanos a los ríos Negro en la parte noroccidental, Magdalena, Guacavía, Guavio y Humea, toda la frontera suroriental con el Meta y las inmediaciones de la Laguna de Fúquene (IGAC, 2016).

En general, para conocer la máxima cantidad de agua que el suele puede retener, es necesario conocer sus características físicas, como la textura (FAO, 2015). En este sentido, según el Estudio de suelos del IGAC (2000) se pudo determinar que el 19% de los suelos del departamento tiene una textura gruesa, y se distribuyen indistintamente en todo el territorio del departamento, siendo la clase franco arenosa la de mayor proporción y la de menor la arenosa franca, suelos con textura arenosa no se encuentran en el departamento, en este sentido son suelos con absorción y conducción rápida de agua y dependiendo del clima los suelos tienden a ser secos tener poca retención de agua y de nutrientes; 55% corresponden a suelos con textura media de la clase Franca, Franco limosa, Franco arcilloso, Franco arcillo arenosa, Franco arcillosa y Limosa, se caracterizan por tener entre 18 % y 35% de arcilla, se encuentran en todos los tipos de relieve y se caracterizan por tener un buen suministro de agua y aireación. Finalmente se encuentran los suelos con textura fina, estos tienen un contenido de arcilla superior al 40%, se encuentran en el 26% de todo el territorio y se caracterizan por tener una alta retención de humedad con poca aireación.

10.6.4. Clima

La precipitación del departamento se caracteriza por ser bimodal, generalmente presenta lluvias desde abril hasta finales de junio y desde septiembre hasta finales de noviembre, sin embargo, en la vertiente oriental se presenta un comportamiento monomodal influenciado por la humedad proveniente del Amazonas. Los valores de precipitación en el departamento van desde 500 mm a 9000 mm. En la parte occidental del departamento entre alto, centro y bajo Magdalena y la vertiente occidental de la cordillera oriental se presentan valores entre 500 a 2000mm. No obstante, en la provincia de rio Negro y ya en el extremo oriental del departamento en la cuenca alta y media de los ríos Blanco y Guavio se generan entre 2000 y 4000 mm y finalmente en el páramo Sumapaz es donde se presentan precipitaciones ente 4000 mm y 9000 mm (IGAC, 2007).

La humedad relativa del territorio con base en los registros medios anuales, los valores máximos se encuentran a lo largo del páramo Sumapaz superando el 85%, le sigue la vertiente occidental de la cordillera con el orden de 85%, luego se encuentra el altiplano Cundiboyacense con valores entre 80% y 75%, de ahí van disminuyendo paulatinamente hasta el suroccidente con valores entre 75% y 65% (IGAC, 2007).

10.6.5. Hidrografía

Con respecto a la hidrografía, el departamento tiene 10 unidades hidrológicas, las cuales 7 hacen parte de la cuenca del río Magdalena y 3 del río Meta y son:

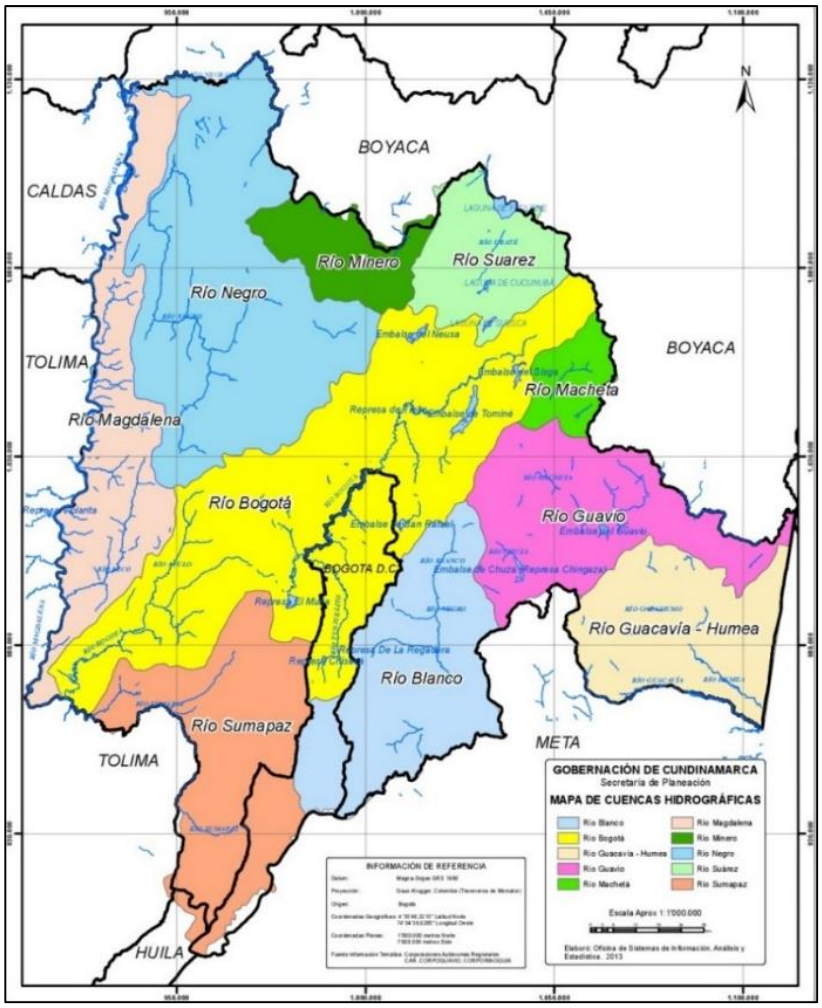
Tabla 5. Unidades hidrológicas del departamento de Cundinamarca, distribuidas sobre parte de las cuencas del río Magdalena y Meta.

Cuenca del Magdalena		
Subcuenca	Ubicación	Precipitación
Subcuenca del trayecto del río Magdalena	Pasa por el occidente del departamento de Cundinamarca.	Precipitación media mensual máxima de 210 mm y mínima de 45 mm.
Subcuenca del río Negro	Nace al noroccidente del departamento, en el municipio de Pacho y desemboca en el río Magdalena.	Precipitación media anual de 1670 mm en la parte alta y 2500 en la parte baja.
Subcuenca del río Bogotá	Nace en la parte central de Cundinamarca, en el municipio de Villa Pinzón y desemboca en el río Magdalena.	Precipitación media anual promedio entre 400 y 2200mm.
Subcuenca del río Sumapaz	Nace en al suroccidente del departamento, en el páramo Sumapaz y desemboca en el río Magdalena.	Precipitaciones que oscilan entre 1300mm en la parte alta y 100mm en la parte baja.
Microcuenca del río Minero	Nace en la parte norte de Cundinamarca, en el municipio de Yacopí hasta llegar al departamento de Boyacá.	Precipitación promedio de 1000 mm – 3000 mm en la parte alta.
Subcuenca del río Suarez	La subcuenca inicia con el río Ubaté, el cual nace en el municipio de Carmen de carupa.	Precipitaciones anuales de 800 mm a 1200mm.
Microcuenca del río Macheta	Nace en la vereda de Casadillas alto y desemboca en el río Aguacias.	Precipitaciones medias anuales de 1000mm a 3000mm.
Cuenca del Meta		
Mesocuenca del río Guavio	Nace al oriente del departamento.	Precipitaciones medias anuales de 1300 mm a 3900mm.
Mesocuenca del Blanco	Se encuentra al sur oriente del departamento y nace entre los municipios de la Calera y Guasca.	Precipitaciones medias anuales tiene entre 1300 a 2600 mm.
Subcuenca de los ríos Guacavía y Humea	Ubicada al oriente en el piedemonte llanero.	Precipitaciones medias anuales de 2500mm a 4000mm.

Adaptado de: (Corporación Autónoma Regional, 2005; CAR, 2011; CAR, 2012; CAR, 2013; CAR, 2014; IGAC, 2007; Municipio de Macheta, 2000)

A continuación, se encuentra la *Figura 4* donde se muestra la ubicación de las unidades hidrológicas:

Figura 4. Unidades Hidrográficas del departamento de Cundinamarca.



Fuente: (Gobernación de Cundinamarca, 2017)

10.7. Marco institucional

En esta sección se encuentran las diferentes organizaciones involucradas para el planteamiento y ejecución de la presente investigación:

Universidad de Oklahoma

Es una universidad pública de investigación fundada en el año 1890, se encuentra ubicada en Norman, Oklahoma – Estados Unidos (The University of Oklahoma, 2018). El presente proyecto pudo vincularse a esta institución, por medio de la colaboración interinstitucional de investigación entre el programa de Ingeniería Ambiental y el Laboratorio HYDROS. Adicionalmente, cabe resaltar que este laboratorio fue quien desarrolló el modelo hidrológico EF5; principal herramienta para la elaboración de este estudio (Clark et al., 2016).

Universidad El Bosque

Es una universidad privada ubicada al norte de la ciudad de Bogotá, Colombia (Universidad El Bosque, 2016). Dentro de la oferta académica de esta institución, se encuentra el programa de Ingeniería Ambiental, dentro del cual se encuentra inscrito este estudio. En este sentido, la institución académica proporcionó una serie de recursos a este proyecto: dispuso de espacios físicos (aulas de clase, salas de cómputo y centros de estudio), recursos humanos (docentes y personal especializado en temas de interés para la formulación y ejecución este proyecto), recursos materiales y tecnológicos (libros, computadores y programas informáticos).

11. Metodología

11.1. Diseño de la investigación

La metodología establecida para este estudio es el resultado de la investigación realizada en la sección de marcos de referencia, y fue diseñada con el fin de poder responder la pregunta de investigación y los objetivos propuestos. Es por esto, que el presente trabajo fundamentó la formulación y ejecución de sus diferentes fases bajo el concepto de experimentos de sistemas de observación u OSE's (Masutani et al., 2010), teniendo en cuenta únicamente la forma en la cual a partir de la manipulación intencional de variables particulares de observaciones, es posible medir el impacto ocasionado por las mismas.

De esta manera, el presente trabajo de investigación se propuso crear un entorno virtual, en el cual sea posible el estudio del impacto de la frecuencia de muestreo y cobertura espacial de las estimaciones de precipitación en la modelación de inundaciones. Lo anterior, por medio del aislamiento de otras fuentes de error que puedan entorpecer la investigación. Para lograr esto, se hizo uso de solamente estimaciones de precipitación satelital, las cuales fueron utilizadas para la simulación de eventos de inundación, por un lado, con la frecuencia de muestreo propia del producto satelital utilizado, y por el otro, con el de la de red pluviométrica de Cundinamarca; al trabajar con la misma información de lluvia, bajo un mismo entorno, se elimina la posibilidad de introducir nuevos errores, que usualmente son inducidos en este tipo de experimentos cuando se hace uso de otro tipo de datos. Lo cual permite tener como únicas variables de influencia a la hora de simular las inundaciones, la respuesta ocasionada por la frecuencia de muestro y cobertura espacial de las estimaciones de precipitación.

Para llevar a cabo lo anteriormente mencionado, fue necesario definir diferentes herramientas, métodos y técnicas de investigación, útiles a la hora de plantear, ejecutar y finalizar este trabajo; a lo largo de esta sección se describen de manera detallada los mismos.

11.1.1. Enfoque, alcance, unidad de análisis, método de la investigación

A continuación, se definen aspectos importantes para entender el tipo de investigación realizada en el presente documento:

Enfoque

El presente proyecto de investigación es de carácter mixto, ya que reúne, analiza y vincula datos cuantitativos y cualitativos dentro del presente estudio. Teniendo en cuenta la definición adoptada por Hernández, Fernández y Baptista (2014) el enfoque cuantitativo emplea la recolección de datos con el propósito de probar hipótesis a partir de la medición numérica y el análisis estadístico para así establecer patrones de comportamiento y/o verificar teorías. En ese sentido, el presente trabajo utiliza estimaciones de lluvia desde satélite como principal insumo para el cálculo de diferentes parámetros hidrológicos, parte de ellos determinados por medio de distintas ecuaciones matemáticas; para su tratamiento y análisis en gran parte de las ocasiones se requirió el uso de herramientas estadísticas. Por otro lado, al tener en cuenta que el enfoque cualitativo se define como aquel que usa la recopilación y análisis de los datos como medio para la descripción de las cualidades de un fenómeno (R. Hernández et al., 2014). Este estudio por medio del análisis visual descriptivo utiliza distintos recursos, como cartografía básica, mapas generados en simulaciones hidrológicas, esquemas y gráficas como herramientas para la identificación de diferentes factores espaciales y temporales del territorio puedan impactar en el modelamiento hidrológico de inundaciones.

Alcance

El presente estudio es de alcance descriptivo y correlacional. Se considera que es descriptivo, pues como menciona Hernández, Fernández y Baptista (2014) con este tipo de investigaciones se busca identificar propiedades y características relevantes del fenómeno que se está analizando. Para esta investigación, parte de las descripciones se centran en el estudio del comportamiento y posibles tendencias de los diferentes eventos de inundación simulados en el modelo hidrológico; lo anterior, teniendo en cuenta el escenario bajo el cual se generaron, es decir, si la lluvia utilizada para correr la simulación corresponde a la cobertura de medición espacial y frecuencia de muestreo de las mediciones satelitales o el de redes pluviométricas. Bajo ese mismo contexto, es posible justificar el alcance correlacional que también presenta este estudio, debido a que, al considerar las diferencias de medición espacial y temporal de ambos métodos de estimación, y los factores espaciales y temporales de la zona donde se genera dicha inundación, como variables que pueden llegar a influir en el rendimiento del modelamiento hidrológico de una inundación; se evidencia el propósito de este estudio por identificar la relación o grado de asociación existente entre dichas variables (Hernández et al., 2014).

Método

El método de investigación es considerada una importante herramienta para la búsqueda de información, y ayuda a determinar la forma en la que el investigador puede interactuar con el objeto de estudio (Rodríguez & Pérez, 2017) Teniendo en cuenta esto, al revisar los diferentes métodos se identificó que el presente trabajo es de tipo analítico – inductivo. Por un lado, se considera analítico debido a que, para la realización de esta investigación fue necesario el estudio de diferentes aspectos asociados al planteamiento problema, como lo fue: el estudio de la estimación de la precipitación desde satélites y estaciones pluviométricas, uso del modelamiento hidrológico para la simulación de inundaciones, lo anterior con el fin de explicar y comprender mejor el fenómeno de estudio, además de establecer nuevas teorías (Maya, 2014). Por el otro, se considera que posee un tipo de razonamiento inductivo, debido a que esta investigación utilizó estimaciones de precipitación con diferente cobertura

espacio temporal de medición, para la simulación de un número significativo de eventos de inundación, a partir de los cuales se pudieran generar observaciones particulares que permitieran poder generar conclusiones generales que permitieran dar respuesta a la pregunta de investigación planteada (Maya, 2014).

Unidad de análisis

Corresponde al impacto generado por la cobertura espacial y frecuencia de muestreo del método de estimación de precipitación, desde satélites o estaciones pluviométricas, en la modelación de inundaciones.

Variables experimentales

Teniendo en cuenta que el presente trabajo se fundamentó en la realización de un experimento que se desarrolló bajo un entorno computacional, las variables identificadas para esta sección corresponden a aquellas sobre las cuales se ejerció un mayor control, bien sea por medio de su observación o manipulación. En la siguiente tabla se describe de manera detallada el tipo de variable y su rol dentro del experimento.

Tabla 6. Variables experimentales de control.

Variable	Tipo de variable	Definición operacional
Precipitación estimada desde satélite	Independiente	Corresponde al dato de precipitación estimado por el producto de medición satelital.
Frecuencia de muestreo de precipitación	Dependiente	La definición de los valores de estas dos variables está sujeta a las características del tipo de medición que se esté tratando, satelital o pluviométrica.
Cobertura espacial de medición de lluvia	Dependiente	
Caudal	Dependiente	El caudal de inundación modelado responde a los criterios definidos para las dos anteriores variables, por tal motivo, su control es importante a la hora de caracterizar el impacto ocasionado por las mismas.

Fuente: Elaboración propia.

Técnicas e instrumentos

En este apartado se describen de manera general las diferentes técnicas e instrumentos usados a lo largo del trabajo para la recolección, organización, procesamiento y análisis de información:

Técnicas e instrumentos para recolectar la información

La principal técnica usada para la recolección de información consistió en la búsqueda de los diferentes insumos o materiales necesarios para la formulación y desarrollo de la investigación, por ejemplo: estimaciones de precipitación satelital, mapas cartográficos (formato digital), insumos para el trabajo con sistemas de información geográfica (archivos formato ráster y/o vector), parámetros para la configuración del modelo hidrológico. Los principales instrumentos usados para la recolección de dicha información correspondieron a páginas web de diferentes entidades oficiales, nacionales como: IDEAM, CAR, IGAC, e internacionales como: NASA, EF5, OMM.

Asimismo, otro tipo de técnica fue el análisis documental realizado a diferentes artículos de investigación asociados al ámbito de investigación u otros documentos que pudieran enriquecer la construcción metodológica o el análisis de resultados. Entre los principales instrumentos usados se encuentran, diferentes bases de datos, principalmente: ScienceDirect, ProQuest y Google Académico. Adicionalmente, se utilizaron recursos bibliográficos en físico, como: libros o atlas relacionados con hidrología, meteorología, geografía, sistemas de información geográfica y programación.

Técnicas e instrumentos para organizar y procesar la información

En primera instancia, para el manejo de los distintos documentos, considerados como relevantes para esta investigación, fue necesario realizar un análisis documental de los mismos, para posteriormente organizarlos en una base de datos elaborada en el programa computacional Zotero.

Para la definición de las diferentes metodologías a usar fue necesario valerse de técnicas como el análisis documental, haciendo uso de textos, y posteriormente el análisis de alternativas, a partir del cual teniendo en cuenta los procedimientos y características por cada metodología determinar la que mejores resultados pueda proporcionar.

En cuanto, al procesamiento de información hidrológica se tuvo como principal técnica la modelación de inundaciones, a partir del uso del modelo hidrológico EF5. Sin embargo, para procesar y/o determinar otra serie de parámetros o metodologías, fue necesario el uso de paquetes computacionales de programación como Python, MATLAB y R-Studio.

Por último, en cuanto a las técnicas utilizadas para sistematizar información obtenida a lo largo de la ejecución del proyecto, esta fue clasificada y organizada por medio del uso de instrumentos, como matrices, tablas de conocimiento o bases de datos en el programa computacional Excel.

Técnicas e instrumentos para presentar, analizar e interpretar los resultados

Para la presentación de resultados fue necesaria la elaboración de tablas, histogramas y diagramas de barras a partir de instrumentos como: el programa estadístico Excel y los lenguajes de programación de Python, MATLAB y R-Studio. Adicionalmente, algunos resultados fueron dados a conocer por medio de la realización de mapas, los cuales fueron generados a partir del programa de información geográfica QGIS.

En cuanto, análisis de resultados fue necesario el uso de técnicas, que dependieron del tipo de instrumento de información manejado. En cuanto, a los mapas fue necesaria la aplicación de técnicas como el análisis observacional. Por otro lado, para los diagramas, histogramas y valores cuantitativos fue necesario realizar un análisis estadístico y documental, donde a partir del uso de instrumentos como textos se pudieron interpretar dichos resultados.

11.2. Plan de trabajo

Para el desarrollo de la metodología se establecieron tres fases correspondientes a los objetivos específicos. La primera consistió en la identificación de los eventos de inundación ocurridos entre 2014 y diciembre de 2018. La razón de utilizar este periodo fue, porque las fechas de los eventos que se identificarían en esta fase, serían usadas en la última pero con precipitación del producto satelital IMERG, pues sus características de resolución espacial y temporal iban a brindar mejores resultados. Por lo tanto, esta fase se adecuó a la disponibilidad de datos del producto.

En la segunda fase, mediante métodos de interpolación, se generaron superficies de lluvia sintética, llamadas de esta forma por no ser generadas con los datos de mediciones reales, pues fueron creadas para cada evento, a partir de las estimaciones de precipitación del producto de satelital IMERG, basándose en las características de cobertura y frecuencia de la red de estaciones pluviométricas de Cundinamarca; por lo tanto, son superficies que representan únicamente la distribución y frecuencia de medición de la red, pero se omite la estimación cuantitativa real de las mismas.

Es en este punto, donde se empleó el fundamento de los OSE's, sin embargo, solo se usó su forma de manipular intencionalmente las variables, pues al estar estudiando las características de dos sistemas de observación, el proyecto no se adecuaba totalmente a la estructura que manejan los OSE's. No obstante, se pudo aplicar su principio en este estudio, al considerar la lluvia proveniente del producto satelital IMERG como las ejecuciones de control y a las superficies de lluvia sintética como las observaciones perturbadas, ya que estas últimas se generaron con la misma información de IMERG, pero las perturbaciones se realizaron con base en las características de la red de estaciones de Cundinamarca.

Finalmente, en la tercera fase al obtener las superficies reales y perturbadas con las condiciones de cobertura y frecuencia correspondientes, se identificó en qué escenarios, dependiendo de estas condiciones, las características espaciales y temporales del terreno generaban diferentes tipos de respuesta al momento de simular los eventos de inundación.

Fase1. Identificación de eventos de inundación entre 2014 y 2018 que exhiban diferentes características espaciales y temporales

Esta fase se dividió en dos partes: en la primera se configuró el modelo con los elementos generales para realizar todas las simulaciones del proyecto y en la segunda a partir de un umbral y una simulación entre 2014 y 2018 usando el producto satelital 3B42 de la misión TRMM, se identificaron los momentos o instancias que se sobrepasaba dicho umbral, para luego por medio de agrupaciones obtener los eventos de inundación.

Subfase 1. Configuración del programa EF5 y delimitación del área estudio

Para la configuración del programa de modelación EF5, se basó en la metodología empleada en los trabajos de Jurado y Gonzales (2014) y Tavera (2018). En primera medida, se adquirieron los parámetros e insumos que requiere el programa como se muestra a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 7. Descripción metodológica de la adquisición de los parámetros y archivos base para la configuración de EF5.

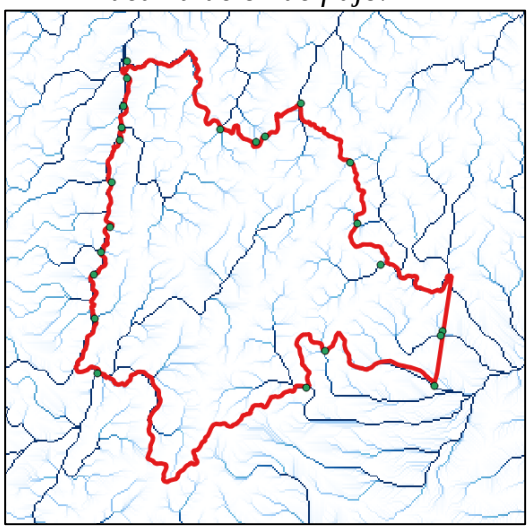
Parámetro o archivo	Descripción metodológica	Fuente
Ráster del Modelo digital de elevación (DEM)	Se adquirió el archivo de la región donde se encuentra Cundinamarca a una resolución de 1km.	Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales (HydroSHEDS) https://www.hydrosheds.org/downloads
Ráster de dirección de flujo (DDM)	Creado en QGIS a partir del ráster del DEM	Elaboración propia
Ráster de acumulación de flujo (FAM)	Creado en QGIS a partir del ráster de DDM	Elaboración propia
Precipitación	Se descargaron los archivos de precipitación correspondientes a los siguientes productos satelitales: -3B42RT de la misión TRMM Desde 2001 hasta 2018 Resolución: 25 km y 3 horas - IMERG de la misión GPM Desde 2014 hasta 2018 Resolución: 10 km y 30 minutos	Precipitation measurement missions of de National aeronautics and space administration https://pmm.nasa.gov/data-access
Evapotranspiración potencial (PET)	Se descargaron los archivos de PET de la región.	Famine Early Warning Systems Network https://earlywarning.usgs.gov/fews/datadownloads/Global/PET
Relación del área impermeable (Im)	Se adquirió el ráster de la región donde se encuentra Cundinamarca	Harmonized World Soil Database http://www.iiasa.ac.at
Conductividad hidráulica saturada del suelo (Fc)	Generado a partir de las capas de textura de suelos obtenidas en la página de SoilGrids que, por medio del diagrama triangular de clases texturales, se obtuvo la fracción de texturas en cada pixel y a partir de la tabla de parámetros de infiltración para texturas del	Capas de textura de suelos https://soilgrids.org/#!/?layer=ORCORC_M_sl2_250m&vector=1 Diagrama triangular (Jaramillo, 2002, p. 188)

	suelo de Green- y Ampt, se determinó la conductividad hidráulica correspondiente a cada pixel.	Tabla de parámetros de infiltración de Green y Ampt (Bedient et al., 2013, p. 135)
Capacidad máxima de retención de agua en el suelo (Wm)	Generado a partir de las mismas capas de suelo del parámetro anterior a cada profundidad y los valores correspondientes a la porosidad efectiva, de la tabla de los parámetros de infiltración de Green y Ampt, en donde para cada pixel se realizó la multiplicación entre la profundidad y la porosidad efectiva para finalmente sumarlos y obtener un ráster.	Capas de textura de suelos https://soilgrids.org/#!/?layer=ORCORC_M_sl2_250m&vector=1 Tabla de parámetros de infiltración de Green y Ampt (Bedient et al., 2013, p. 135)
Exponente de la curva de infiltración variable (B)	Obtenido a partir de las capas de texturas descargadas anteriormente, la tabla de parámetros de infiltración de Green y Ampt y la metodología estadística de relaciones entre humedad y propiedades físicas de Cosby, Hornberger, Clapp y Ginn.	Capas de textura de suelos https://soilgrids.org/#!/?layer=ORCORC_M_sl2_250m&vector=1 Tabla de parámetros de infiltración de Green y Ampt (Bedient et al., 2013) Relaciones entre humedad y propiedades físicas (Cosby, Hornberger, Clapp, & Ginn, 1984)
Alpha superficial (α_0)	Generado con archivos de las coberturas de uso del suelo en la región estudio. Estos fueron descargados de la página web de la Agencia Espacial Europea y luego a partir de su calificación, se determinó el coeficiente *n* de rugosidad de Manning con base en una tabla donde sugiere valores preestablecidos para dicha clasificación.	Archivos de coberturas de uso del suelo http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php Tabla con valores del coeficiente de Manning (Chow, 1959)
Alpha (α) y Beta (β) para canales	Determinados a partir de un modelo de predicción de parámetros donde se relacionan la temperatura promedio, precipitación y la información de relieve del DEM.	Modelo de predicción de parámetros (Vergara et al., 2016) Parámetros de temperatura (Hijmans, Cameron, Parra, Jones, & Jarvis, 2005)

Nota: Para las siglas de la primera columna se usaron las que maneja el programa EF5. Adaptada de: Clark et al., 2016 (como se citó en Tavera, 2018).

Posteriormente se delimitó el área de estudio, para esto se descargó la capa del departamento de Cundinamarca del geoportal SIG-OT del IGAC (2018) y junto con el ráster de acumulación de flujo obtenido anteriormente, por medio de herramientas de edición del programa QGIS, se identificaron los puntos donde las corrientes hídricas cruzaban el límite departamental como se muestra en la *Figura* 5. De esta manera se obtuvieron las coordenadas correspondientes a los puntos de drenaje requeridos por EF5, pues éste al tener en cuenta el comportamiento del agua en el terreno se le debe indicar hasta qué punto de las cuencas lo debe a considerar, por tal motivo se identificaron varios puntos.

Figura 5. Delimitación del departamento de Cundinamarca con los puntos de drenaje en el ráster de acumulación de flujo.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, al tener los parámetros y el área delimitada, se adecuó esta información en el programa EF5. Así, en las simulaciones de las siguientes subfases del proyecto se mantuvo esta información general y dependiendo de estas y los resultados de simulación esperados se cambiaron el tipo de archivo resultante, el tipo de lluvia y el tiempo de simulación.

Subfase 2. Identificación de eventos de inundación

En primera instancia se realizó un análisis de frecuencia, sin embargo teniendo en cuenta que este tipo de análisis generalmente se utilizan para estudiar registros históricos de variables hidrológicas, con el propósito de determinar la probabilidad de que vuelvan a ocurrir (OMM, 2009), este método de análisis se utilizó en el proyecto solo para obtener el comportamiento histórico de los caudales y poder determinar el caudal de inundación. Esto se realizó con base en la metodología del estudio de Reed, Schaake y Zhang (2007) quienes propusieron un método donde se podían predecir inundaciones a parir de la simulación de un modelo hidrológico distribuido y la relación con los periodos de retorno.

Dentro de este tipo de análisis se utilizan diferentes clases de distribuciones de probabilidad, que requieren parámetros estadísticos de ajuste. Una combinación adecuada para el caso de este proyecto, es la distribución de Log Pearson tipo 3 mediante el método de los momentos empleando la *Ecuación 1*, pues generalmente es recomendado para la descripción de inundaciones por el Comité Asesor Interagencial de los Estados Unidos sobre Datos del Agua (IACWD por sus siglas en inglés)(Bedient et al., 2013).

$$Q_T = \bar{Q} + K(C_s, T) * S_Q$$

Ecuación 1. Distribución Gamma de tres parámetros.

Dónde:

- Q_T : Caudal a un tiempo de retorno T
- $\bar{Q}$: Caudal medio
- K : Factor de frecuencia
- C_s : Coeficiente de asimetría
- T : Periodo de retorno
- S_Q : Desviación estándar

El factor de frecuencia K se encuentra en función del coeficiente de asimetría y el periodo de retorno[1]. Este último también llamado intervalo de recurrencia, es el promedio del número de años que se necesita para que vuelva a ocurrir un fenómeno de magnitud igual o superior (OMM, 2009). En este sentido en el artículo de Reed et al., sugieren que un caudal igual o superior a un periodo de retorno de dos años se puede considerar como una inundación en este tipo de estudios, por lo tanto esta condición se tuvo en cuenta para determinar el umbral de inundación necesario para identificar los eventos.

Con base en lo anterior, para obtener los datos requeridos por la distribución, se realizó una simulación donde se tuvo como resultado ráster de máximos caudales anuales desde 2001 hasta 2018. En esta simulación se usó como insumo de precipitación el producto satelital 3B42 de la misión TRMM, pues para el ajuste del modelo se necesita contar por lo menos con una serie de diez años de información y el producto IMERG solo cuenta con datos desde 2014, por lo tanto, no se adecuaba con los requerimientos en particular de este procedimiento.

Por medio de códigos computacionales con los 18 ráster de máximos caudales se calcularon las variables ($\bar{Q}, C_s y\ S_Q$) de la ecuación 1, el factor de frecuencia K para cada año del intervalo de periodo de retorno de la tabla de frecuencia de factores K (1, 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años) y se obtuvo un ráster de caudales correspondiente a cada uno de estos ocho años. De este grupo, se extrajo en particular el de dos años, pues como se mencionó es el periodo de retorno que se usaría como umbral.

Por otro lado, para poder calcular el periodo de retorno de los eventos que se fueran a identificar mas adelante, fue necesario realizar una regresión lineal logarítmica (*Ecuación 2*) para simplificar el procedimiento de su cálculo. Esto se realizó con base en la metodología que utilizaron Jurado y Gonzales (2014) y Tavera (2018) para el mismo caso en sus proyectos. De esta manera, por medio de códigos computacionales y a partir de los ocho ráster de periodo de retorno obtenidos anteriormente, se obtuvo la ecuación lineal de cada pixel, que se vio reflejada en la obtención de un ráster correspondiente a la pendiente (b) y al intercepto (m). De tal forma, al tener un ráster de caudales y aplicando la *Ecuación 2* junto con los archivos obtenidos, se podía producir un ráster correspondiente a los periodos de retorno.

$$\log_{10}(RP) = b + m\ (\log_{10} Q)$$

Ecuación 2. Modelo de regresión lineal en escala logarítmica.

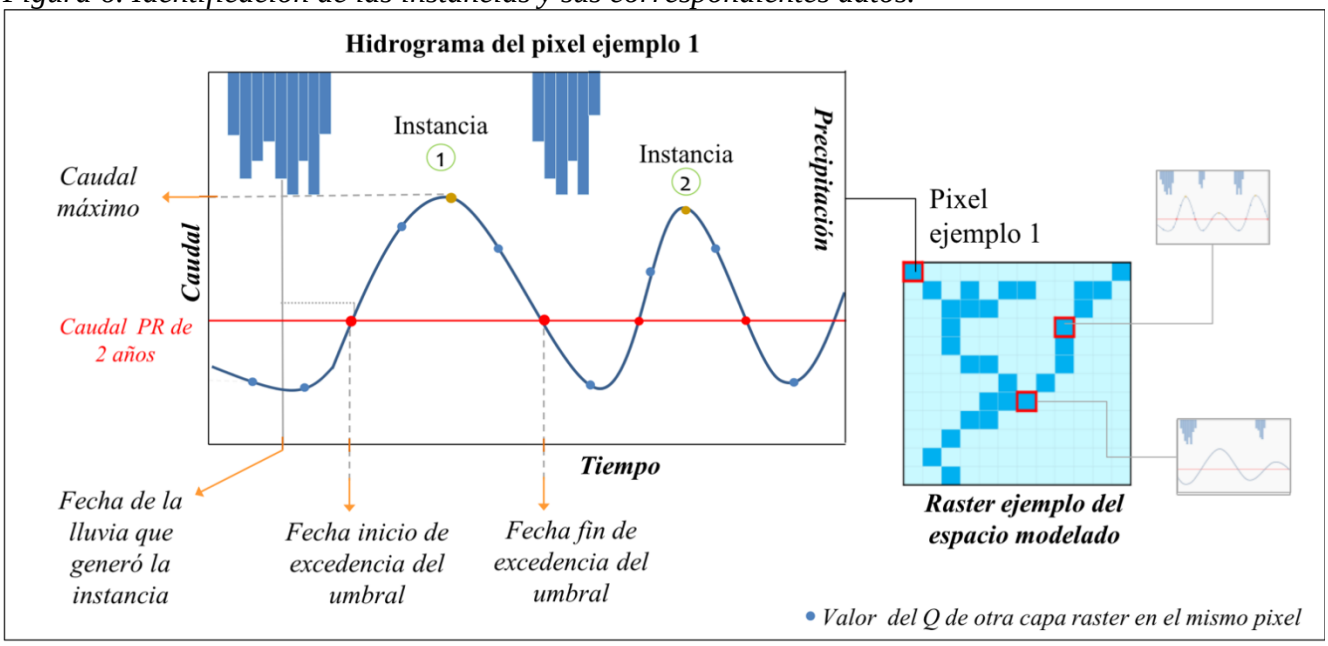
En este punto al contar con el ráster del umbral y el modelo para calcular los periodos de retorno, se procedió a obtener las instancias donde se sobrepasaba dicho umbral. Para esto se realizó otra simulación entre el periodo de estudio (2014 – 2018) con el producto satelital de 3B42 de la misión TRMM, pues al haber determinado el umbral con datos de este producto satelital, se debía realizar la identificación de las instancias con esta misma información.

La simulación se realizó con la frecuencia de medición del producto 3B42 (cada 3 horas) durante los cinco años (2014 – 2018) obteniendo un ráster de caudales en cada uno de estos instantes. De esta manera, el espacio es representado uniformemente en cada ráster, pero el tiempo se evidencia por el cambio de valores de caudal que ocurre cada 3 horas en cada uno de sus pixeles. Por lo tanto, como se muestra en la *Figura 6* cada pixel va a tener un hidrograma diferente durante esos cinco años,

[1] Valores de las variables preestablecidos en la Tabla de frecuencia de factores K para distribuciones Gamma y Log Pearson tipo 3 (Bedient, Huber, & Vieux, 2013, p. 195)

representando la respuesta hidrometeorológica que tuvo durante ese periodo de tiempo. Al mirar a detalle uno de estos hidrogramas, en este caso el del pixel ejemplo 1, se puede observar el caudal del umbral de inundación (línea roja) y los momentos en que es superado, los cuales corresponden a las instancias donde ese pixel supero el umbral de inundación. De esta manera, por medio de códigos computacionales, en cada pixel se realizó implícitamente su hidrograma, se identificó el momento donde pasaba el umbral, y a partir de esto, se registró en una tabla las coordenadas, fecha de inicio y fin de excedencia, el caudal máximo junto con su periodo de retorno calculado con el modelo de la *Ecuación 2* y por medio del tiempo de concentración la fecha de la lluvia que generó la excedencia. Finalmente fue así como se creó una tabla con las instancias de los pixeles que sobrepasaron el umbral, con su información correspondiente.

Figura 6. Identificación de las instancias y sus correspondientes datos.



Fuente: Elaboración propia.

Para obtener los eventos, se usó la fecha de lluvia que generó el aumento del caudal y por medio de códigos computacionales se agruparon las instancias "cuya lluvia" haya sucedido en días consecutivos. Instancias con la diferencia de un día ya se consideraban un evento diferente. De esta manera, cada evento representó la actividad hidrometeorológica que ocurrió en regiones de todo el dominio, donde se capturaron diferentes escenarios de precipitación, cuyo periodo de ocurrencia entre una y otra fueron muy cercanos. Con base en esta información se realizó otra tabla donde se calculó la duración del evento, máximo periodo de retorno con la Ecuación 2 y el área aproximada.

Finalmente, al tener los eventos identificados se procedió a realizar las descripciones y análisis tanto de los eventos como de las instancias, a partir de la construcción de mapas con las herramientas del programa computacional QGIS y cálculos estadísticos en el programa EXCEL.

Fase 2. Generación de Superficies de lluvia que se aproximen a la variabilidad espacial y temporal de la red pluviométrica de Cundinamarca.

Esta fase se dividió en dos partes. En la primera se determinó la distribución más representativa de la red de estaciones a una resolución de 10 km, pues se debía adecuar los datos a la misma resolución del producto IMERG (ejecución de control). La segunda parte, consistió en la generación de superficies de lluvia sintética a cada uno de los eventos de inundación identificados, lo anterior, por medio de métodos de interpolación, para posteriormente a partir de la aplicación de métricas estadísticas, se escogió el método que construyó las superficies de precipitación que mejor se aproximaron a las proporcionadas por el producto IMERG y con este se generaron las superficies sintéticas a una frecuencia horaria y diaria.

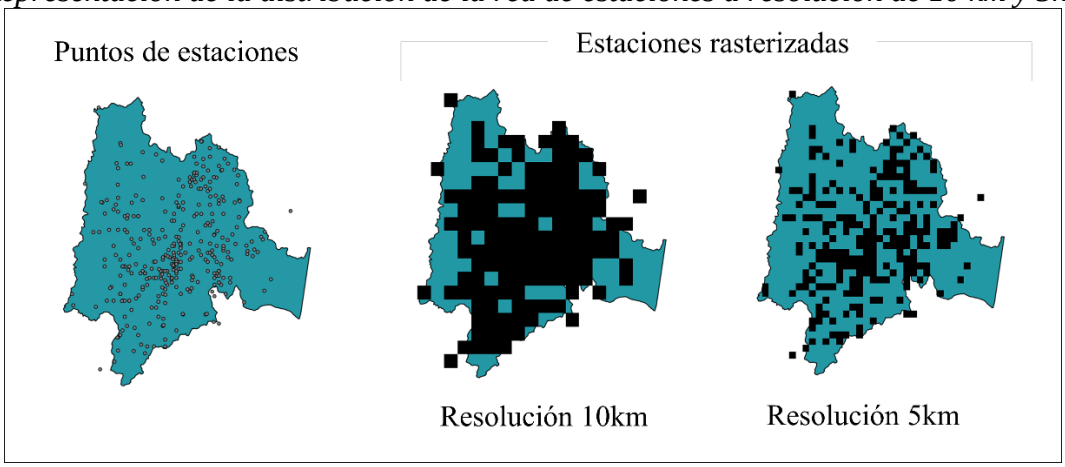
Subfase 1. Construcción de la red sintética de medición pluviométrica

La generación de la red sintética representativa de las mediciones pluviométricas requirió la obtención de la ubicación de las estaciones. Para ello se visitó la página web de la Guía Nacional de Datos Abiertos del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC), donde se encontró disponible el archivo formato Excel del Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM y de otras instituciones (IDEAM, 2019). Con esta información, y por medio de filtros, se seleccionaron las estaciones pluviométricas y pluviográficas que estuvieran activas en el departamento de Cundinamarca, pues era de interés primordial contar con el mayor número posible de datos fiables.

Posteriormente, se procedió a digitalizar la ubicación de las estaciones a partir de las coordenadas encontradas en el archivo Excel, por medio del programa QGIS. El siguiente paso consistió en generar una superficie a la misma resolución que la del producto IMERG (10km), sin embargo, no se podían rasterizar los puntos de las estaciones en esta resolución, debido a que se ocupaba gran parte del domino y los vacíos espaciales que se encontraban en las mediciones puntuales, no se estarían representando adecuadamente como se muestra en la *Figura 7*. Por lo tanto, para dar cuenta de esto, fue necesario estimar el número de pixeles que representara tanto la distribución de las estaciones como los vacíos espaciales a una resolución de 10 km.

Para esto, como primer paso se tuvo que escoger el área de lluvia que representa un pluviómetro, acogiendo lo planteado por Brandt Johnson y Ratnayaka en su libro *Suministro de agua* (2009), quienes sostienen que por cada 25 km^2 debería haber una estación. Bajo este parámetro se generó una nueva rasterización con resolución de 5 km; como se observa en la *Figura 7* se poden evidenciar más vacíos en el espacio.

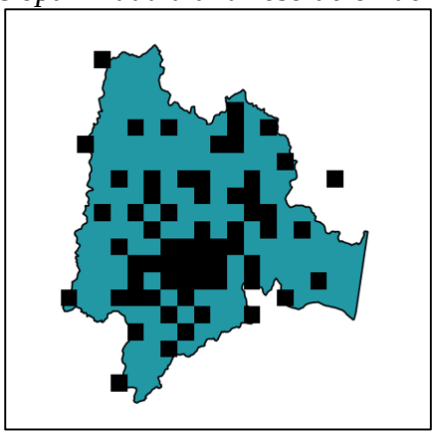
Figura 7. Representación de la distribución de la red de estaciones a resolución de 10 km y 5km.



Fuente: Elaboración propia.

Seguido a esto, para generar la superficie a 10 km se calculó la densidad de pixeles en el dominio a 5km y con esta cifra, por medio de un mapa autoorganizado (SOM por sus siglas en inglés, un tipo de redes neuronales) realizado en MATLAB, se obtuvo la ubicación del número de puntos que mejor representara la actual red de estaciones, pues este método, por medio de cálculos matemáticos y a partir de las aglomeraciones de las mismas junto con el número de puntos a distribuir, establece la ubicación más adecuada (ver *Figura 8*) (Caicedo & López, 2017).

Figura 8. Red sintética de estaciones optimizada a una resolución de 10 km.



Fuente: Elaboración propia.

Con base en esta nueva distribución se rasterizaron los puntos a la resolución de 10 km y se obtuvieron los pixeles que representaban tanto la distribución como la cobertura de la red de estaciones.

Subfase 2. Creación y determinación de superficies de precipitación sintéticas

Para la generación de las superficies sintéticas de precipitación de los diferentes eventos de inundación identificados en la fase 1, se utilizaron 3 métodos de interpolación con el propósito de determinar el que mejor represente la variabilidad espacial y temporal de la red pluviométrica de

Cundinamarca, lo anterior, a partir de la comparación entre las superficies generadas por la red sintética y las superficies de lluvia e referencia del producto IMERG.

Los métodos se determinaron a partir del estudio realizado a los diferentes artículos citados en la sección del estado del arte "*Aplicación de métodos de interpolación en mediciones pluviométricas de precipitación".* En ese sentido, se eligieron dos métodos determinísticos de interpolación: Polígonos de Thiessen e IDW, los más usados en este grupo (Ly et al., 2013), y adicionalmente, se escogió el método geoestadístico Kriging Ordinario, definido como uno de los mejores estimadores de interpolación clásicos de ese grupo estadístico de generación de superficies (Cruz & Barrios, 2018).

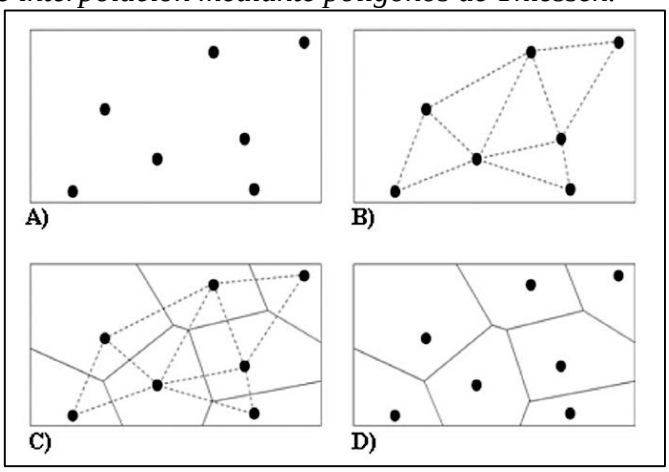
Teniendo en cuenta la distribución de las estaciones generadas en la subfase anterior (Subfase 1. Construcción de la red sintética de medición pluviométrica), y los registros de medición de lluvia obtenidos con el producto de estimación de precipitación IMERG (descargados en la primera fase), el primer paso consistió en adecuar los datos de lluvia del producto satelital a la cobertura de medición espacial de la lluvia (medición puntual) realizada por las estaciones pluviométricas. Para tal efecto, se generaron capas de estimación de lluvia, con una frecuencia de medición de 30 min, de acuerdo con la distribución de la red sintética de estaciones del ráster de 10 km (*Figura 8*); de igual forma, es preciso mencionar que estos insumos de lluvia fueron hallados de acuerdo con la duración particular de cada uno de los eventos de inundación identificados en la fase 1 (fecha inicio – fecha fin).

Posteriormente, a partir de los ráster de lluvia de 30 min obtenidos en el paso anterior, con el propósito de observar el efecto asociado a la influencia de la distribución espacial de las estaciones a la hora de realizar la interpolación de lluvia, se optó por utilizar la misma frecuencia de medición del producto satelital IMERG (30 min); al mantenerse constante la variable temporal esta no ejerce ningún tipo de influencia sobre los resultados obtenidos.

Con la obtención de los anteriores recursos, fue posible proceder a la generación de las superficies de lluvia, para cada método de interpolación, obteniéndose por cada uno de estos, lluvia interpolada cada 30 minutos. A continuación, se describe el fundamento teórico de los métodos de interpolación y la forma en la cual se realizó su aplicación en esta subfase, la cual se realizó por medio de códigos computacionales desarrollados con la colaboración del equipo de investigación del laboratorio HYDROS.

Los polígonos de Thiessen consisten en la generación de polígonos cuyo valor es atribuido únicamente por un punto. Como se muestra en la *Figura 9*, parten de la ubicación puntual de las estaciones (imagen a) luego se forma una red de triángulos a partir de mediadores de segmentos que unen los puntos de las estaciones (imagen b), se genera una división perpendicular y equitativa de sus lados (imagen c), y finalmente se forman los polígonos que intersecan estas divisiones (imagen d).

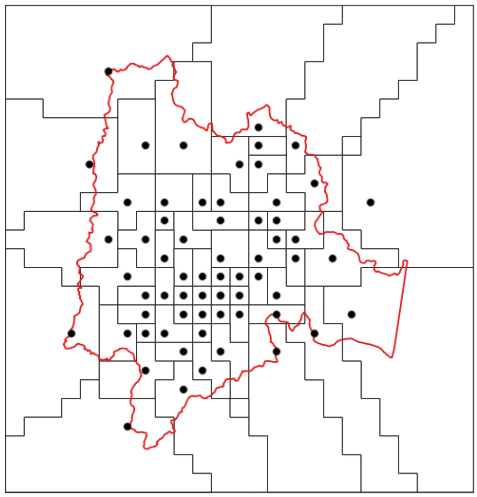
Figura 9. Procedimiento de interpolación mediante polígonos de Thiessen.



Fuente (Hernández, Delgado, & Espadas, 2011)

En cuanto a la técnica de Polígonos de Thiessen, haciendo uso de la herramienta de geometría "Polígonos Voronoi" del programa QGIS, se generó un ráster de referencia con los polígonos correspondientes, a partir de la distribución de los puntos de la red sintética de estaciones de la *Figura 8*, pues en todas las superficies se iban a obtener las mismas delimitaciones (ver *Figura 10*). Seguido a esto, por medio de códigos computacionales escritos en MATLAB se procedió a generar las superficies de lluvia a partir de las capas de lluvia del producto IMERG, adaptadas a la cobertura de medición puntual de la red sintética.

Figura 10. Polígonos de Thiessen generados para el área estudio, a partir de la red sintética de estaciones.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto al método de ponderación de distancia inversa (IDW por sus siglas en inglés), se basa en la obtención de los valores desconocidos a partir del promedio ponderado de los puntos a interpolar. Como se observa en la ecuación 3 la ponderación o peso, está en función inversa de la distancia entre las estaciones, por lo tanto, el peso es mayor cuando las estaciones se encuentran cercanas y disminuye a medida que la distancia va aumentando (Hernández et al., 2011).

$$Z_{x,y} = \frac{\sum_{p=1}^{r} Z_p {d_p}^{-n}}{\sum_{p=1}^{r} {d_p}^{-n}}$$

Ecuación 3. Método de ponderación de distancia inversa.

Con respecto a las variables de la *Ecuación 3*, $Z_{x,y}$ es el valor resultante, Z_p el valor de observación en el punto p, d_p la distancia desde el punto a estimar y el punto p, r la cantidad total de estaciones y el exponente n es el parámetro de potencia el cual controla la manera en que el peso disminuye a medida que aumenta la distancia, este generalmente debe ser mayor a 1, pues cuando son menores, la ecuación tiende a ser similar a una media aritmética, por lo tanto, se ha evidenciado en estudios que el valor más adecuado es 2 (Hernández et al., 2011; Vieux, 2004).

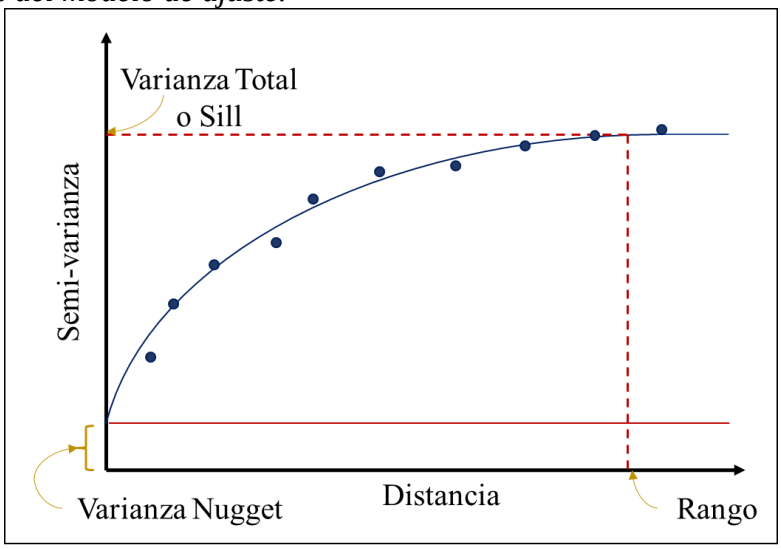
En ese sentido, el método de IDW se empleó a partir de un algoritmo basado en el lenguaje de programación de Python, utilizando la librería GDAL, la cual se usa en la realización de procesamientos geoespaciales como la interpolación (GDAL, s. f.). De esta manera, se aplicó el concepto de la *Ecuación 3* haciendo uso de las capas ráster de lluvia generadas a partir de la red sintética de Cundinamarca.

Finalmente, en cuanto a Kriging Ordinario, corresponde a uno de los métodos geoestadísticos más aplicados, el cual incorpora un modelo matemático para describir la variación espacial de los datos a través de una medida de la autocorrelación espacial entre pares de puntos, que describen la varianza a una determinada distancia, su cálculo se conoce como semi- varianza. De esta manera, al igual que el método de IDW, Kriging considera que lo más probable es que los objetos más cercanos se encuentren más relacionados y tengan una pequeña semi-varianza. Por el contrario, los objetos lejanos entre si están menos relacionados y tienen una alta semi- varianza (Hernández et al., 2011).

El semi-varioma o variograma, permite la representación gráfica de toda la muestra de puntos y su distancia con la varianza. Durante la ejecución de esta técnica, en primera instancia, se obtiene un semi-variograma experimental o empírico, por medio del cual se grafica una función estructural como la autocorrelación, entre la variable de interés y el atributo para realizar predicciones.

Seguidamente, dicho variograma es transformado a uno teórico por medio del ajuste de un modelo estadístico, el cual se obtiene matemáticamente a partir del ajuste de los modelos que relacionan la distancia con la semi-varianza; entre las funciones más comunes para realizar los ajustes se encuentra el modelo exponencial, esférico, gaussiano y lineal. Estos modelos, se componen de los siguientes parámetros (representados en la *Figura 11*): varianza total o "sill" la cual corresponde a la máxima semi-varianza obtenida entre los pares de puntos y debe coincidir con la varianza de la población, el rango es la distancia en la que la semi-varianza deja de aumentar, por tanto, indica la distancia a la cual los datos son espacialmente dependientes unos de otros, el nugget se entiende como la varianza no explicada por el modelo, y es calculada como la intercepción con el "eje y" (Gallardo, 2006). Finalmente, una vez realizado del ajuste del modelo es posible pasar a la realización de las predicciones de los datos faltantes (Hernández et al., 2011; Ly et al., 2013).

Figura 11. Parámetros del modelo de ajuste.



Adaptado de (J. L. Hernández et al., 2011)

El método de Kriging Ordinario, fue ejecutado haciendo uso del lenguaje de programación R-Studio, por medio de la librería RGeostats, una biblioteca de procedimientos geoestadísticos que posibilita el manejo de información definida en un espacio de cualquier dimensión, y puede procesar cualquier cantidad de variables simultáneamente (Geosciences Research Center, s. f.).

Los semivariogramas empíricos fueron generados cada 30 minutos durante la duración de cada evento de inundación, lo anterior, debido a la dependencia de la semi-varianza con los valores de lluvia registrados entre los diferentes pares de puntos (estaciones) de la red sintética. Con lo anterior, se procedió a realizar el ajuste estadístico a los variográmas experimentales para la obtención de los variogramas teóricos, para tal efecto, se utilizó el modelo esférico como la función que mejor representaba la semivarianza de la lluvia respecto a la distancia entre las estaciones. En este sentido, para generar un mejor ajuste, y automático (teniendo en cuenta el alto número de datos) de la función, se tomaron las siguientes consideraciones a los parámetros del modelo, para que fueran aplicadas las diferentes capas de lluvia obtenidos para cada evento: el sill fue igualado al resultado de la varianza de los datos obtenida para ese momento, respecto al rango, se estimó como la distancia del variograma empírico cuya varianza es la más cercana al 95% del sill; es decir, el 95% de la varianza de las mediciones. En cuanto al nugget se asumió que este es igual a cero, valor que indica que para este caso no hay problemas con las mediciones y la red de medición es suficiente (Gallardo, 2006; Hernández et al., 2011).

Teniendo en cuenta que los métodos de interpolación generan diferentes representaciones o superficies, fue necesario estudiar cual método se acercó más a la precipitación de referencia. Una forma de hacerlo fue por medio de la evaluación cuantitativa de las capacidades predictivas de la técnica de interpolación haciendo uso de métricas estadísticas (Hernández et al., 2011). De esta manera, se aplicaron tres métricas entre las superficies de lluvia de IMERG y cada superficie generada por los métodos, para así poder determinar el método que se utilizaría en la siguiente fase.

La primera corresponde al sesgo medio relativo (BIAS), el cual permite evidenciar el desfase porcentual entre las observaciones estudiadas. Se aplica usando la siguiente ecuación:

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

Ecuación 4. Sesgo medio relativo.

Siendo S_i las estimaciones de lluvia sintética y $O_i$las estimaciones de precipitación del producto satelital. Sus resultados se encuentran entre el intervalo (- ∞, ∞) donde cero significa que los valores entre las estimaciones son iguales y a medida que tienda a ser un valor positivo o negativo, las estimaciones están siendo sobreestimadas o subestimadas (Estupiñan, 2016).

La siguiente métrica corresponde al *Root Mean Square Error* (RMSE), este permite evidenciar las diferencias entre los valores estimados por los métodos de interpolación y los valores de referencia, cuantificando la magnitud del error (Vélez & Nieto, 2016). Su ecuación es la siguiente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}{N}}$$

Ecuación 5. Raíz del error cuadrático medio.

Donde y_i es el valor real, $\hat{y}_i$ es el valor estimado de la superficie sintética y N es el tamaño de la muestra. En esta métrica se encuentran valores entre cero (0) e infinito (∞), siendo cero error nulo y a medida que aumenta representa el grado de error registrado (Cabrera, 2017).

Finalmente, se encuentra el coeficiente de correlación de Pearson (CC). Este mide la intensidad de la relación lineal que se encuentra en este caso entre los valores de precipitación de las superficies sintéticas y las del producto IMERG. Sus valores oscilan entre menos uno (-1) y uno (1), donde cero (0) significa que no hay ninguna relación y -1 o 1 expresa una relación lineal positiva o negativa. A continuación, se encuentra su ecuación (Lahura, 2003), donde sus variables corresponden a las mismas que se nombraron en el apartado del sesgo o BIAS:

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

Ecuación 6. Coeficiente de correlación.

De esta manera, por medio de códigos computacionales se generaron por cada método de interpolación 3 mapas ráster para cada una de las métricas de error mencionadas anteriormente, adicionalmente también se obtuvieron los datos del mapa ráster en formato CSV, a partir de los cuales se realizaron histogramas en Excel por cada métrica. Finalmente, se realizó un análisis comparativo entre los tres métodos de interpolación, con el fin de escoger el que mejor haya representado las superficies de lluvia a lo largo del área de estudio.

Por último, con el método de interpolación escogido, se procedió a representar la frecuencia temporal de estimación de lluvia realizada por las estaciones del departamento de Cundinamarca, para esto, se

obtuvieron acumulaciones diarias y horarias de las superficies de IMERG, donde se extrajeron los valores de los pixeles correspondientes a la red sintética de estaciones (*Figura 8*) y se generaron las superficies de lluvia con el método de interpolación escogido. Una vez lo anterior, por medio de códigos computacionales se generó un ráster por cada una de las métricas estadísticas aplicadas, con el propósito de observar el efecto de la frecuencia de muestreo.

Fase 3. Determinación de factores espacio temporales que impactan la cobertura espacial y frecuencia de medición de precipitación en la modelación de inundaciones

Subfase 1. Identificación del impacto asociado a la cobertura espacial y la frecuencia de medición temporal

Esta subfase consistió en la simulación en serie de todos los eventos de inundación, haciendo uso del modelo hidrológico EF5. Para tal efecto se realizaron diferentes modelaciones, por un lado, haciendo uso de las superficies de lluvia interpolada en la anterior fase, de manera individual para cada una de las frecuencias temporales de medición de precipitación acumulada horaria y diaria, y por el otro, se ejecutó la simulación de dichos eventos con el producto satelital IMERG, con una única frecuencia de medición temporal de 30 minutos.

Posteriormente, con el propósito de identificar el impacto asociado a la cobertura espacial y la frecuencia de medición temporal (horaria y diaria), de las superficies interpoladas de precipitación, sobre las simulaciones de caudal generadas, se calcularon las mismas métricas estadísticas de error de la fase anterior (BIAS, RMSE y CC), tomando siempre como referencia las series de caudales generadas a partir de la precipitación del producto satelital IMERG. Lo anterior, se realizó por medio de los mismos códigos computacionales elaborados para la fase 2, obteniéndose como resultado tres mapas ráster por cada una de las métricas y un archivo formato CSV, por medio del cual se elaboraron histogramas con los resultados obtenidos por cada métrica, comparando la frecuencia relativa de error de los caudales obtenidos entre la escala de medición temporal diaria y horaria la precipitación de lluvia interpolada.

Subfase 2. Determinación del impacto de los factores espaciales y temporales sobre las simulaciones de inundación.

Esta subfase consistió en determinar el impacto de los factores espaciales y temporales sobre las simulaciones de caudal ejecutadas en la etapa anterior. Para lograrlo, se consideraron varias fuentes de información, por un lado, en el estudio de Vergara (2015) se pudieron definir algunos factores geomorfológicos, pues como menciona en su investigación dichos factores tienen relaciones entre las características de las cuencas hidrográficas y las inundaciones repentinas; y son: área de drenaje (*basin area*), entendida como el área drenada dentro de una corriente en un determinado punto, este puede ser de diferentes tamaños por escorrentía superficial, flujo sub superficial y flujo base (Shreve, 1974). Y pendiente media del cauce principal (*relief ratio*), factor a partir de la cual depende la velocidad de los flujos de agua en una cuenca; cuanto mayor es la pendiente, mayor es la velocidad de la corriente de agua, siendo así un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante determinada precipitación (Pike & Wilson, 1971). Por otra parte, se tuvo en cuenta lo encontrado en el marco conceptual, donde se consideró importante incluir el factor forma en este estudio, pues como menciona Londoño (2001) este factor se relaciona con el comportamiento de la escorrentía del agua en la cuenca

y la capacidad de amortiguamiento a crecientes. Finalmente, en la investigación de Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, Zoccatelli, y Borga (2016) describe en su estudio que las propiedades de la precipitación regional influyen en el rendimiento de la simulación, para tal efecto se consideró pertinente utilizar el promedio climatológico de precipitaciones totales anuales como una forma de observar la posible incidencia. Las anteriores variables se derivaron automáticamente, a partir del uso de un algoritmo desarrollado en MATLAB basado en el DEM de Cundinamarca. Para el caso de la precipitación promedio anual, esta se obtuvo de las bases de datos del laboratorio HYDROS. Los anteriores recursos, fueron obtenidos en formato ráster y su dominio correspondió al del área estudio.

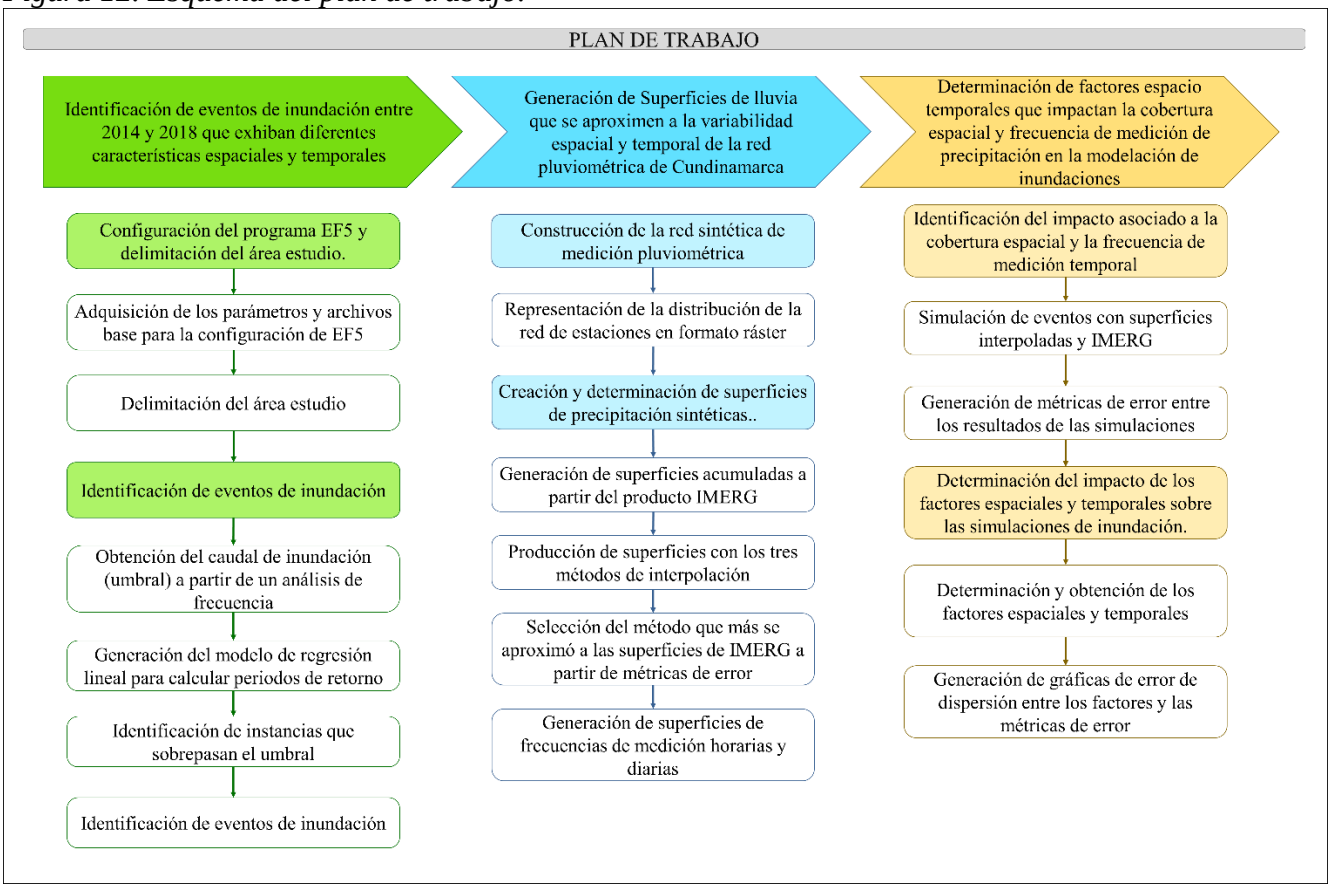
Una vez obtenidos los anteriores recursos, haciendo uso de un código desarrollado en MATLAB se generaron gráficas de error de dispersión, haciendo uso de las métricas BIAS, RMSE y CC, para cada uno de los factores estudiados. Teniendo en cuenta la gran cantidad de datos obtenidos, en algunos casos fue necesaria la aplicación de logaritmo en base diez, con el fin normalizar la dispersión de la muestra y poder observar tendencias.

En adición a lo anterior, cabe mencionar que a cada una de las gráficas generadas se calculó el coeficiente de determinación (R^2), con el propósito de que este sirva como una forma de explicar las variaciones de error producidas en las simulaciones de caudal del método de interpolación de IDW, a una determinada frecuencia temporal, producidas por una variable independiente; en este caso corresponde al factor espacial seleccionado (Laguna, 2014).

Por otra parte, se encuentra el parámetro de estacionalidad, el cual se definió a partir de la temporada de época seca y lluviosa en el departamento de Cundinamarca. Para tal efecto, se hizo uso de las fechas en las cuales ocurrieron los eventos de inundación, para posteriormente categorizarlos de acuerdo al régimen de lluvia bimodal descrito por IGAC (2007); considerándose como época lluviosa los meses de abril – junio y septiembre - noviembre, y época seca diciembre - marzo y julio y agosto. Con lo anterior, nuevamente se usó el modelo hidrológico, con el propósito de generar los caudales correspondientes a cada época, a partir de las superficies de lluvia interpolada horaria y diaria, para así comparar por medio de las métricas estadísticas usadas a lo largo de este objetivo el posible error asociado a la temporalidad en la cual se simulan dichos eventos. Como resultado de lo anterior, se obtuvo un archivo CSV a partir del cual se elaboraron histogramas como principal recurso para realizar el análisis

Finalmente, en la *Figura 12* se resumieron las principales etapas de la investigación descritas anteriormente, las cuales comprenden las diferentes técnicas e instrumentos necesarios para el cumplimiento de cada uno de los objetivos planteados.

Figura 12. Esquema del plan de trabajo.



Fuente: Elaboración propia.

11.3. Tabla metodológica

A continuación, se consolidó en la siguiente matriz las principales técnicas e instrumentos que se utilizaron para la ejecución de las subfases correspondientes a cada uno de los objetivos específicos.

Tabla 8. Cuadro metodológico de la investigación.

Objetivo general			
Caracterizar el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo de estimaciones satelitales de precipitación, en contraste con la de redes pluviométricas durante la modelación de inundaciones, para así describir los factores espaciales y temporales asociados al mismo en Cundinamarca – Colombia.			
Objetivo específico			
Identificar eventos de inundación que exhiban diferentes características espaciales y temporales a partir de simulaciones hidrológicas con precipitación medida desde satélites en el periodo de 2014 - 2018.			
Subfase	Técnicas	Instrumentos	Resultados esperados
Configuración del programa EF5 y delimitación del área estudio	Modelación hidrológica	Modelo hidrológico EF5 Programa QGIS	Eventos de inundación que exhiben diferentes características espaciales y temporales
	Análisis observacional	Mapa generado a partir de SIG	
Identificación de los eventos de inundación	Análisis de frecuencia (Log Pearson tipo 3)	Código computacional en el leguaje Python	
	Regresión lineal logarítmica	Mapa generado a partir de SIG	
	Análisis observacional	Histogramas	
Objetivo específico			
Generar superficies de lluvia que se aproximen a la variabilidad espacial y temporal capturada por la red pluviométrica de Cundinamarca, con base en mediciones satelitales de precipitación.			
Subfase	Técnicas	Instrumentos	Resultados esperados
Construcción de la red sintética de medición pluviométrica	Red neuronal *Self-Organizing Maps* (SOM)	Base de datos del Catálogo Nacional de Estaciones del IDEAM	A partir de la técnica de interpolación que mejor representó la variabilidad espacial y temporal de la red pluviométrica de Cundinamarca se determinó el efecto del factor espacial y temporal sobre las superficies interpoladas
	Métodos de interpolación: Thiessen, IDW y Kriging Ordinario	Códigos computacionales en R-Studio, MATLAB, Python	
Creación y determinación de superficies de precipitación sintéticas	Métricas estadísticas: BIAS, CC y RMSE	Programa QGIS y Excel	
		Mapas generados a partir de SIG	
	Análisis observacional	Histogramas	

Objetivo específico			
Determinar los factores espaciales y temporales que influencian el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo de precipitación en la simulación de inundaciones.			
Fase	Técnicas	Instrumentos	Resultados esperados
Identificación del impacto asociado a la cobertura espacial y la frecuencia de medición temporal	Modelación hidrológica Métricas estadísticas: BIAS, CC y RMSE Análisis estadístico y observacional	Modelo hidrológico EF5 Programa QGIS Mapas generados a partir de SIG Código computacional en el lenguaje de MATLAB	Impacto de la cobertura espacial y frecuencia temporal de medición de precipitaciones de las superficies de lluvia interpoladas en las series de caudal simuladas
Determinación del impacto de los factores espaciales y temporales sobre las simulaciones de inundación	Métricas estadísticas: BIAS, CC y RMSE Análisis estadístico y observacional	Código computacional en el lenguaje de MATLAB Gráficas de dispersión de error	Impacto de factores espaciales y temporales en dichas simulaciones

Fuente: Elaboración propia.

12. Aspectos éticos

Teniendo en cuenta el tipo de temática abordada en este estudio de investigación, se garantiza no haber realizado ninguna actividad que pusiera en riesgo la seguridad de los seres vivos o el entorno natural. También, cabe aclarar que no fue necesaria la obtención y tratamiento de información personal de ninguna población en especial.

Respecto a la información recolectada, se buscó obtenerla de fuentes reconocidas, con el fin de garantizar la fiabilidad de los datos proporcionados en los contenidos publicados; obteniendo así información verosímil que fuera útil dentro de este estudio. De igual forma, durante el desarrollo de este trabajo se tuvo en cuenta la importancia de reconocer la autoría de la información consultada en las diferentes fuentes físicas y electrónicas, lo anterior, por medio de la citación y referenciación completa de la misma.

13. Resultados, análisis y discusión

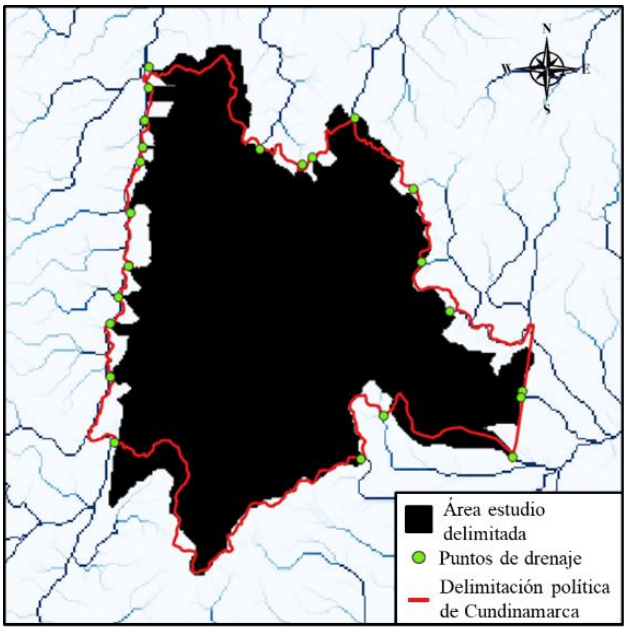
Fase 1. Identificación de eventos de inundación entre 2014 y 2018 que exhiban diferentes características espaciales y temporales

En esta sección se realizó el análisis correspondiente a los principales resultados obtenidos en las dos subfases definidas en la metodología:

Configuración del programa EF5 y delimitación del área estudio

El principal resultado de esta subfase corresponde a la delimitación del área estudio; definida a partir de la intersección de la división política del departamento y la hidrología de la zona. En general, se obtuvieron un total de 23 puntos de drenaje, definidos sobre un píxel de coordenadas específicas (*Ver Anexo 1*.). A partir estos, y con el uso de los parámetros recopilados al inicio de esta etapa, fue posible finalizar la configuración del modelo hidrológico, y por ende obtener la delimitación espacial de la zona de estudio, como se evidencia en la *Figura 13.*

Figura 13. Área estudio delimitada, a partir del ráster de acumulación de flujo y la división política del departamento de Cundinamarca.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la anterior imagen, el área generada por el modelo hidrológico no se ajusta en algunas zonas a los límites políticos del departamento. Para explicar este fenómeno, es necesario tener en cuenta que, a partir de la ubicación de los puntos de drenaje, el modelo hidrológico generó el área de captación de flujo de caudal de los diferentes pixeles que drenan el píxel seleccionado, es decir, determina todas aquellas corrientes que ejercen alguna influencia con el caudal tomado en ese punto, generándose así la delimitación de la zona.

En ese sentido, al tener en cuenta que los puntos fueron dispuestos sobre corrientes hídricas visibles en el ráster de acumulación de flujo (FAM), se observa que el área generada cubre gran parte del territorio, posibilitando así, que las simulaciones creadas puedan tener una mayor probabilidad de representar de una forma mucho más realista el comportamiento del fenómeno hidrometeorológico.

Sin embargo, también es posible evidenciar a lo largo del dominio dos escenarios no deseados, lugares donde se sobreestimó o subestimó el área departamental. En cuanto al primer escenario, este se pudo ocasionar por la toma de un píxel que posiblemente es drenado por más de una corriente hídrica, cuya ubicación es la confluencia o intersección de más de un afluente; dentro de los cuales se pudo encontrar alguno cuyo origen se encontrara fuera del área estudio, haciendo así, que el modelo hidrológico lo considerara como parte de la hidrología del departamento; un ejemplo de esto se evidencia en la parte sur-occidental del mapa de la *Figura 13*. Respecto al segundo escenario, los lugares donde se observaron vacíos espaciales pudieron ser generados al omitir visualmente algunos drenajes; bien sea, por la resolución del ráster de acumulación de flujo, con la cual no pudo ser posible notar la presencia de drenajes pequeños, o por la omisión involuntaria de los mismos a la hora de realizar el análisis observacional usado para su identificación; un ejemplo de esta situación se observó en toda la parte occidental de Cundinamarca, como se aprecia en la *Figura 13.*

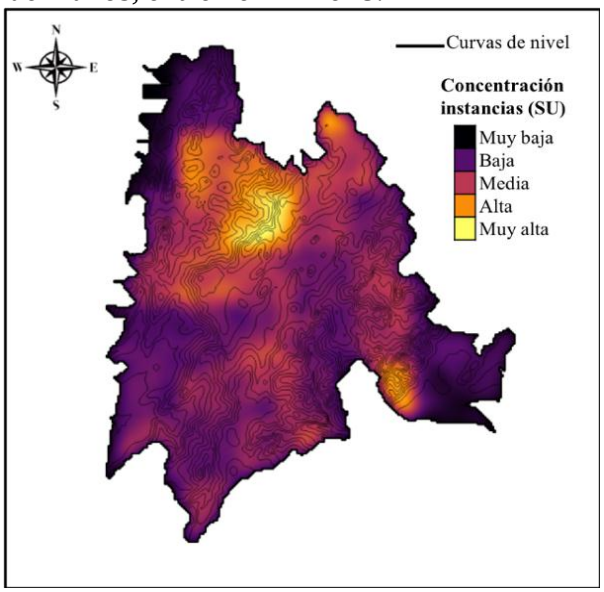
Frente a lo anterior, una posible solución hubiera sido aumentar la resolución del modelo de elevación digital por uno de una mayor, para así identificar más drenajes y, por ende, poder cubrir los vacíos espaciales generados. Sin embargo, este procedimiento no se vio necesario, pues al considerarse que este trabajo solamente necesita crear un entorno virtual bajo el cual se puedan simular una serie de procesos y fenómenos hidrometeorológicos no fue necesario contar con una delimitación política exacta del departamento.

Finalmente, cabe mencionar que a partir de esta parte del documento los resultados de mapas se presentaron bajo la delimitación espacial obtenida en esta subfase, y no a partir de las fronteras políticas departamentales, puesto que esto permite realizar un análisis más acorde al área de referencia que el modelo hidrológico tuvo a la hora de realizar las simulaciones.

Identificación de eventos de inundación

En primer medida, se realizó el análisis de las instancias de excedencia del umbral de periodo de retorno de dos 2 años en todo el intervalo de tiempo estudiado. Para tal efecto, en la *Figura* 14 se representó por medio de un mapa de calor la concentración espacial de las instancias, asociada al número veces en que un píxel haya igualado o excedido el caudal del umbral establecido, en todo en el área estudio.

Figura 14. Mapa de calor con curvas de nivel, correspondiente a las instancias que excedieron el umbral de periodo de retorno de 2 años, entre 2014 - 2018.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta la *Figura 14*, es posible observar que gran parte del territorio registró eventos hidrometeorológicos con un periodo de retorno, igual o superior, a 2 años. En la mayor parte del dominio, se aprecia una concentración media - baja de instancias. Sin embargo, en zonas como la parte noroccidental del departamento, se nota una concentración que oscila entre las categorías altas a muy altas; otro punto a destacar se encuentra al suroriente, donde se identificó una concentración alta de instancias.

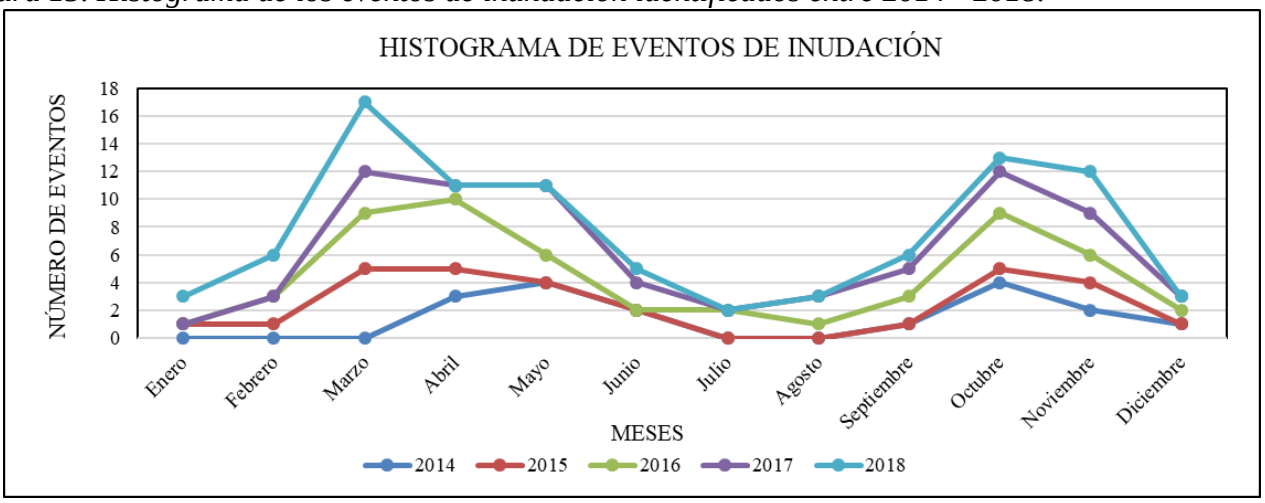
En este sentido, al contrastar los anteriores resultados con las curvas de nivel, es posible percibir que los sitios identificados con una mayor frecuencia de superación del umbral, se dio en paisajes con topografía compleja. Este mismo efecto es posible notarlo en otras partes de la imagen, donde se visualizan coloraciones naranja-amarillo que se extienden, en su gran mayoría, sobre sitios montañosos. De esta manera, se evidencia que fue posible identificar una gran diversidad de instancias a lo largo de Cundinamarca.

Teniendo en cuenta la metodología, una vez obtenidas las instancias, el siguiente paso consistió en agruparlas espacial y temporalmente para poder obtener los eventos, tal como se describió en la metodología, en total fue posible identificar 92 eventos de inundación; como se aprecia en el *Anexo 2* donde se encuentra información relevante de estos como: la fecha de inicio y finalización del evento, junto con su duración temporal.

A partir de lo anterior, con la realización del histograma de la *Figura 15*, fue posible representar y ubicar temporalmente los distintos eventos encontrados para cada mes con de su respectivo año. Al observar la gráfica obtenida es posible evidenciar que la cantidad de fenómenos hidrometereológicos respondieron de manera similar, al régimen de precipitación bimodal que caracteriza al departamento de Cundinamarca, el cual según IGAC (2007) presenta la mayor parte de sus lluvias desde el mes de abril hasta finales de junio y desde septiembre hasta finales de noviembre. Con esto, es posible observar que los eventos identificados se asemejan más a la variabilidad temporal de lluvias descrita

para la segunda mitad del año, pues como refleja el histograma, el mes de marzo presenció, respecto a los meses catalogados como de "baja lluvia", un mayor número de eventos.

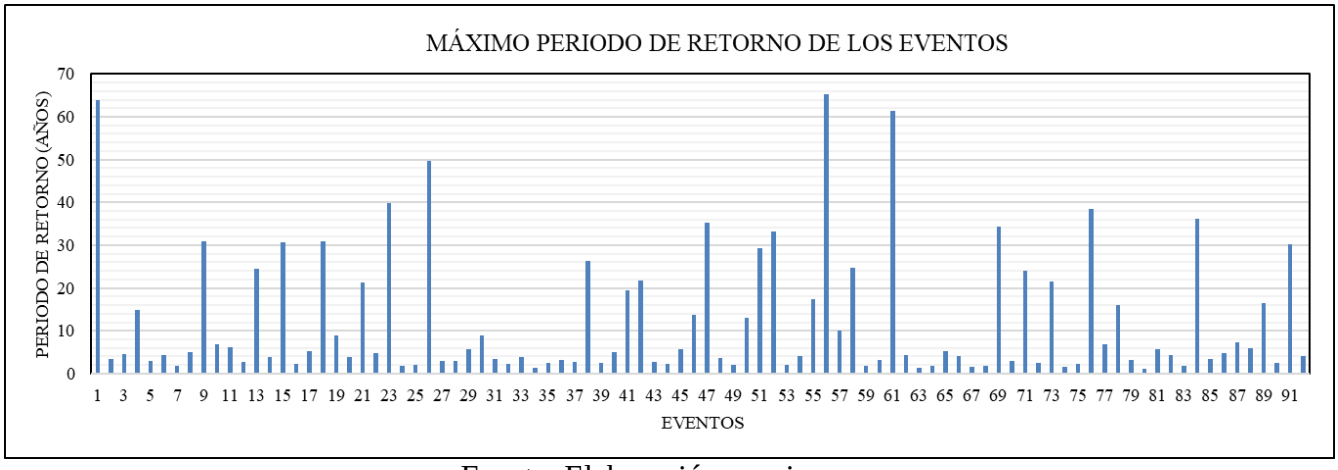
Figura 15. Histograma de los eventos de inundación identificados entre 2014 - 2018.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, a partir del modelo de regresión lineal, fue posible usar el periodo de retorno determinado para cada uno, como una forma de caracterizarlos; pues al interpretar las medidas de caudal como la frecuencia de ocurrencia es posible conocer aquellos eventos extremos o de baja intensidad (González & Jurado, 2014). En ese orden de ideas, se usaron los máximos niveles de recurrencia, o periodo de retorno, para la construcción del diagrama de barras de la *Figura 16.*

Figura 16. Diagrama de barras de los máximos periodos de retorno correspondientes a cada evento de inundación.

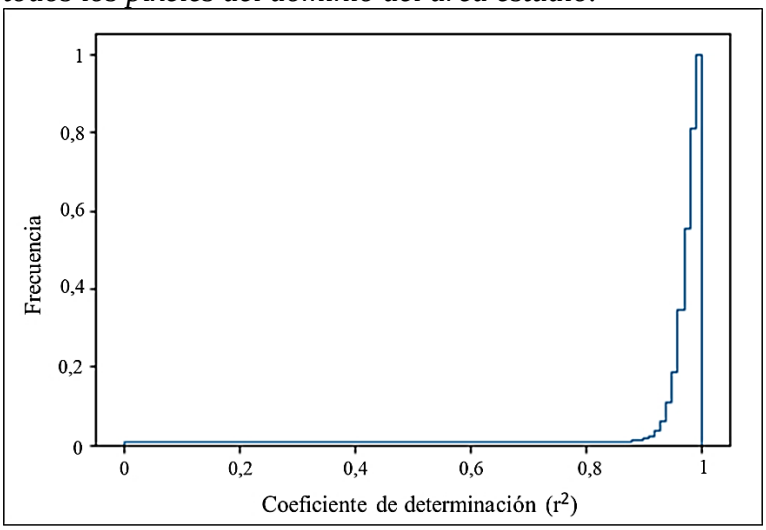


Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la *Figura 16*, se evidencia diversidad en los eventos capturados; obteniéndose como máximo valor 65.24, correspondiente al evento 56 y un valor mínimo de: 1.14, perteneciente al evento: 80; llamando la atención la obtención de este último valor, pues como se ha mencionado, el umbral para considerar los eventos de inundación fue el caudal igual o superior al periodo de retorno de

2 años registrado por cada instancia. Sin embargo, como se usó el método de regresión lineal logarítmica para simplificar el procedimiento del cálculo de los periodos de retorno a partir del máximo caudal, para todos los pixeles del dominio, la ecuación resultante de la aproximación de las rectas tuvo errores, los cuales se evidenciaron en los valores de periodo de retorno sobreestimados o subestimados; como se evidenció en el caso anterior. En este sentido, con el propósito de corroborar la calidad del ajuste realizado por este método en todos los pixeles, se determinó el valor r^2 o coeficiente de determinación (como se observa en el histogramas de la *Figura 17)*, donde se observa que la mayor parte de la muestra se encuentra por arriba de un r^2 mayor a 0.8, siendo este valor cercano a 1, lo cual indica que el ajuste es bueno y las predicciones halladas a partir del modelo obtenido son fiables (J. L. Hernández et al., 2011).

Figura 17. Histograma del r2 obtenido de la regresión lineal logarítmica para el cálculo de los periodos de retorno en todos los pixeles del dominio del área estudio.

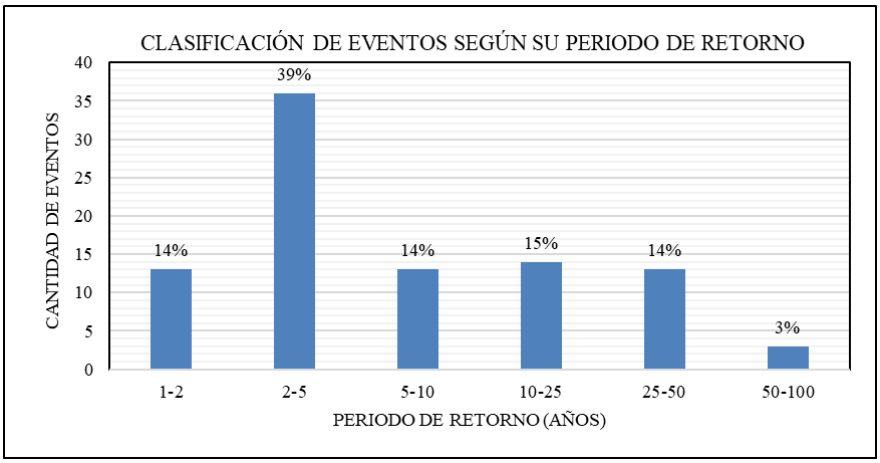


Fuente: Elaboración propia.

Con la alta variabilidad de los valores observados en la *Figura 16*, cabe destacar la posibilidad de haber capturado eventos que van desde inundaciones pluviales, ocasionadas cuando la capacidad de retención e infiltración del terreno fue sobrepasada y se generaron posibles acumulaciones de lluvia, o inundaciones fluviales, ocasionadas cuando la escorrentía generada a partir de la lluvia, supera la capacidad máxima de transporte del cuerpo de agua, desbordándose más allá de la ribera del río (Salas & Jiménez, 2019).

Por otro lado, al observar el histograma de la *Figura 18*, realizado a partir del establecimiento de rangos definidos a partir del uso de la escala usada en la tabla de "*Factor de frecuencia K para distribuciones gamma y Log Pearson tipo 3*" (Bedient et al., 2013, p. 195). Se evidencia que gran parte de los máximos de los eventos se tuvieron en el intervalo de 2 - 5 años, teniéndose un 39% de la muestra general. Asimismo, respecto a los más raros los cuales se encuentran en el rango de 50 – 100 años, representaron solo un 3% del máximo observado del total de los eventos.

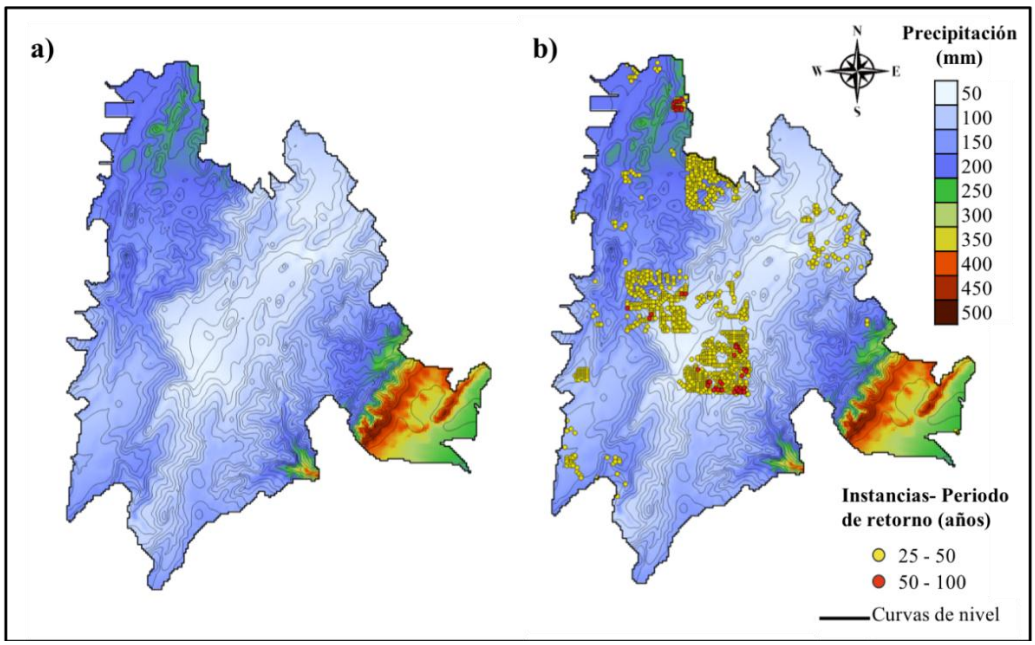
Figura 18. Histograma del número de eventos de inundación de acuerdo con su máximo periodo de retorno, entre el periodo 2014 - 2018.



Fuente: Elaboración propia.

Al saber que la mayor parte de los desastres ocasionados se dan principalmente por la ocurrencia de eventos de grandes intensidades, se consideró pertinente estudiar los lugares donde se evidenciaron la mayor parte de estos fenómenos hidrometeorológicos. Para esto, se usó como referencia la *Figura 18*, de la cual se tomaron los eventos contenidos en los rangos de periodo de retorno 25 – 50 (ID de los eventos: 9, 15, 18, 23, 26, 38, 47, 51, 52, 69, 76, 84, 91) y 50 – 100 (ID de los eventos: 1, 56 y 61). A partir de los anteriores eventos, se extrajeron las instancias de periodo de retorno, mayores o iguales a 25, de cada uno de estos y se ubicaron en el dominio estudio, junto con la capa de curvas de nivel y precipitación mapa b) *Figura 19*, generado a partir del mapa de referencia a).

Figura 19. Mapa de instancias identificadas de los eventos de inundación entre los periodos de retorno de 25 – 100 años, sobre la capa de promedio climatológico de precipitaciones totales anuales y curvas de nivel de Cundinamarca.



Fuente: Elaboración propia.

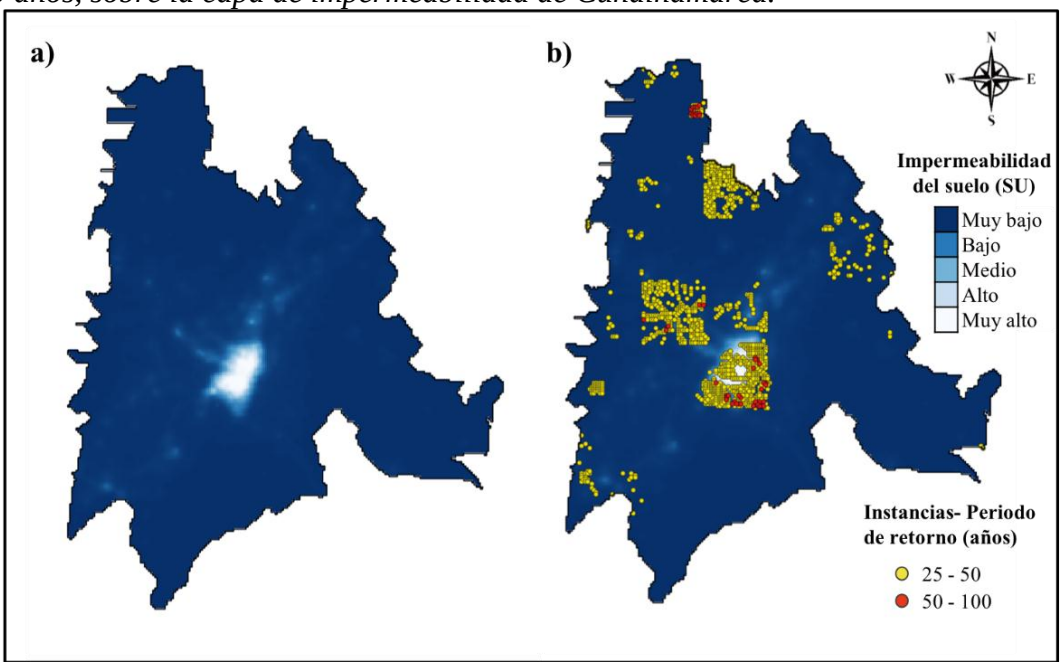
Antes de analizar el resultado obtenido en la *Figura 19*, es preciso mencionar el efecto observado en aquellas zonas del mapa donde hubo una alta distribución de instancias de periodo de retorno, se observa como los puntos en la periferia de estos grupos tendieron a tomar una forma "cuadricular", esto se debió a la influencia de la resolución espacial de la grilla de 25 km del producto de precipitación satelital 3B42, pues como es propio del uso de este tipo de estimaciones, se proporcionó la misma información de lluvia a los pixeles de 1km de la grilla del DEM que se encontraran dentro de la misma celda de 25 km.

Ahora bien, al observar la *Figura 19* - mapa b), la mayor parte de los eventos de altos periodos de retorno, se identificaron en zonas cuya precipitación oscila entre los 50 – 200 mm. En general, de las distribuciones observadas a lo largo del departamento se dieron en grupos de instancias, llamando la atención, por un lado, un pequeño conjunto de instancias ubicadas al norte de Cundinamarca, pues como se observa, en un área pequeña, se presentaron altos periodos de retorno, llegando a alcanzar valores entre 50 – 100 años, y por el otro, como es de notar se evidencian otros tres grandes grupos en todo el dominio, un primer grupo ubicado sobre la cuenca del río Minero; ver *Figura 4.* Mapa de Unidades Hidrográficas del departamento de Cundinamarca, y otros dos grupos dos ubicados en la parte central del mapa; ver la *Figura 19*, para estos casos en particular, es posible notar que estos altos periodos de retorno se concentraron al occidente y al oriente de la cuenca del río Bogotá, sobre la divisoria de aguas y las zonas montañosas cercanas a esta.

Asimismo, cabe destacar la ausencia de altos periodos de retorno al suroriente de Cundinamarca, durante los 5 años de estudio, siendo esta una de las zonas más lluviosas del territorio (como se observa en la *Figura 19*). Esto puede indicar, que este tipo de zonas al estar expuestas constantemente a altos flujos de agua en su superficie, poseen factores a su favor que controlan su flujo hidrológico, como: características de los cauces, densidad de drenaje y particularidades de la morfología de la cuenca (tamaño, forma, relieve, entre otras) haciendo que sea mucho más eficiente la evacuación de grandes cantidades de agua, y por ende que la presencia de eventos de inundación de grandes magnitudes requiera de una pluviosidad mayor a la que se presenta normalmente (Londoño, 2001).

Desde otro punto de vista, considerando la importancia del papel que desempeña la impermeabilidad frente a las condiciones para la generación de eventos de inundación, se construyeron mapas de impermeabilidad, como se observa en la *Figura 20*, del departamento con el fin de observar relaciones entre este parámetro y los altos periodos de retorno obtenidos.

Figura 20. Mapa de instancias identificadas de los eventos de inundación entre los periodos de retorno de 25 – 100 años, sobre la capa de impermeabilidad de Cundinamarca.



Fuente: Elaboración propia.

Al observar el mapa a) de la *Figura 20*, se evidencian coloraciones azul claro y blanco en algunos sitios, atribuidas principalmente a cascos urbanos, y una gran presencia de estas en la parte central del departamento, donde tienden a encontrarse la mayor parte de los corregimientos de gran extensión, como es el caso de Bogotá, el cual resulta de interés, pues como se observa en el mapa b), es posible observar que las instancias tienden a cubrir gran parte de su extensión. Lo anterior, puede explicarse debido a las diferentes actividades antrópicas como la deforestación y los cambios de uso del suelo dados en esta región, principalmente relacionados con la creciente urbanización, pueden ocasionar cambios en la respuesta hidrológica de la cuenca frente a este tipo de fenómeno aumentando su magnitud, ocurrencia y durabilidad (Salas & Jiménez, 2019). Pues en este tipo de casos, cuando los suelos pierden o disminuyen su capacidad de capturar y almacenar altos volúmenes de agua, ante la ocurrencia de lluvias intensas, se genera una mayor escorrentía la cual no puede ser ralentizada al momento de ser vertida en los arroyos, aumentando la posibilidad de tener eventos de inundación (FAO, 2015).

Para finalizar esta parte del análisis, fundamentada principalmente en el uso de los valores de severidad u ocurrencia (periodos de retorno), resulta preciso comparar los anteriores mapas de instancias de los periodos de retorno comprendidos entre 25 – 100 años (*Figura 19 y Figura 20*) con el mapa de calor de la concentración de instancias de todos los eventos identificados *(Figura 14)*, pues se evidencia que los lugares descritos con una mayor frecuencia de superación del umbral de periodo de retorno de dos años no correspondieron a aquellos lugares donde ocurrieron los fenómenos de mayor intensidad.

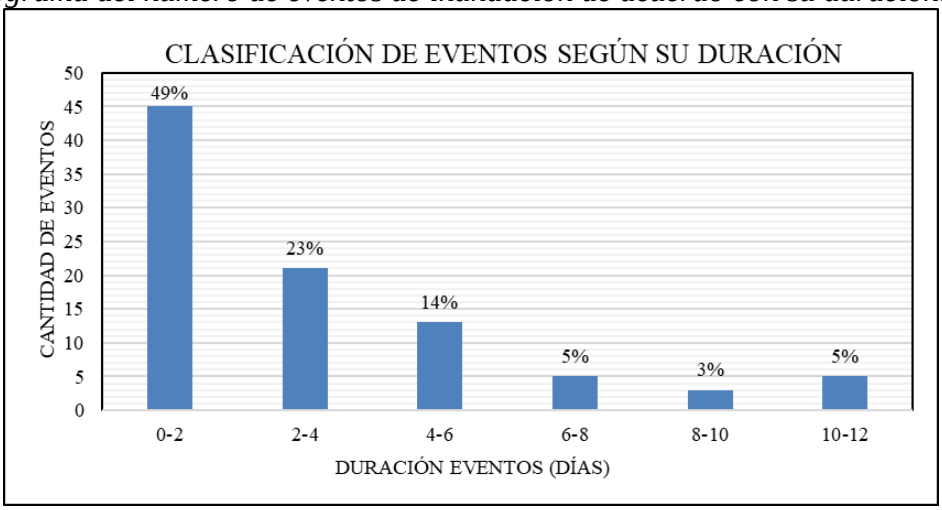
Por otro lado, como menciona Pardo & Rodríguez (2014) al estudiar los eventos de inundación, es necesario considerar variables como el tiempo de duración y el área de la tormenta, pues la magnitud de estas puede servir para caracterizar las mismas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se elaboró el diagrama de barras de la *Figura 21*, correspondiente al tiempo aproximado de duración de los diferentes eventos de inundación. Adicionalmente, se realizó un histograma con el fin de poder clasificar los eventos de inundación de acuerdo con su duración, y a partir de esto poder caracterizar la muestra encontrada.

Figura 21. Diagrama de barras de la duración estimada de cada evento de inundación.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 22. Histograma del número de eventos de inundación de acuerdo con su duración.



Fuente: Elaboración propia.

Al observar la *Figura 21*, se aprecia una amplia variación de la muestra de eventos de inundación identificados, teniéndose como valor máximo de duración 11.8 días, correspondiente al evento 61, y como valor mínimo 0.6 días, perteneciente al evento 80. En general, se obtuvo que la media de los eventos tuvo una duración de 3.2 días.

Al observar el histograma de la *Figura 22*, se evidencia, que cerca de la mitad de los eventos obtenidos, un 49%, se ubicó en el periodo de duración 0 (menor a 1 día) - 2 días. Por otro lado, se observa una considerable disminución de la muestra de eventos comprendidos después de 4 – 6 días;

teniéndose así, como la menor concentración de estos en el periodo de 8 – 10 días (3%), seguido por las duraciones de 6 – 8 y 10 -12 días con un 5% del total.

Teniendo en cuenta lo descrito al final del último párrafo, los eventos identificados con una alta magnitud temporal fueron generados por una alta actividad hidrometeorológicas, caracterizada posiblemente por presentar diferentes episodios de lluvias, intensas o continuas, en pequeños intervalos de tiempo de diferencia entre unas y otras, para ser catalogadas como pertenecientes a un evento, tal como se describió en la sección de metodología.

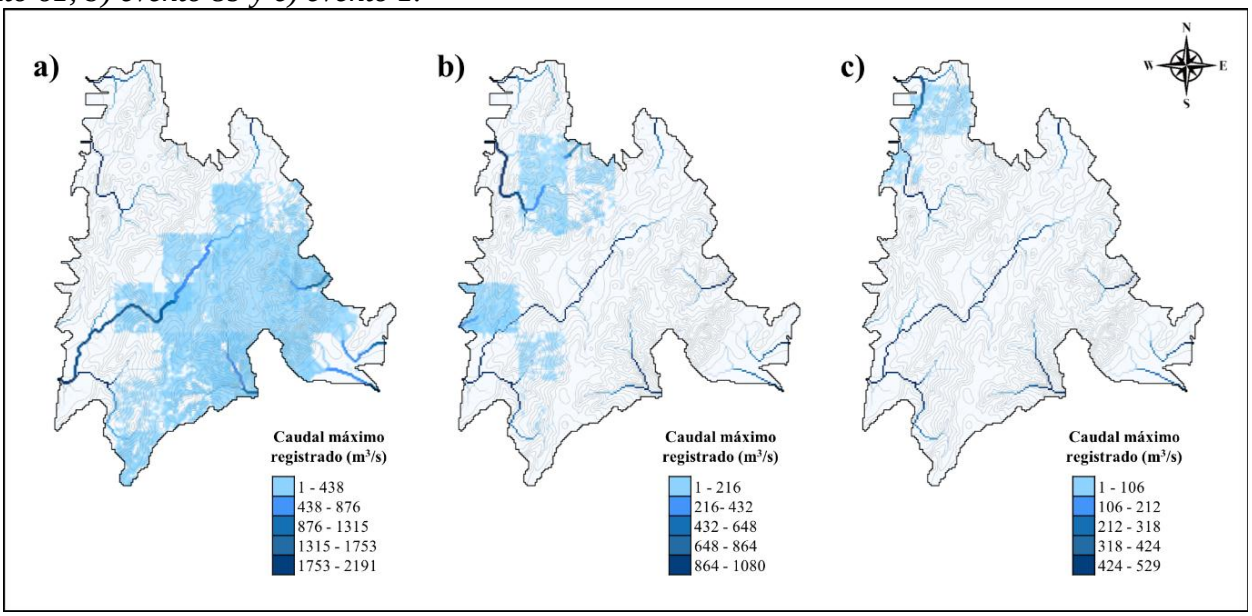
En este sentido, al haber considerado capturar la actividad hidrometeorológica a lo largo de todo el dominio para definir los eventos de inundación, esto permitió la posibilidad de encontrarlos en diferentes dimensiones espaciales; tal como se observó al generar el diagrama de barras de la *Figura 23*, donde se observan eventos de distintas magnitudes.

Figura 23. Diagrama de barras del área característica de cada evento de inundación.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como se ha observado hasta este punto, diferentes factores como la intensidad de lluvia, tiempos de duración y área de la tormenta se expresan de manera diferente en los eventos de inundación, es por esto que a continuación se tomaron los eventos 61, 89 y 1; con el fin de ver de manera particular como estas variables confluyen en un mismo escenario.

Figura 24. Mapas de eventos de inundación generados a partir de las instancias de superación del umbral de periodo de retorno de cada evento de inundación, sobre la capa de ríos y curvas de nivel; a) evento 61, b) evento 89 y c) evento 1.



Fuente: Elaboración propia.

Como se observa en el mapa *a)* de la *Figura 24*, el evento 61 tuvo una alta extensión sobre el dominio del departamento, sumado a su larga duración (11.8 días), es claro que correspondió a un evento con una alta actividad hidrometeorológica. Posiblemente este fenómeno, presenció múltiples escenarios de lluvias consecutivas en diferentes partes del dominio capturado durante todo el periodo de tiempo en el que estuvo activo; dentro de los cuales, se registró uno de los momentos más extremos de inundación identificados, pues se obtuvo como máximo periodo de retorno un valor de 61.31 años. En este sentido, al estudiar las principales fuentes hídricas en el área de influencia, se visualiza como los caudales máximos fueron observados sobre estos, intensificándose aguas abajo; lo anterior aumenta la probabilidad de registrar inundaciones de tipo fluvial, pues si estas corrientes hídricas reciben el agua de drenajes que recorren grandes distancias, se puede superar la capacidad máxima de transporte del cuerpo de agua, desbordándose el cauce e inundando terrenos aledaños (Pardo & Rodríguez, 2014).

Por otro lado, se encuentra el evento 89 (mapa *b)* de la *Figura 24*, el cual, si bien no tuvo una de las mayores áreas estimadas de influencia, su duración fue una de las más largas (10.8 días), por lo que se logró capturar una alta actividad hidrometeorológicas, que a diferencia del anterior evento se puede observar su desarrollo en diferentes zonas de Cundinamarca. Por otro lado, el máximo periodo de retorno identificado para este evento fue de 16.36 años; un valor no muy alto al comprarlo con los otros máximos obtenidos, sin embargo, este dato permite contemplar la ocurrencia de lluvias intensas, posiblemente dadas en su mayoría en la parte norte del departamento, pues como se observa en el mapa hubo una mayor respuesta hidrológica en el caudal de los principales cauces. Para este tipo de casos, como menciona Pardo y Rodríguez (2014) no es necesario la presencia de lluvias con una alta severidad para favorecer la ocurrencia de los fenómenos de inundación, el tener abundantes lluvias durante un tiempo prolongado pueden generar este tipo de escenarios.

Por último, respecto al evento 1, como se observa en el mapa *c)* de la *Figura 24*, su área de influencia al igual que su duración (2 días); en comparación con los eventos citados hace un momento, posee una magnitud mucho más corta, sin embargo, este resultó de interés pues registró uno de los periodos de retorno más raros (63.89 años), pudiendo ser escenario de uno o más momentos de lluvia con una alta severidad, que al ser sumadas con la características descritas al inicio de este párrafo, se aumenta la probabilidad de que los suelos se puedan saturar rápidamente (al recibir altas cantidades de lluvia), generándose así escorrentía superficial, que al darse en terrenos complejos, la velocidad con la que es vertida el agua sobre cuerpo de hídrico aumente su caudal, favoreciendo así las condiciones para presenciar eventos de inundación como las crecientes súbitas (Pardo & Rodríguez, 2014).

Fase 2. Generación de Superficies de lluvia que se aproximen a la variabilidad espacial y temporal de la red pluviométrica de Cundinamarca.

Los resultados obtenidos en esta fase corresponden a las superficies de lluvia sintética generadas por cada método de interpolación, a partir de las capas de lluvia del producto satelital IMERG, correspondientes a los eventos de inundación identificados en la anterior fase. A las superficies generadas, se calcularon las métricas estadísticas BIAS, RMSE y CC, lo anterior, con el propósito de definir la técnica que mejor representara la variabilidad espacial y temporal de precipitaciòn que captura la red pluviométrica de Cundinamarca.

Efecto de la cobertura espacial de medición en la generación de superficies de lluvia

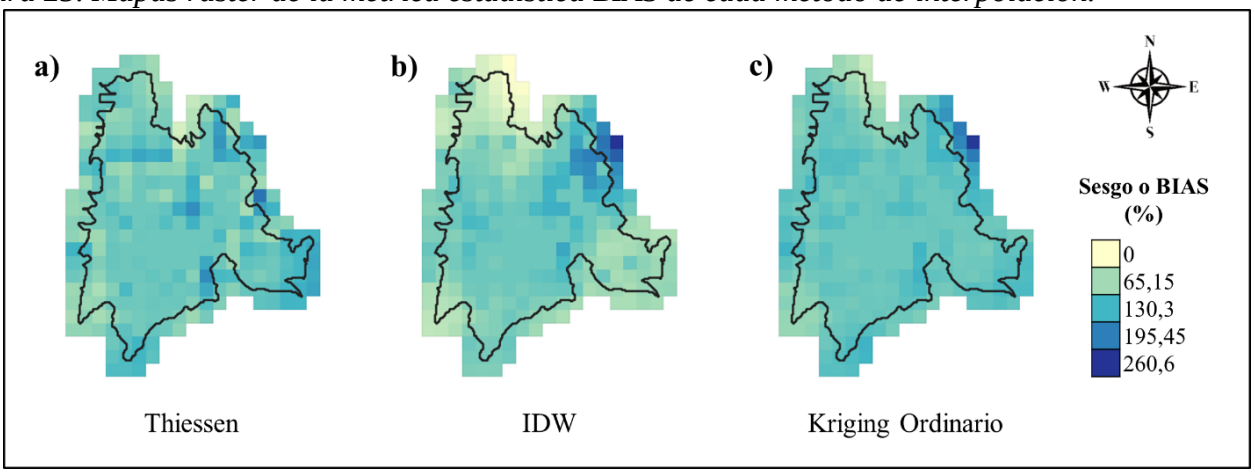
Los resultados analizados a continuación, corresponden al efecto del factor espacial sobre las superficies interpoladas, como se mencionó en la metodología, al usar la misma frecuencia temporal de estimación para la generación de superficies a partir producto satelital IMERG (30 min), dicha variable no ejerció ningún efecto sobre los resultados, pues esta se mantuvo constante para todos los casos. Posteriormente, se procedió a observar el efecto de la variabilidad temporal sobre las superficies sintéticas de precipitación obtenidas del método de interpolación escogido.

En cuanto a la métrica BIAS su cálculo permitió conocer la diferencia porcentual entre las observaciones generadas por las técnicas de interpolación y las observaciones del producto satelital IMERG. En ese sentido, se obtuvieron los mapas ráster de la *Figura 25,* a primera vista, se observa que no se obtuvo ningún tipo de subestimación de la lluvia interpolada en alguno de los métodos. En general, todas las técnicas obtuvieron sobrestimaciones, distribuidas en diferentes zonas del dominio con distintos desfases porcentuales. En cuanto al método de Polígonos de Thiessen se nota un mayor contraste entre valores de sesgo a lo largo del departamento. Al estudiar el mapa obtenido con Kriging, se evidencia una menor variación del sesgo, no obstante, los valores se mantienen entre los porcentajes más altos. Por otro lado, al observar IDW, se visualizan colores más claros, en la parte norte y en menor medida al oriente del área estudio, lo cual indica la obtención de mejores series de datos, sin embargo, en las otras partes del departamento la generación de sesgo es visualmente alta.

En contraste con lo anterior, al observar el histograma de la *Figura 26* es posible identificar que los métodos de Polígonos de Thiessen y Kriging Ordinario obtuvieron una mayor frecuencia de error porcentual, entre 100 - 150 %. Mientras que IDW registró su mayor error entre el rango de 50 – 100%, adicionalmente, este método obtuvo una mayor frecuencia relativa entre el 0 y el 50% respecto a las otras dos técnicas. Lo anterior, permite establecer que el método de interpolación IDW obtuvo una

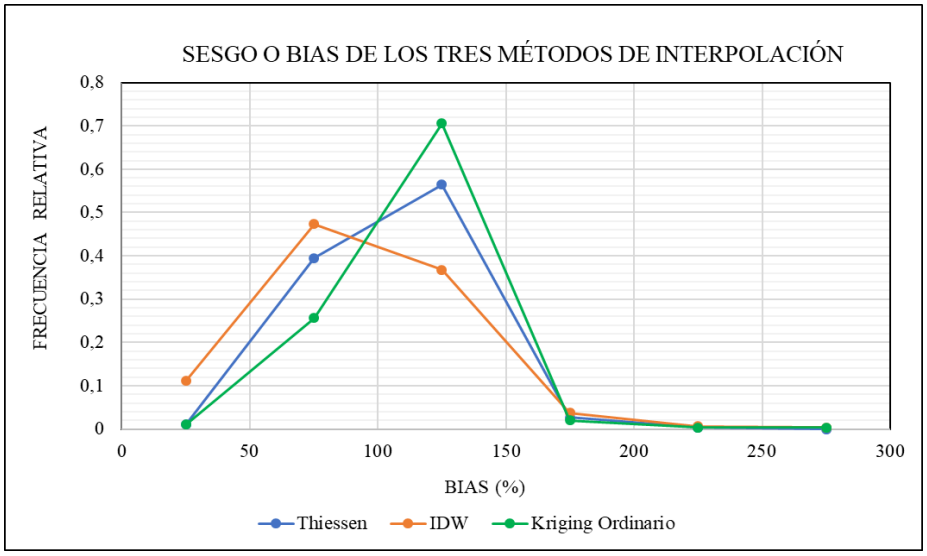
menor incertidumbre en comparación con los otros dos métodos, al ser evaluado por medio de esta métrica.

Figura 25. Mapas ráster de la métrica estadística BIAS de cada método de interpolación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Histograma de la métrica estadística BIAS, correspondiente a cada método de interpolación.



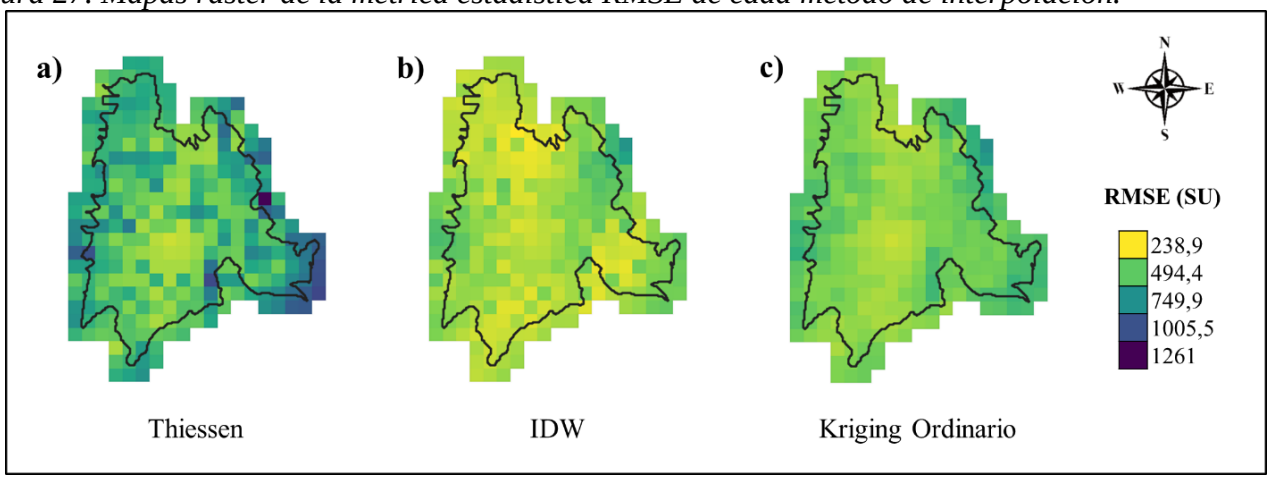
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, a partir del cálculo de la métrica RMSE fue posible conocer la magnitud del error, obtenido a partir de las diferencias entre los valores estimados por los métodos de interpolación y los valores de referencia de las capas de precipitación de IMERG, obteniéndose como resultado los mapas ráster de la *Figura 27*. En comparación con BIAS, la diferencia visual entre los resultados obtenidos de estas figuras son mas evidentes. Al observar la imagen correspondiente a Polígonos de Thiessen se nota una mayor obtención de magnitud de error en gran parte del dominio, frente a los otros métodos; incrementandose hacia las periferias del departamento, donde la densidad de estaciones de la red sintética fue mucho menor, en contraste con la obtenida en regiones centrales del área estudio; como se observa en la *Figura 27*. Por otro lado, en cuanto a Kriging Ordinario los regístros evidenciados en el

mapa c) de la misma figura, tuvieron valores altos de RMSE, sin embargo, mucho menores a los generados por Thiessen. Respecto al método de IDW, se observa que fue la técnica que mejores estimaciones realizó, debido a que en gran parte del mapa se visualizan coloraciones amarillas y verde claro, indicando así una mejor aproximación a las estimaciones de referencia, sin embargo, al igual que en las demás técnicas hubo zonas donde se calcularon magnitudes de error altas.

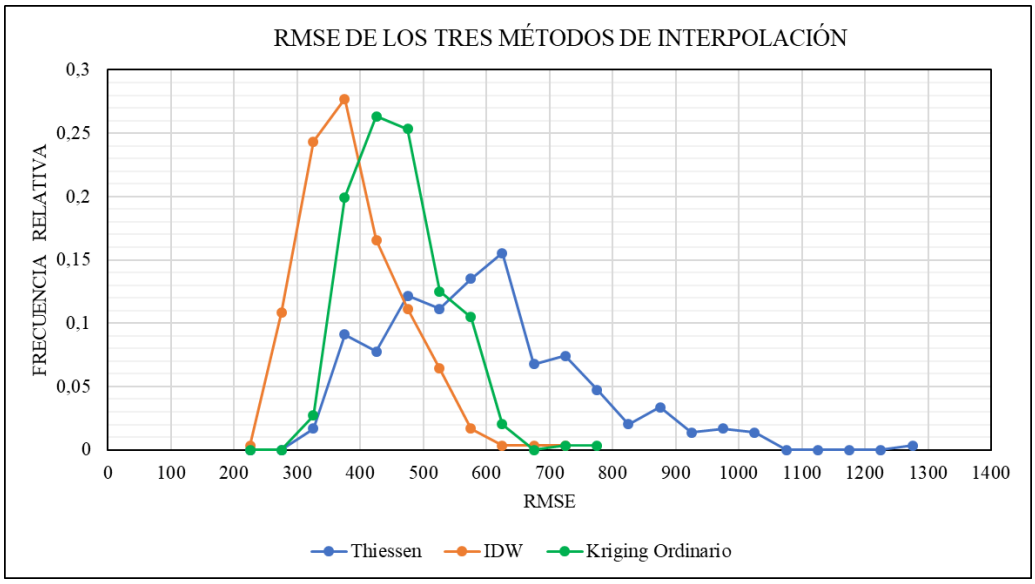
Teniendo en cuenta lo anterior, al estudiar el histograma de la *Figura 28*, se explica lo observado en los mapas generados en la *Figura 27*. Para el caso del método de Polígonos de Thiessen, se evidencia que obtuvo una alta variabilidad en la distribución de la frecuencia relativa en las mayores magnitudes de error. Respecto a Kriging Ordinario, se observa que la frecuencia relativa de los errores se dió en un rango mucho menor al tenido por Thiessen. Mientras que en el método de IDW, se evidencia que tuvo la mayor parte de la frecuencia hacia valores de magnitud menores a los obtenidos en las otras dos técnicas. En conclusión, el método de interpolación que obtuvo mejores resultados es el de IDW, si bien sus resultados no se obtuvieron cerca al cero, es el que mejor se aproxima a la estimación de lluvia generada por IMERG.

Figura 27. Mapas ráster de la métrica estadística RMSE de cada método de interpolación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 28. Histograma de la métrica estadística RMSE correspondiente a cada método de interpolación.

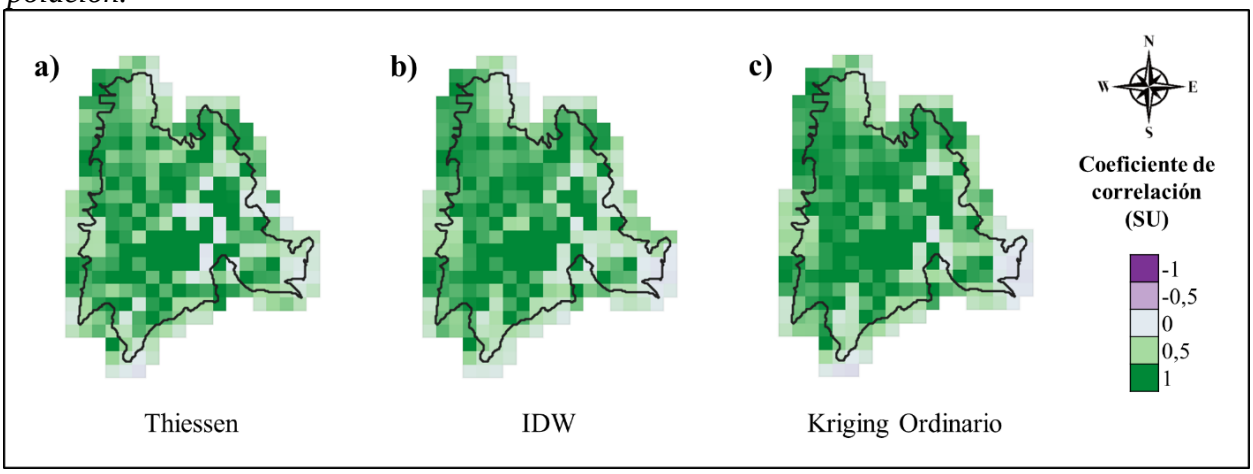


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al coeficiente de correlación lineal, por medio de este se pudo conocer la intensidad de la relación lineal entre los valores de precipitación de las superficies interpoladas y las del producto de precipitación IMERG. En general, al analizar los mapas de la *Figura 29*, no se evidencia visualmente una diferencia significativa entre los resultados obtenidos por los tres métodos frente a esta métrica. Sin embargo, es preciso mencionar que las tres técnicas obtuvieron sus máximas correlaciones en los pixeles correspondientes a las ubicaciones de las estaciones de la red sintética optimizada (ver *Figura 8*); este resultado es coherente debido a que el píxel al contar con la información del producto de precipitación IMERG, a la hora de realizar las interpolaciones el efecto de la creación de las superficies no afecta significativamente la serie de datos de lluvia, manteniéndose una fuerte asociación lineal positiva. En este sentido, los menores coeficientes de correlación se encuentran en aquellos lugares donde existen vacíos de registros de datos.

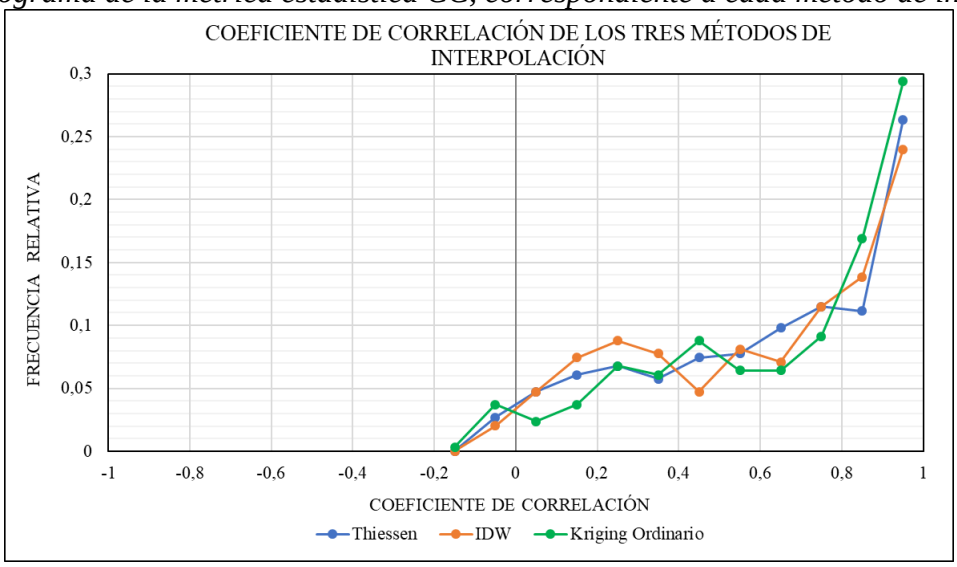
Al observar el histograma de la *Figura 30*, en primera instancia fue posible notar la obtención de asociaciones negativas entre los tres métodos de interpolación, los cuales obtuvieron valores entre – 0.2 y 0; estos resultados no pudieron ser identificados en los anteriores mapas por su relativa cercanía al cero, tomando así colores no diferenciables al aplicado a dicho valor. Por otro lado, al visualizar la gráfica de esta figura, se evidencia un comportamiento similar entre las frecuencias obtenidas entre los tres métodos de interpolación, respecto a los valores de coeficiente de correlación, entre tanto, al no observar una diferencia significativa entre las técnicas, esta métrica no fue tenida en cuenta a la hora de definir el método de interpolación que mejor rendimiento tuvo en la generación de superficies.

Figura 29. Mapas ráster de la métrica estadística coeficiente de correlación de cada método de interpolación.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Histograma de la métrica estadística CC, correspondiente a cada método de interpolación.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, como se observó anteriormente los diferentes métodos de interpolación obtuvieron errores a la hora de estimar la precipitación no capturada, por el registro de datos puntuales, de la red sintética de estaciones. Este panorama es común al realizar este tipo de procedimientos pues como menciona Cifuentes (2016) cuando no se posee una alta densidad de estaciones el grado de incertidumbre de la lluvia interpolada aumenta.

En adición a lo anterior, como se observó en las diferentes métricas estadísticas, el grado de impacto se dio de diferente forma en los métodos de interpolación. En el caso de Polígonos de Thiessen se observa que fue el que menor rendimiento obtuvo a la hora de realizar la interpolación. Esto puede ser explicado, a partir de lo mencionado por Hernández, Delgado, y Espadas (2011) los cuales mencionan que para obtener mejores resultados con esta técnica es necesario un alto número de puntos de muestreo, pues como se observó en la *Figura 10* los polígonos generados en el área estudio, sobre todo

en la periferia obtienen gran tamaño ocasionando que grandes extensiones tengan un mismo valor, haciendo que no se tenga en cuenta la variabilidad de la región y por ende de la lluvia. Por otro lado, en cuanto al método de Kriging Ordinario, como se evidenció durante el desarrollo de esta sección esta técnica no sobresalió en la estimación de los datos de lluvia faltantes, de esta manera, al tener en cuenta que gran parte del desempeño de este método depende del ajuste realizado a los semi-variogramas; como se describió en la metodología, debido al alto número de capas ráster de lluvia del producto IMERG a interpolar, no fue posible realizar un ajuste particular a cada uno de los variogramas resultantes de cada conjunto de datos, tal como sugiere (Ly et al., 2013), aumentando probabilidad de calcular valores diferentes a la lluvia de referencia. Finalmente, el método que mejor rendimiento tuvo a la hora de interpolar las superficies fue IDW; por ende, esta técnica corresponde al método de interpolación escogido para realizar las interpolaciones en las siguientes etapas. Sin embargo, como en los anteriores casos también IDW presentó errores posiblemente asociados a la baja densidad de puntos de medición a lo largo del dominio, como se había descrito en la metodología, esta técnica para obtener la precipitación en un pixel utiliza el número más cercano de estaciones, entre tanto, al tenerse un número reducido de esta los vacíos espaciales en la red aumentan incrementándose así la posibilidad de generar mayores errores (Ly et al., 2013).

En este sentido, al revisar la literatura citada en el estado del arte fue posible evidenciar que el método de IDW ha obtenido buenos resultados bajo contextos como el área estudiada, por un lado, se tiene la investigación de Cifuentes (2016) donde este método mostró mayor precisión en la predicción de lluvia, con errores menores, en el departamento de Caldas sobre otras técnicas como: *Global Polinomial Interpolation*, Kriging Ordinario y Kriging Universal. Y por el otro, en el estudio de Keblouti, Ouerdachi, & Boutaghane (2012) realizado en Annaba, al este de Argelia, este lugar se caracteriza por poseer una baja densidad de red de pluviómetros, se compararon los métodos de IDW, Spline y Kriging Ordinario para caracterizar la lluvia en dicha ciudad, teniéndose el método de ponderación inversa se posicionó como el método más representativo.

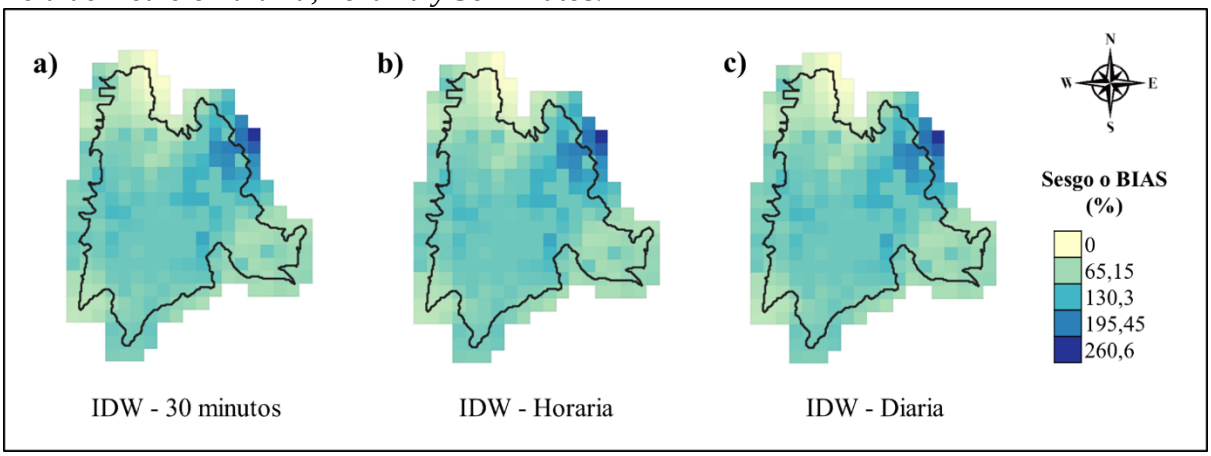
Efecto de la frecuencia temporal de medición en la generación de superficies de lluvia

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las métricas de error generadas a partir de las frecuencias de medición de 30 minutos, una hora y un día, lo anterior, con base a los ráster de cobertura temporal de 30 minutos generados con el método de interpolación IDW en la sección anterior. En este sentido, a pesar de que se quiere conocer el efecto de la frecuencia temporal horaria y diaria en la interpolación, se consideró relevante exhibir los resultados a una frecuencia de medición de 30 minutos, ya que, en el contexto de los OSE's, sería la ejecución de control o referencia y las frecuencias de medición de una hora y un día serían las ejecuciones perturbadas. De esta manera se podría evidenciar un escenario hipotético, donde las estaciones de medición tuvieran una frecuencia de medición como la de IMERG y percibir de una manera más evidente cuál sería el impacto de la variación en la frecuencia de medición en la generación de superficies de lluvia.

Con respecto a la métrica BIAS, como se puede observar en la *Figura 31* tanto el ráster de frecuencia horaria como diaria fueron iguales al de 30 minutos, lo anterior, se corrobora al mirar los histogramas de la *Figura 32* donde los dos casos tienen los mismos registros de frecuencia relativa que el de 30 minutos; esto se debe a la forma en la cual esta métrica calcula el error obtenido y al origen de las superficies.

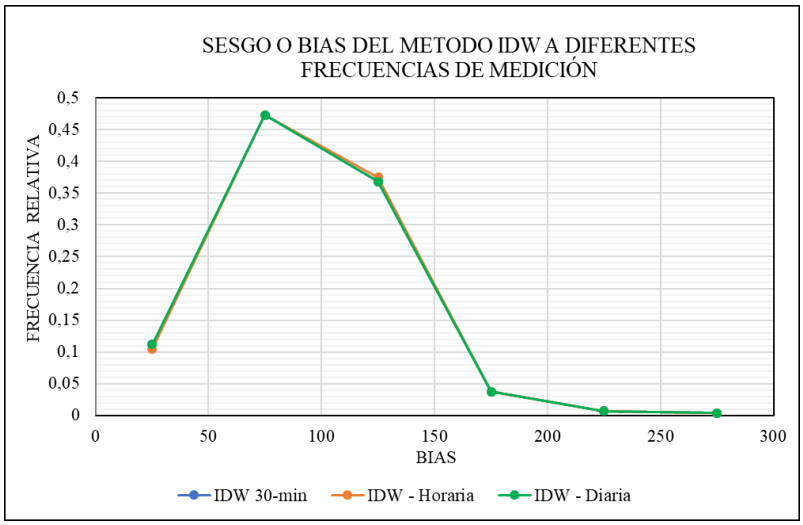
Al observar la ecuación de esta métrica (*Ecuación 4*), se evidencia que el numerador se compone de la sumatoria de las diferencias obtenidas entre las estimaciones de lluvia sintética y de la precipitación del producto satelital, lo cual es equivalente a realizar la sumatoria de cada una y al final de la operación restarlas entre sí. Por lo tanto, dada esta posibilidad y que las superficies sintéticas tanto horarias como diarias fueron generadas a partir de acumulaciones de IMERG, el resultado de esta métrica no va a distinguir la frecuencia de medición y va a brindar como resultado solo las diferencias entre ambas series de datos.

Figura 31. Mapas ráster de la métrica estadística BIAS del método de interpolación IDW, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Histograma de la métrica estadística BIAS, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos.



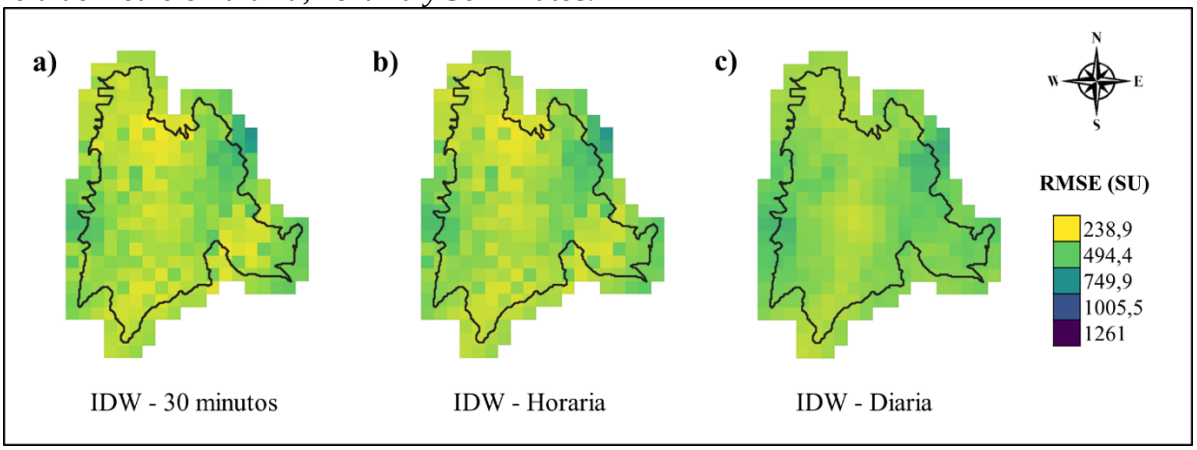
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los resultados obtenidos en la métrica RMSE, al observar la *Figura 33* se puede evidenciar que en el ráster de frecuencia horaria, posee tonalidades que tienden a ser un poco más amarillas (menor error) pero con un mayor contraste entre los pixeles, semejante al de 30 minutos. Por otro lado, el ráster de frecuencia diaria tiene tonalidades más verdes (mayor error), el contraste entre los pixeles es más suave, diferenciándose significativamente del ráster de 30 minutos.

Al contrastar lo anterior con la *Figura 32*, se puede observar que efectivamente el error presentado en los pixeles del ráster horario se aproxima al comportamiento del ráster de 30 minutos, y la mayoría tiene valores de menor error. Asimismo, en cuanto a los pixeles del mapa c), se rectifica lo visto en la figura anterior donde gran parte de los pixeles se encuentran en magnitudes de error mucho más grandes, comparadas con de la frecuencia de medición horaria y de 30 minutos.

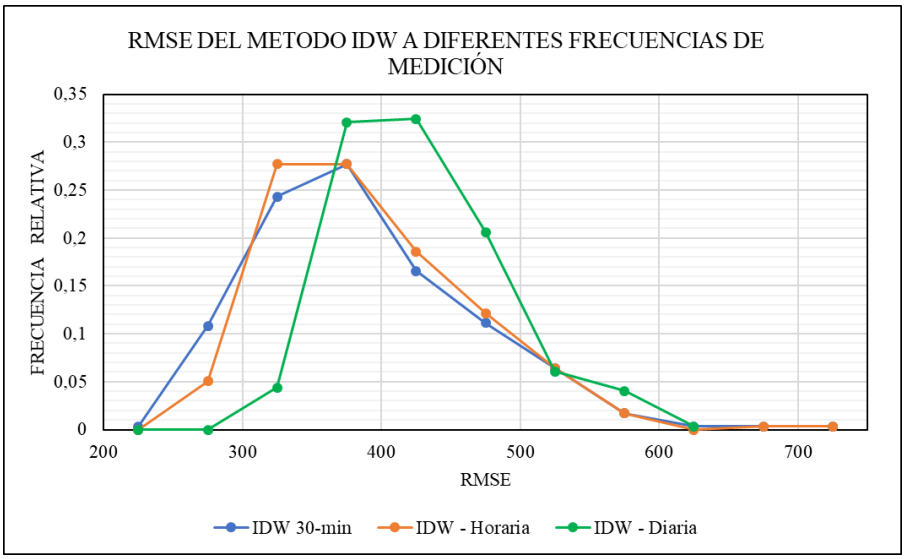
Por lo tanto, en esta métrica a diferencia de la anterior se puede apreciar la magnitud del error que se obtiene en cada frecuencia de medición. Por un lado, al observar el histograma la cobertura temporal horaria se evidencia que esta alcanza a capturar parte de la variabilidad de la intensidad de precipitación que se captaría con una frecuencia de 30 minutos. Y por el otro, al tener un periodo de medición más largo, como es el caso de la diaria, esto provoca un mayor error en el histograma, dado que, no le permite registrar la variabilidad de intensidad que hubo en ese periodo de tiempo, sino solamente el total de lluvia que cayó en un día.

Figura 33. Mapas ráster de la métrica estadística RMSE del método de interpolación IDW, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Histograma de la métrica estadística RMSE, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos.

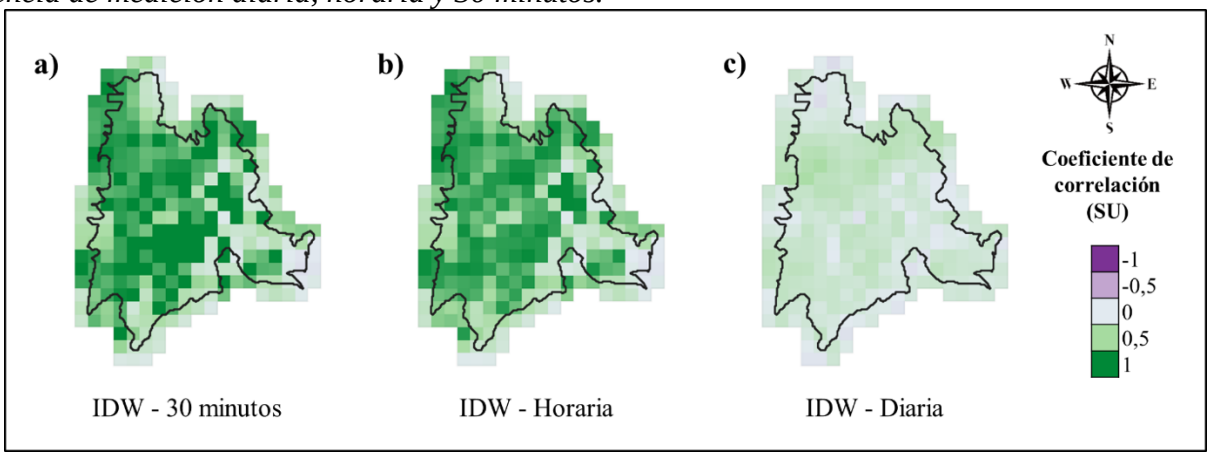


Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se encuentran los resultados de la métrica del coeficiente de correlación, como se observa en la *Figura 35* se nota a simple vista la diferencia entre el ráster de la frecuencia horaria y diaria, presentando esta última temporalidad, colores mucho más claros (tendencia a valores cercanos a cero) que el horario (registros más próximos a uno), el cual se asemeja más al ráster de 30 minutos. Esto se rectifica con la *Figura 36*, donde se evidencia como el diario no tiene una correlación significativa, al notarse en su histograma que sus altas frecuencias se dieron cerca a cero y sus datos no se asemejan al de 30 minutos, como si lo hace el histograma de medición horaria donde tuvo una mayor frecuencia relativa en valores cercanos a uno, indicando una correlación positiva.

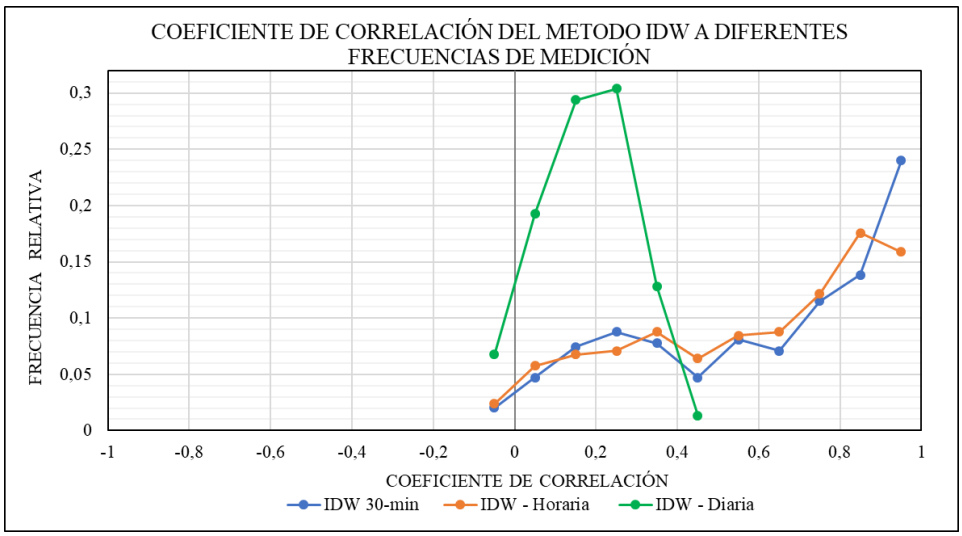
De esta manera, con esta métrica se puede convalidar el comportamiento de los resultados obtenidos con RMSE en los dos escenarios de frecuencias temporales. Como se mencionaba, la diaria al tener un periodo de tiempo más largo no captura la variabilidad de la intensidad de precipitación, lo que hace que no se asemeje a las mediciones de IMERG, generadas cada 30 minutos, en cambio la horaria como solo difiere en media hora a la frecuencia de medición de IMERG si lo alcanza a hacer, haciendo que sus resultados estén muy cercanos a los de 30 minutos.

Figura 35. Mapas ráster de la métrica estadística CC del método de interpolación IDW, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Histograma de la métrica estadística CC, con frecuencia de medición diaria, horaria y 30 minutos.



Fuente: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta que la intensidad de la lluvia y su duración son factores que, además del terreno, influyen en forma directa en la generación de inundaciones (Pardo & Rodríguez, 2014), se evidencia la importancia de la frecuencia de medición, pues como se pudo constatar con los anteriores resultados, de esta depende que las técnicas de estimación de lluvia puedan capturar el comportamiento de estos factores.

Fase 3. Determinación de factores espacio temporales que impactan la cobertura espacial y frecuencia de medición de precipitación en la modelación de inundaciones

Esta sección se divide en dos partes, por un lado, conocer el impacto de la cobertura espacial y frecuencia temporal de medición de precipitaciones de las superficies de lluvia interpoladas en las series de caudal simuladas y por el otro, determinar el impacto de factores espaciales y temporales en dichas simulaciones.

Simulaciones de caudales de eventos de inundación a partir de frecuencias de medición de precipitación diaria y horaria

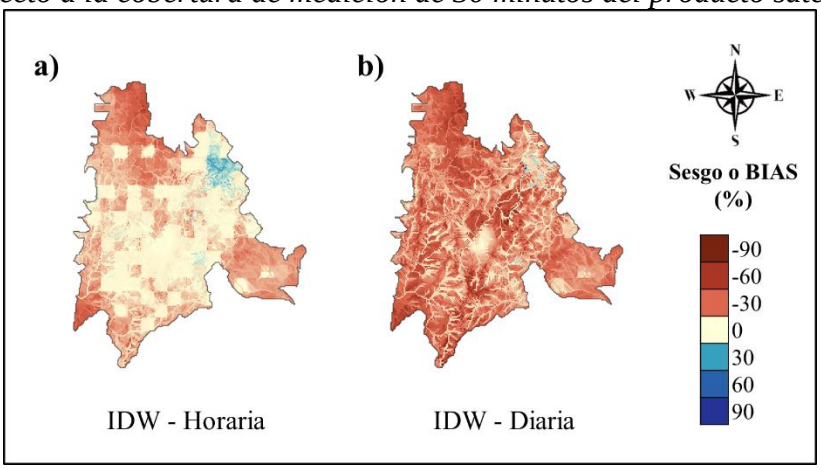
A continuación, se encuentran los resultados del cálculo de las métricas estadísticas BIAS, RMSE y CC, correspondientes a la comparación de las simulaciones de caudal realizadas a partir de la precipitación estimada de los eventos de inundación identificados, con las superficies de lluvia estimadas, a una frecuencia de medición horaria y diaria, por medio del método de IDW con respecto a los registros de lluvia del producto satelital IMERG, generada cada 30 minutos.

Respecto a la métrica BIAS, se observa que ambos ráster de caudales de la *Figura 37* registraron valores de subestimación y sobrestimación, variando significativamente entre las frecuencias de medición. En cuanto al ráster de frecuencia horaria se evidenció la obtención de sobrestimaciones en una pequeña zona al noreste del departamento. Por otro lado, es posible notar la influencia de la distribución espacial de la red sintética de mediciones, donde se obtuvieron caudales con un desfase porcentual nulo; de igual forma, cabe destacar el impacto positivo en los lugares donde existe una buena densidad de medidores de lluvia puesto que se generan caudales con menor sesgo; caso contrario, a las zonas donde no existen pixeles de la red de medición, generándose registros con mayores porcentajes de subestimación.

De otra forma, al estudiar el ráster de caudales de frecuencia diaria se evidencia una mayor generación de error de subestimación en gran parte del dominio, evidenciándose por un lado que la acumulación de datos a esta escala temporal de medición hace que en la parte central del departamento, caracterizada por una buena densidad de pluviómetros, obtenga series de caudal en su gran mayoría de cercanos a cero. Y por el otro, los lugares donde se registraron mayores sobrestimaciones con la cobertura temporal horaria (noreste del mapa a), para este caso se registraron caudales en su gran mayoría subestimados. En este sentido, también se observa como en ambos mapas ráster las corrientes hídricas con alto caudal obtuvieron un menor porcentaje de error, notándose que estas correspondieron a aquellos drenajes que en algún punto de su cauce estuvieron cerca o bajo la influencia de un píxel de la red de estaciones.

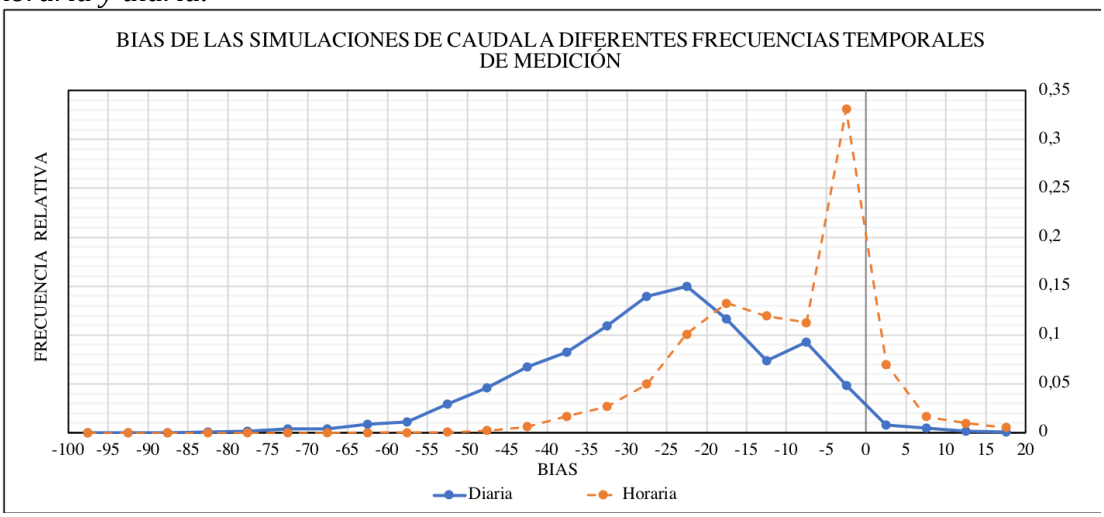
El error obtenido de esta métrica se observa de manera simplificada al ver el histograma de la *Figura 38* donde se evidencia que la mayor parte de los resultados obtenidos con la escala horaria se presentó cerca a cero, sin embargo, se visualiza que gran parte de la muestra de sus registros fueron subestimados. En otro sentido, respecto a la frecuencia diaria la mayor parte de los datos estuvieron subestimados, mucho más lejanos del cero que lo visto en el caso anterior.

Figura 37. Mapas ráster de la métrica BIAS de las simulaciones realizadas con IDW, frecuencia horaria y diaria respecto a la cobertura de medición de 30 minutos del producto satelital IMERG.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Histograma de la métrica BIAS de las simulaciones en comparación con la frecuencia temporal horaria y diaria.

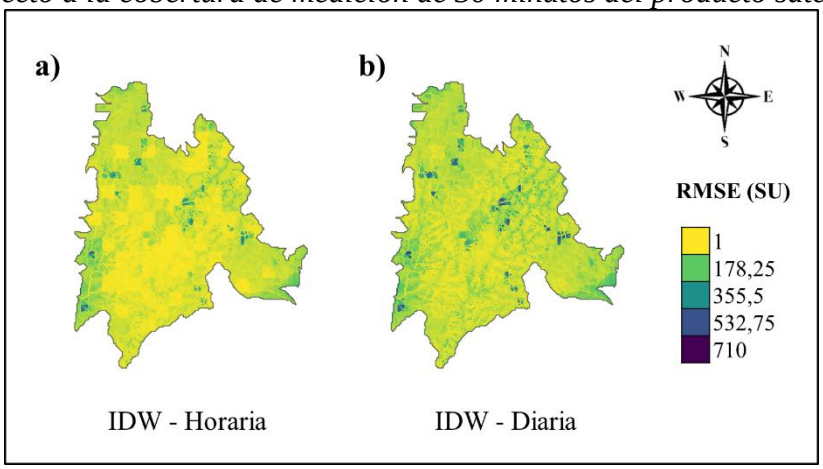


Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la métrica de RMSE, como se evidencia en la *Figura 39*, el ráster de caudales de precipitación horaria (al igual que en el caso de BIAS) obtuvo menores magnitudes de error en la parte central del área estudio, donde hay mayor cobertura de medición de la precipitación de la red, asimismo, es posible visualizar el efecto de los pixeles pertenecientes a dicha red sintética sobre la generación superficies de caudales con un menor error. Caso contrario, a los caudales obtenidos con información de precipitación a escala diaria, donde se hubo un mayor error distribuido sobre todo el dominio. Frente a este panorama, es evidente que la habilidad del modelo hidrológico disminuye a la hora de generar las series de caudal, pues como se mencionó en la fase anterior, los registros diarios de precipitación obtenidos por IDW no logran capturar la variabilidad de la lluvia en el espacio y tiempo en un día, por ende, los caudales generados no obtuvieron un buen rendimiento a la hora de ser estimados.

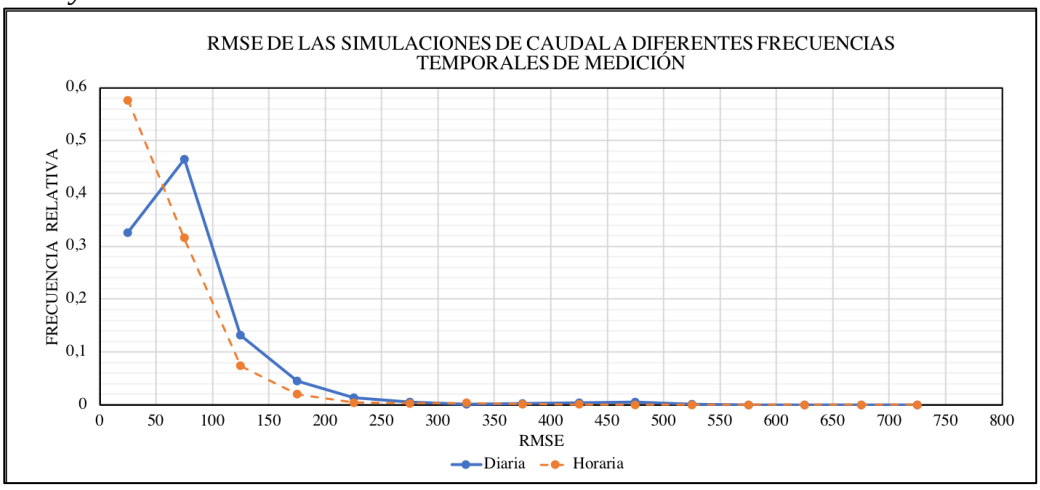
Lo anterior, se rectifica en el histograma de la *Figura 40* donde las magnitudes de error disminuyen en la cobertura temporal horaria, la cual obtuvo su máxima frecuencia relativa entre 0 y 50. En contraste, en la escala temporal diaria, se observa una disminución considerable de los registros, cuyas magnitudes fueron bajas en la frecuencia horaria, distribuyéndose hacia valores más altos de error.

Figura 39. Mapas ráster de la métrica RMSE de las simulaciones realizadas con IDW, frecuencia horaria y diaria respecto a la cobertura de medición de 30 minutos del producto satelital IMERG.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Histograma de la métrica RMSE de las simulaciones en comparación con la frecuencia temporal horaria y diaria.

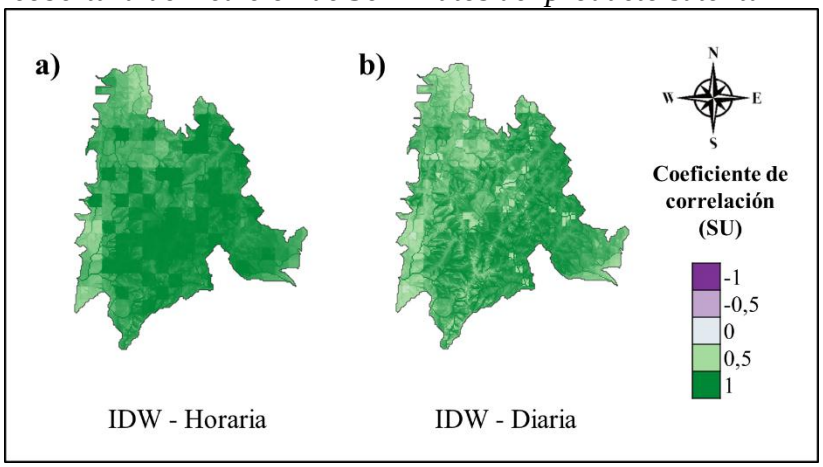


Fuente: Elaboración propia.

En relación con el coeficiente de correlación, al observar la *Figura 40* se evidencia que el ráster de caudales a escala horaria, obtuvo en su gran mayoría una alta relación lineal entre los caudales generados por IMERG y los obtenidos por IDW; notándose, al igual que en la métrica de BIAS y RMSE, un efecto positivo de la alta densidad de estaciones en el centro del departamento y una disminución de la fuerza de correlación en lugares donde hay menor densidad de medidores de precipitación.

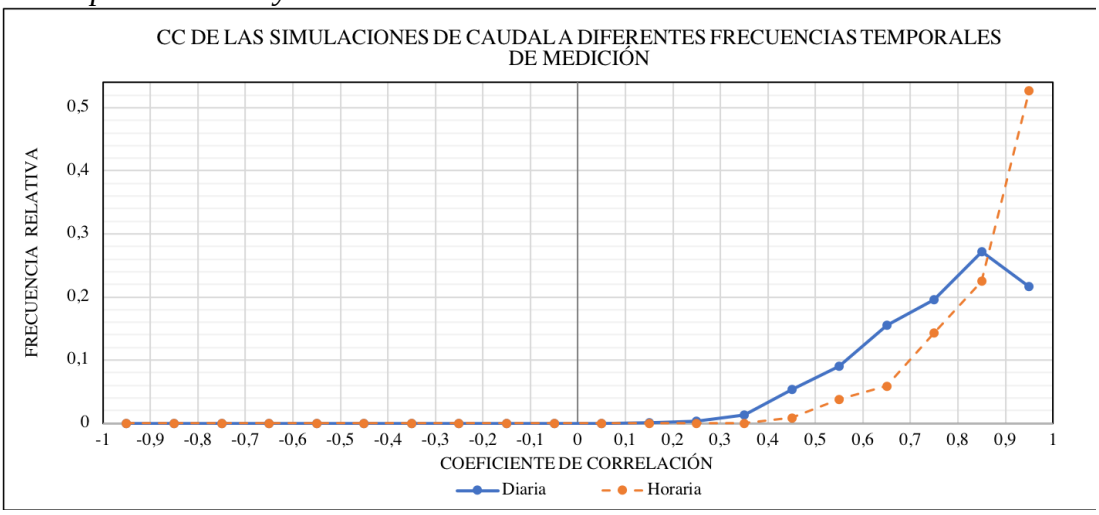
Al visualizar el mapa a de ráster de caudales de la misma *Figura 41*, se visualiza que si bien la fuerza de relación no se pierde en todos los pixeles, es evidente su disminución, sobre todo en los lugares con vacíos de información en amplias áreas. Este contraste entre los caudales generados a diferentes escalas temporales de medición de precipitación se observa en el histograma de la *Figura 42*, donde la frecuencia relativa de los registros de los caudales del mapa b aumentó su concentración hacia valores más bajos de coeficiente de correlación, en comparación con el mapa a cuya frecuencia tiende a aumentar positivamente a 1.

Figura 41. Mapas ráster de la métrica CC de las simulaciones realizadas con IDW, frecuencia horaria y diaria respecto a la cobertura de medición de 30 minutos del producto satelital IMERG.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 42. Histograma de la métrica CC de las simulaciones realizadas con IDW en comparación con la frecuencia temporal horaria y diaria.



Fuente: Elaboración propia.

Factores espaciales y temporales que influencian el impacto de la cobertura espacial y frecuencia de muestreo de precipitación en la modelación de eventos de inundación

A continuación, se analiza el impacto generado por los factores espaciales y temporales en las series de caudales de inundación, generadas a partir de la precipitación interpolada a una frecuencia temporal de muestreo diaria y horaria.

Área de drenaje

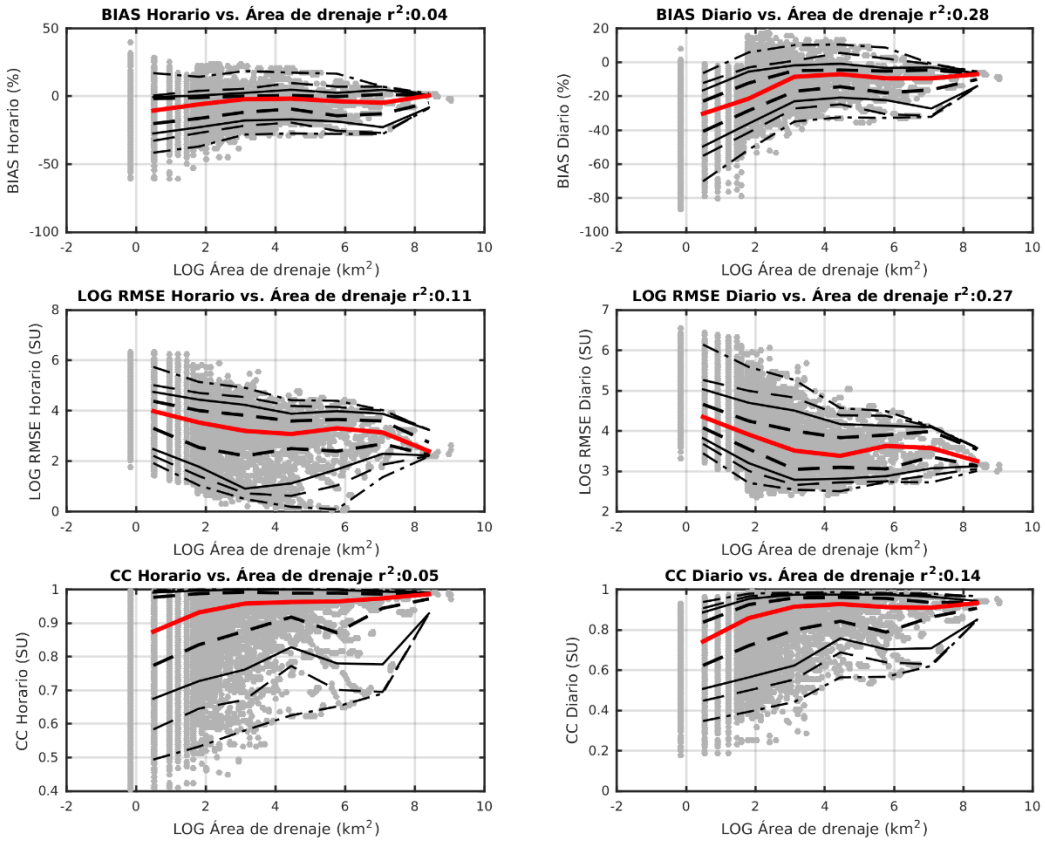
Con respecto a la métrica BIAS, a una frecuencia horaria se puede notar que la subestimación y sobrestimación de los caudales registrados, están en todo el dominio, donde a partir de los cuantiles y la distribución de los puntos, se puede evidenciar que en áreas pequeñas se encuentra la mayor variabilidad (cuantiles separados) en comparación con las áreas más grandes (cuantiles agrupados). De esta manera, la media (cuantil 50) de los datos muestra una tendencia donde a medida que el área aumenta hay un menor sesgo tanto en sentido negativo como positivo. Al comparar esta distribución con la gráfica de frecuencia diaria se observa la misma tendencia, destacando sobre todo una mayor variabilidad en las áreas más pequeñas, teniendo solamente datos subestimados.

En cuanto a la raíz del error cuadrático medio de ambas frecuencias, se observa que la distribución de los datos tiene el mismo comportamiento que en BIAS, presentando también la misma tendencia, a menor área de drenaje mayor es el error.

Respecto al coeficiente de correlación de ambas frecuencias de medición, se nota que mientras mayor sea el área de drenaje, hay una mejor correlación positiva entre los resultados de caudal con simulaciones de lluvia sintética y la lluvia proveniente de IMERG, lo anterior resulta coherente a este tipo de áreas pues como se notó en BIAS y RMSE el error fue menor en comparación con el de áreas pequeñas.

Finalmente, con respecto al coeficiente de determinación, se obtiene que a una frecuencia diaria este factor espacial contribuye en mayor porcentaje a la variabilidad de las métricas estudiadas pues tiene valores de coeficiente mucho mayores a las horarias en todos los casos. En este orden de ideas, en las tres métricas estudiadas en ambas frecuencias de medición, se observa que en áreas de drenaje con mayor tamaño se tiende a generar menor error, mientras que en áreas de drenajes más pequeñas tiende a suceder todo lo contrario. Teniendo en cuenta lo anterior, se encontró que estos concuerdan con el estudio realizado por Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, & Borga (2015), quienes encontraron que en la simulación de caudales la variación del error se ve influenciada por la dependencia de la escala de la cuenca, obteniendo mejores resultados en cuencas con mayor área.

Figura 43. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico área de drenaje.



Fuente: Elaboración propia.

Factor forma

Para un mejor entendimiento de los resultados, es preciso mencionar que aquellas áreas de drenaje cuyos valores de factor forma son mayores a uno, indican que esta tiende a ser redonda, y menores a uno - mínimo cero, son alargadas. En este sentido, a los valores de factor forma de la *Figura 44* fue necesario aplicarles logaritmo, esto con el fin de observar una mejor distribución de los registros; para tal efecto es necesario considerar que los datos más cercanos a cero tienen un área de drenaje de forma redonda, en caso contrario, estos corresponden a formas alargadas.

En cuanto a las gráficas de BIAS de ambas frecuencias de medición, se puede evidenciar con el cuantil medio, que tanto la frecuencia de medición diaria como horaria a medida que se tiene una forma más alargada hay menor sesgo, siendo lo contrario cuando la forma del área de drenaje tiende a ser redonda, pues se registra una mayor variabilidad de error tanto sobrestimado como subestimado.

Al analizar las gráficas de la raíz del error cuadrático medio, se encuentra la misma tendencia anterior, donde a medida que el terreno presenta una forma del área de drenaje alargada se registra un menor error que con una forma redonda donde hay más variabilidad de este.

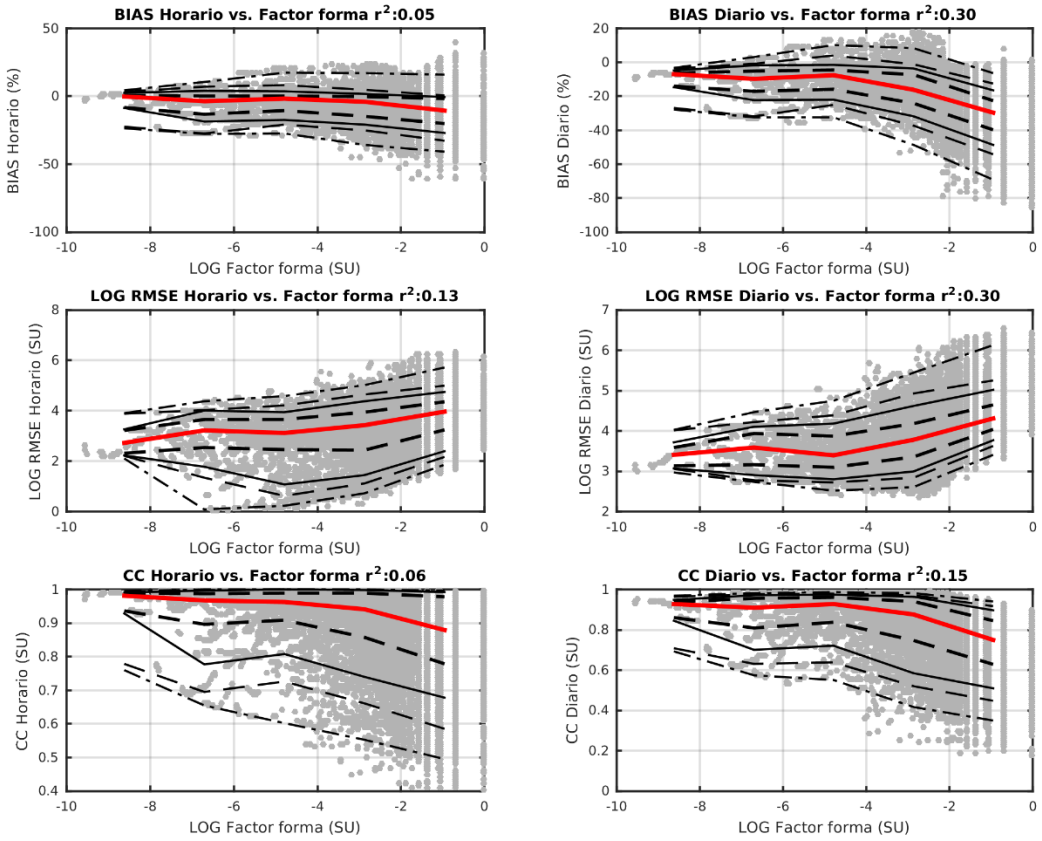
Con respecto al coeficiente de correlación, en ambas frecuencias temporales hay una tendencia donde a medida que el terreno tiene una forma de drenaje más alargada, los valores de caudal obtenidos con ambas fuentes de datos de lluvia tienden a obtener resultados de simulación muy parecidos, caso contrario en terrenos con una forma circular.

Al observar el coeficiente de determinación, de igual forma que en el área de drenaje, se identifica que la frecuencia diaria comparada con la horaria tiene un mayor porcentaje de influencia en la variabilidad de los resultados obtenidos en las tres métricas.

Con base en lo anterior, se puede determinar que a medida que el terreno presenta un área de drenaje con tendencia a ser alargada, las simulaciones presentan menor error, puesto que como se observó en las gráficas de coeficiente de correlación, en estas regiones los datos de caudal son muy parecidos a los generados por el producto satelital IMERG. En cambio, en regiones donde se presentan áreas de drenaje más circulares hay mayor error, donde puede ser subestimado o sobrestimado. Asimismo, como se pudo evidenciar en el factor de área de drenajes, la frecuencia de medición diaria en este factor también tiene un mayor efecto en los resultados de las métricas.

En este sentido, teniendo en cuenta que una de las características particulares del factor forma corresponde a la influencia en el comportamiento de la escorrentía del agua, donde a medida que el terreno tiene una forma de drenaje más alargada los picos de crecidas son paulatinos, y por ende, hay un mayor amortiguamiento a crecientes. En cambio cuando hay una tendencia a poseer formas redondas, los picos de crecidas son súbitos haciendo que el amortiguamiento a crecientes sea bajo (Londoño, 2001; Reyes et al., 2010). De esta manera, al relacionar estas características con los resultados obtenidos, resulta de interés destacar que el mayor error correspondió a terrenos donde hay una mayor tendencia a generarse inundaciones.

Figura 44. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico factor forma.



Fuente: Elaboración propia.

Pendiente media del cauce principal

Teniendo en cuenta la *Figura 45*, al estudiar lo obtenido en la métrica BIAS en la escala temporal horaria, se observa una menor muestra de registros de cauces con pendiente baja respecto a los de alta. Al estudiar la media, esta se ubica en todo el dominio de errores subestimados, notándose una tendencia de disminución del error de subestimación a medida que la pendiente del cauce es mayor, llegando a estabilizarse sobre valores muy cercanos a cero, de igual forma, en este punto se aprecia una variación del error tanto de subestimación como sobrestimación. Por otro lado, en cuanto al BIAS registrado en la frecuencia diaria, se visualiza el mismo comportamiento de la mediana que en la frecuencia horaria, sin embargo, tanto en los lugares de pendiente baja como alta, el sesgo en el cual se distribuye el cuantil 50 es mayor, alejándose del 0% de error.

En cuanto a la métrica de error RMSE, en la gráfica de frecuencia horaria por medio de la media es posible ver como la magnitud de error tiende a darse en los cauces de pendiente baja, siendo coherente este resultado con lo reportado en BIAS, disminuyendo así el grado de incertidumbre al incrementarse

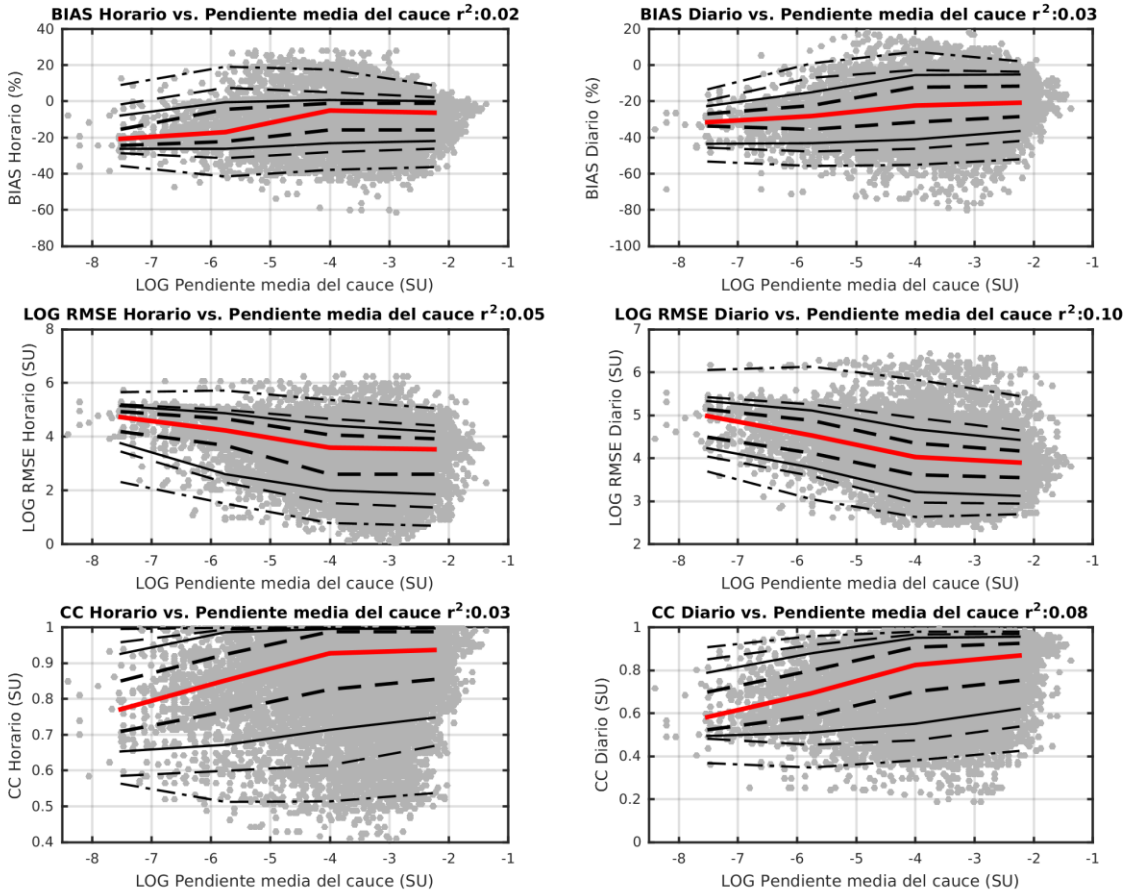
la pendiente del cauce. De esta manera, al observar el comportamiento de la media en la frecuencia diaria no se observan diferencias notables en la magnitud del error de la anterior frecuencia temporal, sin embargo, al analizar la dispersión de registros en los cuantiles que representan la muestra con menores errores se observa que estos tienen una magnitud de incertidumbre más alta que los registrados en la frecuencia horaria, los cuales se acercan a cero.

Respecto al coeficiente de correlación, de la gráfica de escala horaria, se observa como a media que los caudales simulados en cauces caracterizados por tener una menor pendiente, tienen una menor correlación por efecto de una mayor cantidad de errores. En cambio, al tenerse pendientes mucho más pronunciadas los resultados tienen un mejor coeficiente de correlación. Asimismo, en la escala temporal diaria los registros compartieron la misma tendencia de la gráfica horaria, sin embargo, los coeficientes de correlación obtenidos presentan una menor relación lineal tanto en cauces de pendiente baja como en alta.

Por otra parte, los coeficientes de determinación que tuvieron un mayor poder explicativo de la varianza de error obtenido en la simulación de los caudales de eventos de inundación con IDW fue en la escala diaria, sin embargo, la diferencia entre los valores obtenidos con respecto a la horaria, no son distantes entre sí como se ha observado en otros factores. Adicionalmente, cabe destacar que los resultados de estos coeficientes no son lo suficientemente altos, lo cual permite inferir que posiblemente la incidencia de este factor en ambas frecuencias no fue lo fue suficientemente significativo.

Teniendo en cuenta los anteriores resultados, como se observó la mayor parte de los errores de caudales se dieron en pendientes bajas, en su gran mayoría subestimando las series de caudal de los eventos de inundación. Si bien, como menciona Lux (2016) en este tipo de lugares existe una baja tendencia a la generación de crecientes en periodos de tiempo relativamente cortos; contrario a los lugares con pendientes altas, es preciso considerar la presencia de otros factores, como por ejemplo la densidad de drenaje, la cual cuando es baja hace que la velocidad de respuesta del cauce a altas precipitaciones sea lenta (Londoño, 2001), este tipo de factores pueden hacer que lugares con baja pendiente sean más susceptibles a inundaciones, las cuales por el error generado en la simulación hidrológica sus series de caudales resultan menos confiables a la hora de la toma de decisiones.

Figura 45. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación, generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico pendiente media del cauce principal.



Fuente: Elaboración propia.

Precipitación climatológica media

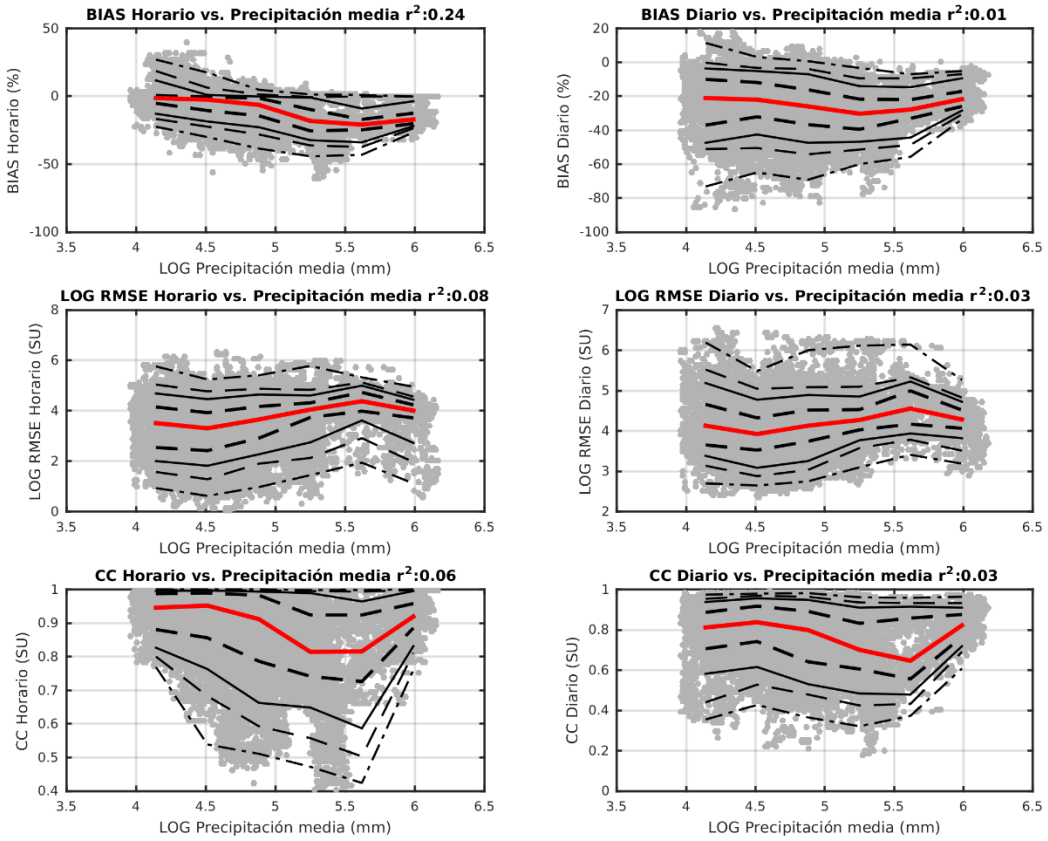
Respecto a este factor geofísico, al observar la *Figura 46* se aprecia que la métrica BIAS a escala horaria, en regiones de baja precipitación obtuvo registros de error de subestimaciones y sobrestimaciones de caudales, sin embargo, al ver la media se evidencia que esta se mantiene constante en valores de 0% de sesgo, caso contrario, en aquellas zonas con mayores precipitaciones donde obtuvieron un aumento de los errores de subestimaciones de caudal; notándose un desplazamiento de la media hacia porcentajes negativos. Por otro lado, al analizar los resultados de frecuencia diaria, la mediana se ubicó en todo su dominio sobre valores de subestimación, los cuales se dieron con mayor frecuencia sobre zonas con baja precipitación; su comportamiento en gran medida fue similar al de la gráfica anterior, no obstante, dicha tendencia cambió en un punto donde comienza a tener menos error en lugares con una precipitación más alta.

En cuanto a RMSE, se evidencia en la gráfica de frecuencia horaria, que tanto en zonas con baja como alta lluvia la dispersión de datos de error es significativa para ambos contextos. Al estudiar la media se observa que el error tiende a aumentar a medida que las zonas se caracterizan por una alta precipitación, sin embargo, se visualiza un cambio negativo en su pendiente al igual que en BIAS a frecuencia diaria, registrando menores magnitudes de error en zonas con alta lluvia. Por otro lado, al observar las magnitudes de error correspondientes a la escala temporal diaria, también se aprecia una alta varianza de los registros a lo largo del eje x. Respecto al comportamiento de la mediana, esta visualmente tuvo un comportamiento similar a la gráfica horaria, coincidiendo nuevamente con el cambio de pendiente negativa descrito en la gráfica de BIAS; sin embargo, como era de esperarse la magnitud de error a esta escala temporal fue mayor.

Finalmente, en cuanto al coeficiente de correlación, al analizar la gráfica a escala horaria se ve que al generarse menores errores en lugares caracterizados por una baja precipitación, la relación lineal entre los caudales generados por IDW, respecto a IMERG son más cercanos a uno, contrario a lo observado en zonas más lluviosas donde la varianza de los datos aumenta hacia valores con menores coeficientes. En otro sentido, al observar la gráfica de frecuencia diaria hay una mayor variabilidad de coeficientes sobre las zonas con poca precipitación, obteniéndose desde relaciones muy cercanas a uno como asociaciones lineales débiles, las cuales tienden a seguir disminuyendo a medida que la zona tiene mayores precipitaciones. Como era de esperar, en esta métrica tanto la gráfica diaria como la horaria tuvieron el cambio de sentido de la tendencia descrita anteriormente, pues como se evidenció, en este punto se empezaron a registrar menores errores en lugares caracterizados por altas precipitaciones, por ende, los coeficientes nuevamente empezaron a tener una mejor relación lineal.

En relación con los coeficientes de determinación obtenidos por las tres métricas, en los dos tipos de frecuencias temporales, se evidencia que en la escala horaria este factor obtuvo una mayor relación explicativa de la varianza del error obtenido (sobre todo en BIAS), mientras que en la diaria el coeficiente fue mucho menor. Adicionalmente, cabe mencionar el cambio negativo de pendiente evidenciado, principalmente en la media, y en algunos cuantiles de las diferentes métricas en ambas escalas temporales, lo cual pudo haberse dado por la incidencia de otro tipo de factores en ese conjunto de datos, que hicieron que el error en lugares con altas precipitaciones empezara a disminuir, lo anterior, teniendo en cuenta lo que sugiere Mei, Nikolopoulos, Anagnostou, Zoccatelli, & Borga (2016) donde mencionan que el rendimiento de las simulación de las series de caudales depende de la interacción de otros factores como las condiciones de la cuenca, tipos de lluvia (magnitudes, patrón de espacio-tiempo).

Figura 46. Gráficas de dispersión de los resultados de las métricas BIAS, RMSE y CC de las series de caudales de eventos de inundación, generadas a partir lluvia estimada a escala horaria y diaria, respecto al factor geofísico precipitación media.



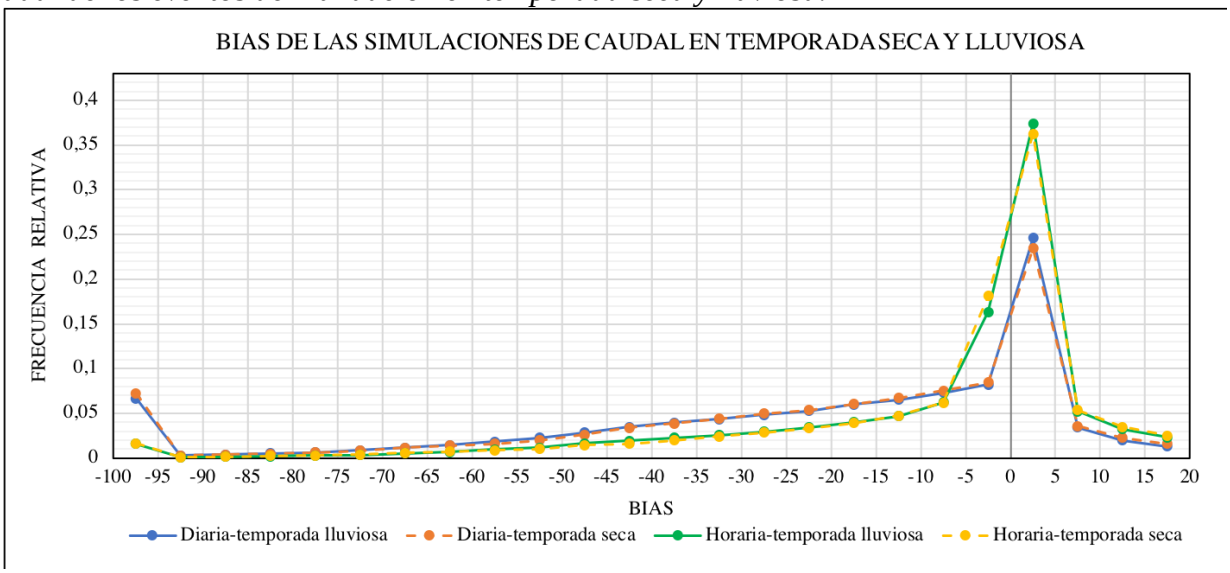
Fuente: Elaboración propia.

Estacionalidad: temporada seca y lluviosa

A continuación, se presentan los resultados de temporalidad obtenidos, donde se exponen las métricas de error de BIAS, RMSE y Coeficiente de Correlación generadas para todos los eventos correspondientes a la temporada lluviosa y seca. Cada uno de los histogramas presentados a continuación, compara la frecuencia relativa de las mismas escalas de medición a diferente temporada (seca y lluviosa).

Con respecto a la métrica de BIAS, como se observa en la *Figura 47* los eventos ocurridos tanto en la temporada seca como lluviosa responden de igual manera a la frecuencia de medición correspondiente (diaria u horaria), pues solo se distingue la diferencia de magnitudes de error entre estas frecuencias. De esta manera, se observa que tanto en la frecuencia diaria como horaria hay una leve tendencia a grandes magnitudes de error subestimado, sin embargo, la mayor frecuencia relativa se da para ambos casos en valores parcialmente sobrestimados (dentro del rango de cero a cinco) donde se observa que la frecuencia de medición horaria excede en este punto a la diaria.

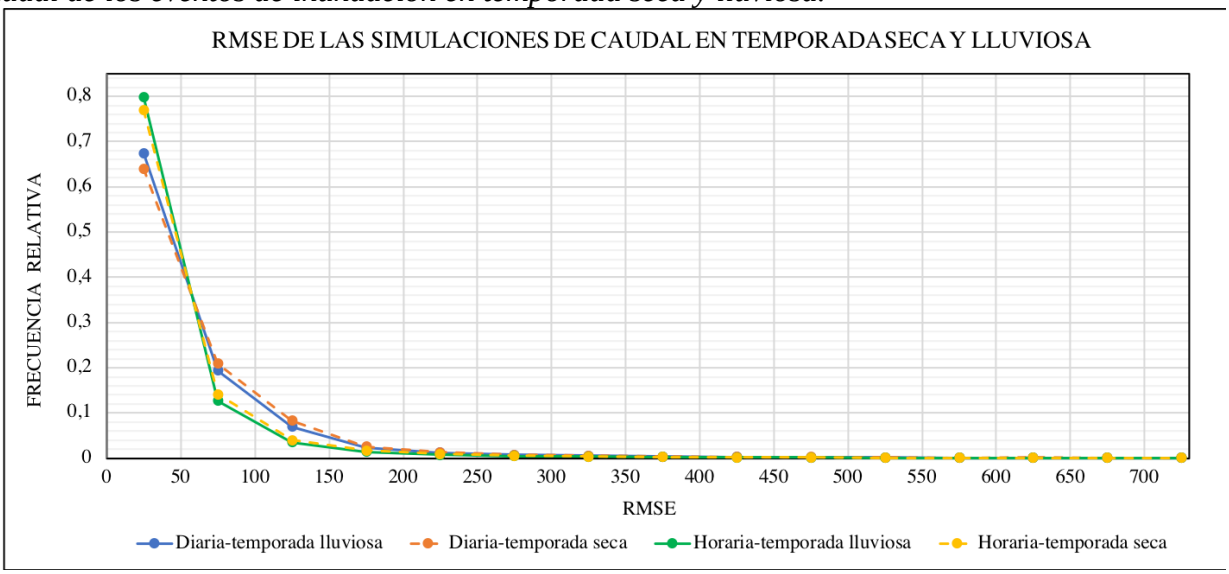
Figura 47. Histograma del error, calculado por medio de la métrica BIAS, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al RMSE (ver *Figura 48*) sucede lo mismo que en la anterior métrica, donde solo se distingue la diferencia entre las escalas de medición, evidenciándose que hubo una mayor frecuencia relativa para ambos casos dentro del rango de error entre cero y 50, donde la medición horaria sobrepasa nuevamente a la diaria. En adición a lo anterior, se puede observar que hubo eventos que tuvieron un error con magnitudes muy grandes y que nuevamente los eventos ocurridos en temporada lluviosa tienen una frecuencia relativa mayor que los de temporada seca, sin embargo, esta diferencia no es tan significativa.

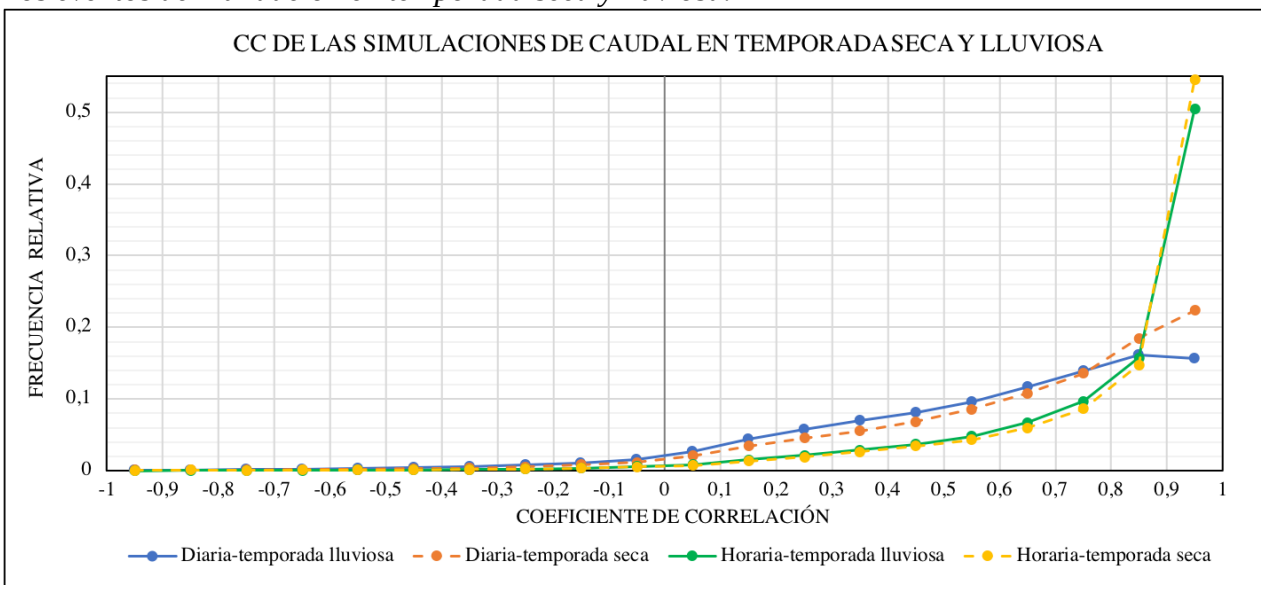
Figura 48. Histograma del error, calculado por medio de la métrica RMSE, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa.



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de correlación (*Figura 49*) se evidencia que todos los eventos registrados, en la frecuencia horaria la mayoría tuvieron valores de correlación entre el rango de 0,9 y 1, destacándose que el mayor número de eventos ocurrió en temporada seca. Por otro lado, en cuanto a la frecuencia de medición diaria los valores de correlación de los eventos estuvieron manera menos drástica que en la horaria, donde se tuvieron valores dentro del rango de 0,9 a 1 pero fue una menor cantidad de eventos comparados con los que se registraron a una frecuencia horaria, de igual forma hubo mayor número de eventos que dentro de ese rango ocurrieron en la temporada seca.

Figura 49. Histograma del error, calculado por medio de la métrica CC, de las simulaciones de caudal de los eventos de inundación en temporada seca y lluviosa.



Fuente: Elaboración propia.

En general, como se observó en los diferentes histogramas, no fue posible apreciar diferencias significativas entre los errores obtenidos de las simulaciones de caudal realizadas en época lluviosa o seca, a la misma frecuencia de medición de precipitación. Teniendo en cuenta esto, no pudo evidenciarse la incidencia de este factor en la variación del error obtenido a la hora de realizar simulaciones de eventos de inundación.

14. Conclusiones

El objetivo del presente proyecto fue caracterizar el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de muestreo de estimaciones satelitales de precipitación, en contraste con la de redes pluviométricas durante la modelación de inundaciones, para así describir los factores espaciales y temporales asociados al mismo en Cundinamarca, Colombia. De esta manera, para su cumplimiento, la metodología fue diseñada de tal forma que se pudiera responder a cada objetivo específico y en consecuencia al general, por lo tanto, se establecieron tres fases correspondientes a cada objetivo, donde el resultado de cada una fue insumo de la siguiente. En este sentido, cabe resaltar la utilidad de la metodología de los OSE's, la cual permitió aislar el error de otras fuentes de información, permitiendo centrar el estudio solamente en el impacto de la cobertura espacial y temporal de las mediciones de precipitaciones en la modelación de inundaciones, y los factores que contribuyen a la variación de dichos errores.

En relación con el primer objetivo específico, se identificaron eventos de inundación que exhibieron diferentes características espaciales y temporales con simulaciones hidrológicas de precipitación satelital, por medio del producto 3B42 de la misión TRMM en el periodo de 2014 -2018, identificándose 92 eventos de inundación en todo el dominio, los cuales se registraron en todos los meses del año, tanto en época lluviosa como de bajas lluvias. En general, los eventos de inundación presentaron diferentes características espaciales y temporales. En relación con sus intensidades, se tuvieron eventos con periodos de retorno que iban desde 2 años hasta 65. Respecto a su duración, se obtuvieron eventos que iban desde una escala menor a un día hasta aquellos que registraron 11 días de actividad hidrometeorológica. En cuanto a las extensiones, estas variaron encontrándose eventos ocurridos en pequeñas áreas como distribuidos en gran parte del dominio. Adicionalmente, con el propósito de caracterizar los lugares donde se dieron los eventos con mayores intensidades, llamó la atención que la ciudad de Bogotá, correspondió a uno de los lugares donde se registraron parte de los eventos más severos. Finalmente, teniendo en cuenta los diferentes factores como intensidad de lluvia, tiempos de duración y área de la tormenta se escogieron tres eventos para evidenciar como estos factores se expresan de manera diferente en los eventos de inundación.

Con respecto al segundo objetivo, se generaron superficies de lluvia que se aproximaran a la variabilidad espacial y temporal capturada por la red pluviométrica de Cundinamarca, con base en mediciones satelitales de precipitación; para tal efecto, se escogieron tres métodos de interpolación: Polígonos de Thiessen, IDW y Kriging Ordinario, y a partir de las superficies de precipitación de IMERG, se generaron acumulaciones dada una frecuencia de medición de una hora y un día, para luego con base en esta información, realizar las interpolaciones para cada escala de muestreo de lluvia. Esto se realizó usando las fechas de los eventos identificados anteriormente. De esta manera por medio de métricas estadísticas se analizó cuál de los métodos tenía una mejor representación de la variabilidad espacial de la red pluviométrica departamental, y por otro lado se observó la variabilidad temporal sobre las superficies del método escogido.

Como principales resultados, se pudo evidenciar que los tres métodos generaron superficies sobreestimadas a lo largo de todo el dominio, pero el que tuvo menor incertidumbre fue el método de IDW, pues, a pesar de que no tuvo un error muy cercano a cero fue el que mejor se aproximó a la estimación de lluvia generada por IMERG, dados estos resultados este fue el método que se escogió para generar las superficies del siguiente objetivo. Finalmente, en esta parte del análisis se pudo evidenciar que independientemente del método de interpolación, las tres técnicas se vieron

influenciadas por los vacíos espaciales obtenidos en sectores del dominio donde había una densidad más baja. En cuanto a la variabilidad temporal se pudo evidenciar que la frecuencia de una hora, con respecto a la diaria, se acercó más a las superficies generadas por IMERG, ya que alcanzaba a capturar parte de la variabilidad de la intensidad de precipitación que es registrada a una frecuencia de 30 minutos, en cambio, a una frecuencia diaria se omitió parte del comportamiento de la precipitación en ese rango de tiempo, ocasionando que no se capturara información sobre la variabilidad de lluvia.

En cuanto al tercer y último objetivo, se determinaron los factores espaciales y temporales que influyen en el impacto de la cobertura espacial y la frecuencia de medición de precipitación en la simulación de inundaciones, para esto se establecieron dos etapas, en la primera de ellas se modelaron los eventos identificados, por un lado, con las superficies de lluvia interpoladas con el método IDW, a una frecuencia de medición horaria y diaria, y por el otro, con las superficies del producto de precipitación satelital IMERG, a una frecuencia de 30 minutos. A partir de esto, se calcularon las métricas BIAS, RMSE y CC, obteniéndose como resultado mapas ráster e histogramas, mediante los cuales fue posible identificar que las simulaciones de caudal de los eventos de inundación obtuvieron mejores resultados con la precipitación estimada a una menor frecuencia de medición (horaria), observándose especialmente en esta escala temporal, la influencia positiva de la presencia de estaciones de la red sintética; pues como se evidenció a lo largo de los mapas obtenidos para cada una de las tres métricas, los lugares donde menor error y mayor relación de linealidad hubo con los caudales de referencia de la capa de IMERG, correspondieron a aquellas zonas del territorio caracterizadas por una alta densidad de estaciones o por la presencia de al menos un punto de medición. En este orden de ideas, también fue posible identificar el efecto negativo al aumentarse la escala temporal de medición de la precipitación, pues como se demostró, a lo largo del dominio la frecuencia de error en las series de caudal simuladas tiende a aumentar.

Respecto a la segunda fase, se propuso determinar el impacto generado por los factores espaciales y temporales en las series de caudales de inundación. Para lograrlo se construyeron gráficas de dispersión de sesgo, magnitud de error y coeficiente de correlación, obtenido en la anterior fase por el método de IDW en ambas frecuencias de medición, el cual fue comparado con un determinado factores espacial y temporal. Como principales resultados se encontró que el error en áreas de drenaje pequeñas se presenta mucho más que en áreas de drenaje grande. En relación con el factor forma se encontró que áreas de drenaje con formas redondas - circulares el error de la simulación se expresa con mayor magnitud, disminuyendo a medida que estas áreas tienen una forma alargada. Respecto al factor de pendientes de drenaje principal, se observó que en corrientes hídricas con baja pendiente el error tiende a aumentar mientras que altas este tiende a disminuir. Por otra parte, en cuanto a la precipitación climatológica, aquellas zonas caracterizadas por ser altamente lluviosas presentaron la mayor cantidad de errores de estimación de caudal, caso contrario a las de bajas lluvias, en las cuales el error fue menor. Por otro lado, el factor de la temporalidad no fue posible relacionarlo entre el error generado y la época (lluviosa o seca) en la cual se realicen la simulación de los eventos de inundación. Por último, como se observó los coeficientes de determinación lograron explicar en la mayoría de los casos solo un pequeño porcentaje de la varianza del error obtenido de los caudales simulados, lo anterior, debido a que hay que tener en cuenta que se realizó un análisis unidimensional de la influencia de cada uno de estos factores sobre los errores encontrados en la modelación, y no un análisis multidimensional, donde se tengan en cuenta la confluencia de diferentes factores en un mismo escenario para explicar mejor el error obtenido.

Finalmente, desde el ámbito profesional, para abordar y dar solución a esta investigación se requirió la aplicación de un conocimiento interdisciplinar, poniéndose en práctica algunas de las áreas de estudio de la ingeniería ambiental, como lo es la hidrología, meteorología, SIG y modelamiento hidrológico. Por otro lado, al realizar este trabajo fue posible notar los grandes retos del país frente a los estudios meteorológicos y la gestión del riesgo, poniendo en evidencia la necesidad de continuar con este tipo de estudios que contribuyan a dichos ámbitos.

15. Recomendaciones

Con la realización del presente trabajo de investigación, se espera que los resultados obtenidos puedan ser utilizados bien sea por instituciones académicas para el desarrollo de otras investigaciones, o tenidos en cuenta por tomadores de decisión en la gestión del riesgo de inundaciones. Lo anterior, con el fin de que desastres como las inundaciones puedan ser caracterizados eficientemente y por ende se pueda obtener información más confiable, con lo cual se puedan generar procesos de planificación que contribuyan a la minimización de pérdidas sociales, ecológicas o económicas.

Teniendo en cuenta que Colombia basa la mayor parte de sus registros de precipitación en aquellos obtenidos por estaciones pluviométricas, en su gran mayoría dispersas y a una escala de medición diaria. Con los resultados de este estudio, se pone en evidencia ante las autoridades o instituciones competentes la importancia de contar con instrumentos de medición de precipitación que cuenten con una buena cobertura espacial y una frecuencia de medición continua, pues dicha información al ser utilizada en campos como la modelación de inundaciones es susceptible a una mayor generación de error, dependiendo de las condiciones del lugar donde se generen el error puede aumentar, entorpeciendo así la toma de decisiones en campos como la gestión del riesgo.

16. Referencias Bibliográficas

Acosta, M. A. (2013). Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T) para la Reducción del Riesgo de Inundaciones Súbitas y Fenómenos Atmosféricos en el Área Metropolitana de Barranquilla. *Scientia et technica*, *18*(2), 303-308. https://doi.org/10.22517/23447214.8661

Agencia de Noticias UN. (2018, abril 12). *La NASA y la U.N. evaluarán medición de lluvias tropicales*. Recuperado de https://minas.medellin.unal.edu.co/departamentos/geocienciasymedioambiente/9-noticias/81-la-nasa-y-la-u-n-evaluaran-medicion-de-lluvias-tropicales.html

Alfonso, A., & Schnabel, S. (2017). Variación espacial de las precipitaciones en una pequeña cuenca hidrográfica del suroeste de España. *Geographicalia*, *69*, 27-34. https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2017692319

Aparicio, F. (1992). *Fundamentos de Hidrología de Superficie* (Primera). Recuperado de http://www.utsvirtual.edu.co/sitio/blogsuts/recuragua/files/2013/10/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf

Arnold, C. P., & Dey, C. H. (1986). Observing-Systems Simulation Experiments: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *67*(6), 687-695. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1986)067<0687:OSSEPP>2.0.CO;2

Bedient, P. B., Huber, W. C., & Vieux, B. E. (2013). *Hydrology and floodplain analysis* (5th ed). New Jersey: Pearson.

Cabrera, E. B. (2016). *Evaluación de imágenes satelitales de precipitaciones GPM (Global Precipitation Measurement) a escala mensual para el Azuay* (Trabajo de grado, Universidad de Cuenca). Recuperado de http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/24213/1/TESIS.pdf

Cabrera, J. (2017). *Calibración de modelos hidrológicos*. Recuperado de http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf

Caicedo, E. F., & Lopez, J. A. (2017). *Una aproximación práctica a las redes neuronales*. Recuperado de http://revistas.univalle.edu.co/omp/index.php/programaeditorial/catalog/view/64/28/298-1

Caicedo, F. M. (2008). *Asimilación de precipitación estimada por imágenes de satélite en modelos hidrológicos aglutinados y distribuidos, caso de estudio afluencias al embalse de Betania (Huila, Colombia)*. Recuperado de http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/3807

CAR. (2011). *Diagnóstico subcuenca Río Alto Negro*. Recuperado de http://web2.car.gov.co/index.php?idcategoria=3083

CAR. (2012). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca del río Blanco—Negro—Guayuriba*. Recuperado de https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac68b1887de3.pdf

CAR. (2013). *Diagnóstico y evaluación socioambiental de la cuenca del río Minero*. Recuperado de https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac68827d78f8.pdf

CAR. (2014). *Diagnostico Subcuenca Rio Alto Sumapaz*. Recuperado de http://web2.car.gov.co/index.php?idcategoria=43478

Cecinati, F., Moreno, A., Rico, M., Veldhuis, M., & Langeveld, J. (2018). Considering Rain Gauge Uncertainty Using Kriging for Uncertain Data. *Atmosphere*, *9*(449), 1-17. https://doi.org/10.3390/atmos9110446

Celis, J. A. (2017). *Evaluación del nivel de mejora en el monitoreo de sequías a escala regional en Colombia, a partir del uso integrado de indicadores ecohidrológicos basados en teledetección* (Tesis de pregrado). Universidad El Bosque, Bogotá D.C.

Chow, V. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.

Cifuentes, A. (2016). *Evaluación de diferentes métodos de interpolación para la variable precipitación en el departamento de Caldas—Colombia* (Tesis de grado, Universidad de Manizales). Recuperado de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/jspui/bitstream/6789/2652/2/17_Cifuentes_Adriana_2016r.pdf

Clark, R. A., Flamig, Z. L., Vergara, H., Hong, Y., Gourley, J. J., Mandl, D. J., … Patterson, M. (2016). Hydrological Modeling and Capacity Building in the Republic of Namibia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(8), 1697-1715. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00130.1

Corporación Autónoma Regional. (2005). *Elaboración de los estudios de diagnóstico, propectiva y formulación para la cuenca hidrográfica de los ríos Ubate y Suárez (departamento de Cundinamarca)*. Recuperado de https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac693c13ebab.pdf

Cosby, B., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., & Ginn, T. R. (1984). *A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils*. *20*, 682-690. https://doi.org/10.1029/wr020i006p00682

Cruz, A. F., & Barrios, M. I. (2018). Estimación de datos faltantes de lluvia mensual a través de la asimilación de información satelital y pluviométrica en una cuenca andina tropical. *Idesia (Arica)*, *36*(3), 107-117. https://doi.org/10.4067/S0718-34292018005001601

DANE. (2009). *Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005—2020*. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepobla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf

De Miguel, Á., Lado, J., Martinez, V., Leal, M., & García, R. (2009). El ciclo hidrológico: Experiencias prácticas para su comprensión. *Enseñanza de las ciencias de la tierra: Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, ISSN 1132-9157, Vol. 17, Nº. 1, 2009, pags. 78-85*, *17*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/47559354_El_ciclo_hidrologico_experiencias_practicas_para_su_comprension

Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Índice Municipal de Riesgo de Desastres ajustado por Capacidades*. Recuperado de https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/IndicemunicipalRiesgos.pdf

Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., & Ceccato, P. (2009). Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(5), 1004-1014. https://doi.org/10.1175/2009JAMC2260.1

Dinku, T., Ruiz, F., Connor, S. J., & Ceccato, P. (2010). Validation and Intercomparison of Satellite Rainfall Estimates over Colombia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *49*(5), 1004-1014. https://doi.org/10.1175/2009JAMC2260.1

Estupiñan, R. (2016). *Estudio de la variabilidad espacio temporal de la precipitación en Colombia* (Tesis de maestría, Universidad Nacionales). Recuperado de http://bdigital.unal.edu.co/54014/1/1110490004.2016.pdf

Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Jorge_Fallas5/publication/229021279_Modelos_digitales_de_elevacion_Teoria_metodos_de_interpolacion_y_aplicaciones/links/55a529ef08ae00cf99c94ee6.pdf

Gallardo, A. (2006). Geostadística. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, 1-11.

GDAL. (s. f.). *GDAL: Interpolation algorithms*. Recuperado de https://gdal.org/programs/gdal_grid.html

Geosciences Research Center. (s. f.). Geostatistical R Package—Documentation. Recuperado 7 de octubre de 2019, de http://rgeostats.free.fr/doc/index.php

Gobernación de Cundinamarca. (2014). *Estadísticas de Cundinamarca 2011—2013*. Recuperado de http://www.cundinamarca.gov.co/wcm/connect/04aecefa-79d0-4a3c-be08-9440023c225a/TACO+estadisticas+cundinamarca+Publicaci%C3%B3n+WEB.compressed.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kOr1dPa

Gobernación de Cundinamarca. (2017). *Mapa de cuencas hidrográficas*. Recuperado de http://www.cundinamarca.gov.co/Home/SecretariasEntidades.gc/Secretariadeplaneacion/SecretariadeplaneacionDespliegue/asmapas_contenidos/csecreplanea_mapas_mapasdepart

Gómez, L. C., Muñoz, M. N., & Soto, L. F. (2018). Sistema de Alerta Temprana Ambiental y Efectos en Salud – SATAES: una herramienta para la acción. *Informe Quincenal Epidemiológico Nacional*, *23*(2), 24.

González, J. P., & Jurado, M. C. (2014). *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* (Tesis de pregrado). Universidad El Bosque, Bogotá D.C.

González, R. (s. f.). *Diccionario de Terminos*. Recuperado de https://www.fcnym.unlp.edu.ar/catedras/geofoto/geo_html/informacion/pdf/diccionario_sig.pdf

Gourley, J. J., Flamig, Z. L., Vergara, H., Kirstetter, P.-E., Clark, R. A., Argyle, E., … Howard, K. W. (2017). The FLASH Project: Improving the Tools for Flash Flood Monitoring and Prediction across the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *98*(2), 361-372. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00247.1

Guerrero, O. (s. f.). *Geomorfología de cuencas*. Recuperado de http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/oguerre/4-geomorfologia.pdf

Harris, A., Rahman, S., Hossain, F., Yarborough, L., Bagtzoglou, A. C., & Easson, G. (2007). Satellite-based Flood Modeling Using TRMM-based Rainfall Products. *Sensors*, *7*(12), 3416-3427. https://doi.org/10.3390/s7123416

Hernández, J. L., Delgado, M. C., & Espadas, C. (2011). Capitulo 24 Métodos de Interpolación espacial y geoestadística. En *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (segunda, pp. 705-734). Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Ileana_Ortegon-Aznar/publication/323202595_Ortegon-Aznar_I_L_Collado-Vides_G_Montejano_Zurita_e_I_Sanchez-Molina-_2011_Algas_cap_11_293-330_pp_en_Bautista-Zuniga_F_2011Tecnicas_de_Muestreo_para_manejadores_de_recursos_naturales/links/5a85e04c0f7e9b1a9548647b/Ortegon-Aznar-I-L-Collado-Vides-G-Montejano-Zurita-e-I-Sanchez-Molina-2011-Algas-cap-11-293-330-pp-en-Bautista-Zuniga-F-2011Tecnicas-de-Muestreo-para-manejadores-de-recursos-naturales.pdf#page=723

Hernández, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (6ta edición). Recuperado de https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf

Hijmans, R., Cameron, S., Parra, J., Jones, P., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces of global land areas. *International Journal of Climatology*, *25*, 1965-1978. https://doi.org/10.1002/joc.1276

Hou, A. Y., Kakar, R. K., Neeck, S., Azarbarzin, A. A., Kummerow, C. D., Kojima, M., … Iguchi, T. (2014). The Global Precipitation Measurement Mission. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *95*(5), 701-722. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00164.1

Huffman, G., Bolvin, D., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., & Xie, P. (2018). *GPM Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) algorithm theoretical basis document (ATBD)*. Recuperado de https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/IMERG_ATBD_V5.2_0.pdf

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2017). *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation*. pp. 1-54.

Hurtado, A. F., & Mesa, Ó. J. (2014). Reanalysis of monthly precipitation fields in Colombian territory. *DYNA, 81*(186), 251-258. https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.40419

IDEAM. (2019). *Precipitación acumulada diaria*. Recuperado de http://www.pronosticosyalertas.gov.co/precipitacion-acumulada-diaria

IDEAM, & Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2018). *Integración de la red pública y privada de estaciones hidrometereológicas*. Recuperado de https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27295/Protocolo_integraci%C3%B3n_redp%C3%BAblica_privada.pdf?sequence=4&isAllowed=y

IGAC. (2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*. Cartoprint Ltda.

IGAC. (2007). *Atlas de Cundinamarca*. Bogotá D.C.: Imprenta Nacional de Colombia.

IGAC. (2016). *2,5% del país es "blanco fácil" para las inundaciones*. Recuperado de https://igac.gov.co/noticias/25-del-pais-es-blanco-facil-para-las-inundaciones

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2018). *Protocolo de Monitoreo del Agua*. Recuperado de http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023773/PROTOCOLO_MONITOREO_AGUA_IDEAM.pdf

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2019). *Catalogo Nacional de Estaciones*. Recuperado de https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Cat-logo-Nacional-de-Estaciones-del-IDEAM/hp9r-jxuu

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2000). *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*. Bogotá D.C.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). *Limite departamental*. Recuperado de http://metadatos.igac.gov.co/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/0c9176a4-5ce7-4b5b-88c2-98620fe27ad0

International Research Institute for Climate and Society. (2015). *Factibilidad del uso de bases de datos climáticos para seguros de índice en América Latina* (pp. 3-8). Recuperado de IRI, Earth Institute, Columbia University website: https://iri.columbia.edu/wp-content/uploads/2016/10/Latam_data_feas_es.pdf

Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo* (p. 188). Recuperado de http://www.bdigital.unal.edu.co/2242/1/70060838.2002.pdf

Keblouti, M., Ouerdachi, L., & Boutaghane, H. (2012). Spatial Interpolation of Annual Precipitation in Annaba-Algeria—Comparison and Evaluation of Methods. *Energy Procedia*, *18*, 468-475. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.058

Laguna, C. (2014). *Correlación y regresión lineal*. Recuperado de http://www.ics-aragon.com/cursos/salud-publica/2014/pdf/M2T04.pdf

Lahura. (2003). *El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas*. Recuperado de http://recursos.salonesvirtuales.com/assets/bloques/Lahura_Erick.pdf

Liu, Z., Ostrenga, D., Teng, W., & Kempler, S. (2012). Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Data and Services for Research and Applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(9), 1317-1325. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00152.1

Londoño, C. H. (2001). *Cuencas hidrográficas: Bases conceptuales-caracterización-planificación-administración*. Recuperado de Universidad del Tolima website: http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwff/mdez/~edisp/inea_013115.pdf

López, V. L. (2014). Propuesta Metodológica para el Rediseño de una Red Meteorológica en un Sector de la Región Andina Colombiana. *Publicaciones e Investigación*, *8*(1), 55-76. https://doi.org/10.22490/25394088.1281

López, V. L., Rojas, M. A., & Pérez, K. G. (2019). Propuesta para el mejoramiento de la red agrometeorológica en el departamento de Cundinamarca. *Publicaciones e Investigación*, *1*(0). https://doi.org/10.22490/25394088.3266

Lozano, W. A. (2018). *Clima, hidrología y meteorología: Para ciencias ambientales e ingeniería*. Bogotá D.C.: Lápiz Blanco.

Lux, B. (2016). *Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas*. Recuperado de Universidad de San Carlos de Guatemala website: http://biblioteca.ingenieria.usac.edu.gt/

Ly, S., Charles, C., & Degré, A. (2013). Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale: A review. *BASE*, 3-12.

Maggioni, V., & Massari, C. (2018). On the performance of satellite precipitation products in riverine flood modeling: A review. *Journal of Hydrology*, *558*, 214-224. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.039

Masutani, M., Schlatter, T. W., Errico, R. M., Stoffelen, A., Andersson, E., Lahoz, W., … Lord, S. J. (2010). Observing System Simulation Experiments. En *Data Assimilation: Making Sense of Observations* (pp. 647-679). https://doi.org/10.1007/978-3-540-74703-1_24

Maya, E. (2014). *Métodos y técnicas de investigación*. Recuperado de https://arquitectura.unam.mx/uploads/8/1/1/0/8110907/metodos_y_tecnicas.pdf

Mei, Y., Nikolopoulos, E., Anagnostou, E., & Borga, M. (2015). Evaluating Satellite Precipitation Error Propagation in Runoff Simulations of Mountainous Basins. *Journal of Hydrometeorology*, *17*(5), 1407-1423. https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0081.1

Mei, Y., Nikolopoulos, E. I., Anagnostou, E. N., Zoccatelli, D., & Borga, M. (2016). Error Analysis of Satellite Precipitation-Driven Modeling of Flood Events in Complex Alpine Terrain. *Remote Sensing*, *8*(4), 293. https://doi.org/10.3390/rs8040293

Michaelides, S., Levizzani, V., Anagnostou, E., Bauer, P., Kasparis, T., & Lane, J. E. (2009). Precipitation: Measurement, remote sensing, climatology and modeling. *Atmospheric Research*, *94*(4), 512-533. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.08.017

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2006). *Desarrollo de la Fruticultura en Cundinamarca*. Recuperado de http://www.asohofrucol.com.co/archivos/biblioteca/biblioteca_106_Plan%20Nal%20frur-cundinamarca.pdf

Municipio de Macheta. (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial 2000—2010*. Recuperado de http://cdim.esap.edu.co/BancoMedios/Documentos%20PDF/2pot%20-%20plan%20de%20ordenamiento%20territorial%20-%20macheta%20-%20cundinamarca%20-%202000.pdf

Naciones Unidas. (2015). *Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030*. Recuperado de https://www.unisdr.org/files/43291_spanishsendaiframeworkfordisasterri.pdf

National Aeronautics and Space Administration. (s. f.). TRMM Home Page | Precipitation Measurement Missions. Recuperado 21 de septiembre de 2019, de https://pmm.nasa.gov/TRMM

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *Los suelos almacenan y filtran agua*. Recuperado de http://www.fao.org/3/a-i4890s.pdf

Organización Meteorológica Mundial. (2008). *Guía de prácticas hidrológicas volumen I Hidrología – De la medición a la información hidrológica*. Recuperado de http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_I_es.pdf

Organización Meteorológica Mundial. (2009). *Guía de prácticas hidrológicas volumen II: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas*. Recuperado de http://www.whycos.org/chy/guide/168_Vol_II_es.pdf

Organización Meteorológica Mundial. (2018). *Guía de Instrumentos y métodos de observación volumen IV: Observaciones desde el espacio*. Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9878

Pardo, R., & Rodríguez, Y. (2014). Clasificación de tormentas tropicales según lluvias asociadas: (2) resultados. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, *35*(2), 35-51. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382014000200003

Pascual, J. A., & Díaz, M. (2016). *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS* (Vol. 4). Recuperado de http://geomaticaagua.blogspot.com.es/p/cuadernos-de-geomatica-aplicada.html

Pike, R., & Wilson, S. (1971). Elevation-Relief Ratio, Hypsometric Integral, and Geomorphic Area-Altitude Analysis. *GSA Bulletin*, *82*(4), 1079-1084. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1971)82[1079:ERHIAG]2.0.CO;2

Pinzón, R., Pulido, J., Santa, L., & Gómez, L. (2013). Diseño de una red de muestreo espacial que optimiza la estimación de parámetros de la función de covarianza para la medición pluviométrica en el departamento de Cundinamarca. *Revista UD y la Geomática*, *7*, 75-85.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (2012). *Conceptos generales sobre gestión del riesgo de desastres y contexto del país*. Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/38050_38050conceptosbsicos.pdf

Quispe, J. C., & Rojas, E. (2015). Diseño del sistema de drenaje pluvial de la comunidad 3 de mayo depucarumi del Distrito de Ascensión—Huancavelica. *Universidad Nacional de Huancavelica*. Recuperado de http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/268

Ratnayaka, D. D., Brandt, M. J., & Johnson, K. M. (2009). CHAPTER 3—Hydrology and Surface Supplies. En *Water Supply (Sixth Edition)* (pp. 63-107). https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6843-9.00011-1

Ravelo, A. C., & Santa, J. A. (2000). Estimación de las precipitaciones utilizando información satelital y terrestre en la provincia de Córdoba (Argentina). *AgriScientia*, *17*, 21-27.

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*, *337*(3), 402-420. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.02.015

Reyes, A., Ulises, F., & Carvajal, Y. (2010). *Guía básica para la caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas*. Cali: Programa Editorial Universidad del Valle.

Rivas, J. (2015). *Análisis de la correlación de datos de precipitación entre el satélite TRMM y las estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Bogotá* (Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás). Recuperado de https://hdl.handle.net/11634/2932

Rodríguez, A., & Pérez, A. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, *82*, 1-26.

Salas, M. A., & Jiménez, M. (2019). *Inundaciones*. Recuperado de Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana website: http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/3-FASCCULOINUNDACIONES.PDF

Santos, A., Vargas, A., Obregón, N., & Cárdenas, E. (2011). Análisis de la distribución e interpolación espacial de las lluvias en Bogotá, Colombia. *ResearchGate*, *167*, 151-159.

Shen, Y., Xiong, A., Wang, Y., & Xie, P. (2010). Performance of high-resolution satellite precipitation products over China. *Journal of Geophysical Research*, *115*. https://doi.org/10.1029/2009JD012097

Shreve, R. (1974). Variation of mainstream length with basin area in river networks. *Water Resources Reasearch*. Recuperado de https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR010i006p01167

Su, F., Hong, Y., & Lettenmaier, D. P. (2008). Evaluation of TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA) and Its Utility in Hydrologic Prediction in the La Plata Basin. *Journal of Hydrometeorology*, *9*(4), 622-640. https://doi.org/10.1175/2007JHM944.1

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K.-L. (2018). A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, *56*(1), 79-107. https://doi.org/10.1002/2017RG000574

Tavera, A. C. (2018). *Evaluación del impacto de la resolución de modelado en la simulación del evento de inundación de Mocoa en abril de 2017* (Tesis de pregrado). Universidad El Bosque, Bogotá D.C.

The University of Oklahoma. (2018). *The University of Oklahoma—OU Catalog, 2018 -2019*. Recuperado de http://ou-public.courseleaf.com/pdf/2018-2019.pdf

Tian, Y., & Peters, C. D. (2010). A global map of uncertainties in satellite-based precipitation measurements. *Geophysical Research Letters*, *37*(24). https://doi.org/10.1029/2010GL046008

Timmermans, R., Lahoz, W., Attié, J., Peuch, V., Curier, R., Edwards, D., … Builtjes, P. (2015). Observing System Simulation Experiments for air quality. *Atmospheric Environment*, *115*, 199-213. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.032

Universidad El Bosque. (2016). *Guía de Inducción*. Recuperado de https://www.unbosque.edu.co/sites/default/files/bienestar/induccion/guia_de_induccion_julio_2016.pdf

Ureña, J. E., Vallejos, A. G., Saavedra, O. C., & Escalera, A. C. (2018). Evaluación de la precipitación distruida en la cuenca Katari basado en tecnología satelital y productos derivados. *Investigación & Desarrollo*, *18*(1), 35-51.

Vélez, J., & Nieto, P. (2016). *Validación de medidas de evaluación para el pronóstico de la tasa de cambio en colombia* (Tesis de maestría, Colegio de Estudios Superiores de Administración CESA). Recuperado de https://repository.cesa.edu.co/bitstream/handle/10726/1577/MFC00491.pdf?sequenc

Vergara, H. (2015). *Characterizing uncertainty of a hydrologic modeling system for operational flood forecasting over the conterminous United Stated* (Disertation, University of Oklahoma). Recuperado de https://shareok.org/handle/11244/15505

Vergara, H., Hong, Y., Gourley, J., Anagnostou, E., Maggioni, V., Stampoulis, D., & Kirstetter, P. (2014). Effects of Resolution of Satellite-Based Rainfall Estimates on Hydrologic Modeling Skill at Different Scales. *Journal of Hydrometeorology*, *15*(2), 593-613. https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0113.1

Vergara, H., Kirstetter, P.-E., Gourley, J. J., Flamig, Z. L., 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*, *541*, 421-433. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.011

Vieux, B. E. (2004). *Distributed hydrologic modeling using GIS* (Second, Vol. 48). Norman, Oklahoma: Kluwer Academic Publishers.

17. Anexos

Anexo 1. *Puntos de acumulación de flujo.*

Gauge ID	Latitud	Longitud	Acumulación de flujo (SU)
1	5,3888	-74,0064	74
2	5,4173	-73,9646	75
3	5,5776	-73,7894	1380
4	5,2674	-73,5731	109
5	4,9925	-73,5151	585
6	4,7175	-73,0731	9745
7	4,4677	-73,0988	181
8	4,4424	-73,1048	1271
9	4,2006	-73,1392	1099
10	4,4672	-73,6737	216
11	4,1923	-73,7649	3019
12	4,2595	-74,7892	53032
13	4,5261	-74,7976	594
14	4,7424	-74,7987	52
15	4,8504	-74,7648	134
16	4,9758	-74,7237	172
17	5,1923	-74,7148	125
18	5,4002	-74,6745	72
19	5,4587	-74,6653	3438
20	5,5678	-74,657	134
21	5,7005	-74,6405	103
22	5,7848	-74,6393	1820
23	5,4436	-74,1808	493

Anexo 2. *Matriz de eventos de inundación.*

ID	Fecha inicio del evento (AAAMMDDHHMM)	Fecha finalización del evento (AAAMMDDHHMM)	Duración estimada del evento (Horas)	Máximo periodo de retorno
1	201404190000	201404210000	0.083333	63.89
2	201404240600	201404252100	0.067708	3.32
3	201404271900	201404282100	0.045139	3.93
4	201405070600	201405082100	0.067708	14.90
5	201405130300	201405140000	0.036458	2.95
6	201405211200	201405230300	0.067708	2.61
7	201405270000	201405272100	0.036458	1.72
8	201406061800	201406071500	0.036458	5.02
9	201406141800	201406152100	0.046875	30.82
10	201409222000	201409240300	0.053819	6.79
11	201410051500	201410071800	0.088542	6.07
12	201410141800	201410152100	0.046875	2.83
13	201410172100	201410200600	0.098958	24.37
14	201410211830	201410231800	0.082465	2.79
15	201411041500	201411060000	0.057292	2.05
16	201411160230	201411170900	0.052951	2.23
17	201412090730	201412101800	0.059896	5.33
18	201501170600	201501181800	0.062500	30.98
19	201502072200	201502090300	0.050347	1.56
20	201503021500	201503031200	0.036458	3.76
21	201503140230	201503151200	0.058160	14.48
22	201503210000	201503222100	0.078125	4.67
23	201503231300	201503260300	0.107639	39.86
24	201503311200	201504011200	0.041667	1.76
25	201504071830	201504090000	0.051215	1.91
26	201504151530	201504190600	0.150174	49.61
27	201510131800	201510141500	0.036458	2.01
28	201511050600	201511070000	0.072917	2.99
29	201511270600	201511280300	0.036458	5.65
30	201602210300	201602221500	0.062500	8.83
31	201602250300	201602260300	0.041667	3.34
32	201603091800	201603101500	0.036458	2.31
33	201603131800	201603141500	0.036458	3.76
34	201603200000	201603202100	0.036458	1.35
35	201603300100	201604011200	0.102431	2.48
36	201604040900	201604051500	0.052083	3.28

37	201604101500	201604111500	0.041667	2.80
38	201604200300	201604220900	0.093750	26.27
39	201604221030	201604232100	0.059896	2.55
40	201604262330	201604272100	0.037326	1.78
41	201605130230	201605141500	0.063368	19.55
42	201605271430	201605300000	0.099826	9.69
43	201607052100	201607061800	0.036458	2.05
44	201607270300	201607280000	0.036458	2.27
45	201608300300	201608311200	0.057292	3.13
46	201609131500	201609141500	0.041667	4.32
47	201609301930	201610020300	0.054688	27.19
48	201610131800	201610141500	0.036458	3.71
49	201610180300	201610190300	0.041667	1.92
50	201610261230	201610290300	0.108507	13.04
51	201610311800	201611030300	0.098958	16.40
52	201611102030	201611120900	0.063368	32.18
53	201611251130	201611261500	0.047743	1.88
54	201612030600	201612040300	0.036458	4.20
55	201703061630	201703090000	0.096354	17.45
56	201703132030	201703190600	0.224826	7.52
57	201703262300	201703280300	0.048611	1.82
58	201704232330	201704250000	0.042535	4.25
59	201705060100	201705070000	0.039931	1.78
60	201705092230	201705110900	0.059896	2.27
61	201705131900	201705180300	0.180556	24.63
62	201705212130	201705232100	0.082465	2.19
63	201705242030	201705251200	0.026910	1.45
64	201706130300	201706140000	0.036458	1.77
65	201706201500	201706220000	0.057292	5.32
66	201708082100	201708091800	0.036458	4.00
67	201708271500	201708281200	0.036458	1.49
68	201709101800	201709111500	0.036458	1.83
69	201709300000	201709302100	0.036458	2.48
70	201710102130	201710121200	0.066840	2.40
71	201710201800	201710212100	0.046875	3.20
72	201710282100	201710291800	0.036458	2.55
73	201711032100	201711080000	0.171875	7.05
74	201711071800	201711081500	0.036458	1.57
75	201711090300	201711100000	0.036458	2.20
76	201712011800	201712031800	0.083333	13.45
77	201803222100	201803240600	0.057292	5.63
78	201803311600	201804030300	0.102431	16.07
79	201804071700	201804100000	0.095486	3.16

80	201804122330	201804131500	0.026910	1.14
81	201804252100	201804261800	0.036458	5.72
82	201805031930	201805050600	0.059896	4.28
83	201805122130	201805131800	0.035590	1.91
84	201805161330	201805180300	0.065104	1.96
85	201805230230	201805240600	0.047743	3.31
86	201805251530	201805290000	0.139757	4.82
87	201806031630	201806050300	0.059896	7.41
88	201809022100	201809032100	0.041667	2.89
89	201810020000	201810030900	0.057292	6.68
90	201811020000	201811022100	0.036458	2.55
91	201811081930	201811111800	0.122396	4.30
92	201811170230	201811190600	0.089410	1.95

18. Glosario de términos

Las definiciones encontradas a continuación se basaron en el diccionario de términos de (González, s. f.)

Capa

Es la representación geográfica a modo de cobertura que permite una separación lógica de la información espacial de un mapa.

Interpolación

Estimación del valor de un punto determinado a partir de valores o información de los puntos aledaños.

Pixel

Es el acrónimo de *Picture Element* el cual es la unidad mínima que puede exhibir un dispositivo o una imagen, de esta manera la cantidad de estos representa la resolución de la misma.

Ráster

Método de visualización y almacenamiento de datos en puntos individuales los cuales pueden contener atributos o información que conjunto forman una imagen. Estos puntos también pueden ser celdas regulares que representen un área geográfica

Rasterización

Consiste en el proceso para convertir datos espaciales frecuentemente de condición vectorial a una estructura de datos ráster

Resolución

Tamaño mínimo de un elemento, generalmente pixeles que puede ser representado por técnicas de teledetección con la generación de imagen ráster.

Resolución espacial

Consiste en la habilidad de un sistema de sensor para registrar información con detalle.

Sensor

Instrumento con la capacidad de captar energía generalmente electromagnética, la cual transmite para ser procesada.

Superficie

Representación de información geográfica a partir de un conjunto de datos continuo, donde los elementos del mapa no son discretos.

Teledetección

Obtención de información de objetos , áreas o fenómenos donde no hay contacto directo con el mismo.

Vector

Consiste en un conjunto de datos espaciales los cuales representan la información a partir de vectores, como puntos, (como vectores) líneas (como serie de puntos) y polígonos (conjunto de líneas)

Vectorización

Es la conversión de cualquier tipo de datos espaciales a una estructura de datos vectoriales