



Modelamiento de huella de inundación en la cuenca baja del Rio Bogotá en el municipio de  
Girardot-Cundinamarca

María Camila Castro Rey

Víctor Hugo Robledo Rodríguez

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Cundinamarca

Sede Girardot (Cundinamarca)

Programa Ingeniería Civil

mayo de 2023

Modelamiento de huella de inundación en la cuenca baja del Rio Bogotá en el municipio de  
Girardot-Cundinamarca

María Camila Castro Rey

Víctor Hugo Robledo Rodríguez

Monografía presentada como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor(a)

Edgar Orjuela Montoya

Ingeniero Civil Especialista en Recursos Hídricos

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Cundinamarca

Sede Girardot (Cundinamarca)

Programa Ingeniería Civil

mayo de 2023

### **Dedicatoria**

*Este logro es dedicado primeramente a las personas más importantes en mi vida, Mi mamá Angelica y mi papá William, gracias por siempre hacer lo posible para darme lo mejor, porque cada día se han esforzado para que yo sea la mujer que hoy en día soy, porque esta meta en mi vida es gracias a ustedes, nada de esto hubiera sido posible si no hubiera contado con su apoyo incondicional, son mi mayor motor y mi más grande orgullo, los Amo. También, quiero dedicarle esto a mis abuelitas y a mi hermana, gracias por sus enseñanzas. A mi pareja que fue un gran apoyo en este proceso, por darme las fuerzas que a veces ya no sentía, por ser esa voz de aliento, por ayudarme cada día a ser mejor persona, y sobre todo por tenerme tanta paciencia para enseñarme y siempre animarme a que nunca debía rendirme y hacerme saber que, si lo podíamos lograr, gracias, te amo.*

**María Camila Castro Rey**

*Inicialmente este logro es dedicado a mi familia y a mis hijos, unas de las personas más importantes en mi vida, son mi mayor inspiración y por los cuales cada día pretendo ser mejor, gracias a Dios y a la vida por permitirme cumplir este sueño que tanto anhelaba. También, quiero dedicarle y agradecer a mi pareja por estar conmigo en esta etapa, por enseñarme cosas nuevas, por ser un gran equipo de trabajo, por acompañarme en los buenos y malos momentos, por tenerme paciencia y por apoyarme, si lo logramos amor, te amo.*

**Victor Hugo Robledo Rodriguez**

## **Agradecimientos**

Primeramente, le damos gracias a Dios por permitirnos llegar hasta el final de esta etapa, el cual es un logro muy importante para nosotros, por el cual hemos luchado 5 años y estamos a un paso de culminarlo. También, le damos las gracias al tutor de la monografía el Ing. Edgar Orjuela Montoya por los conocimientos que nos brindó durante la carrera, que han sido satisfactorios y nos han aportado de manera significativa. Agradecemos también a la Universidad Minuto de Dios, por ofrecer la posibilidad de que cada día más personas se eduquen, y a todos los docentes que hicieron parte de este proceso y que en cada asignatura nos aportaron sus conocimientos.

También, queremos agradecer a nuestras familias que son el pilar fundamental de nuestros objetivos, por apoyarnos en cada momento de felicidad y de dificultad que se vive en esta etapa, por siempre estar ahí en todo momento, dándonos una voz de aliento para no rendirnos por nuestros sueños. Porque a pesar de las adversidades siempre creyeron en nosotros y en que si lográsemos esta meta que nos propusimos. Infinitas gracias.

## Contenido

|   |    |
|---|----|
| Lista de tablas .....                             | 7  |
| Lista de figuras .....                            | 8  |
| Lista de anexos.....                              | 10 |
| Resumen .....                                     | 11 |
| Abstract .....                                    | 12 |
| Introducción.....                                 | 13 |
| CAPÍTULO I .....                                  | 16 |
| 1 Formulación del Problema .....                  | 16 |
| 1.1 Descripción del problema .....                | 16 |
| 1.2 Delimitación del problema .....               | 20 |
| 1.3 Definición del problema.....                  | 21 |
| 1.4 Planteamiento del problema .....              | 21 |
| 2 Antecedentes .....                              | 22 |
| 3 Estado del arte .....                           | 26 |
| CAPÍTULO II .....                                 | 30 |
| 4 Justificación.....                              | 30 |
| 5 Objetivos .....                                 | 33 |
| 5.1 Objetivo General .....                        | 33 |
| 5.2 Objetivos Específicos.....                    | 33 |
| 6 Localización Geográfica del Proyecto.....       | 34 |
| 7 Factibilidad.....                               | 35 |
| 8 Marco teórico .....                             | 37 |
| 8.1 Inundaciones.....                             | 37 |
| 8.1.1 Inundaciones como recursos.....             | 37 |
| 8.1.2 Inundaciones como amenazas .....            | 38 |
| 8.1.3 Tipos de Inundaciones.....                  | 38 |
| 8.2 Tipos de Mapas de Inundación .....            | 40 |
| 8.2.1 Mapa de Susceptibilidad de Inundación ..... | 41 |
| 8.2.2 Mapa evento de Inundación .....             | 41 |

|                   |   |    |
|-------------------|---|----|
| 8.2.3             | Mapa de amenaza de Inundación .....                 | 44 |
| 8.2.4             | Mapa de Zonificación de amenaza por inundación..... | 49 |
| 8.2.5             | Mapa de vulnerabilidad de inundación.....           | 49 |
| 8.2.6             | Mapa de riesgo de inundación .....                  | 50 |
| 8.3               | Software y Programas .....                          | 50 |
| 8.4               | Marco Conceptual.....                               | 51 |
| 8.5               | Marco legal .....                                   | 58 |
| CAPÍTULO III..... |   | 60 |
| 9                 | Marco metodológico.....                             | 60 |
| 9.1               | Método .....  | 60 |
| 9.2               | Metodología.....                                    | 62 |
| 10                | Resultados.....                                     | 66 |
| 11                | Administración del Proyecto .....                   | 79 |
| 11.1              | Presupuesto .....                                   | 79 |
| 11.2              | Cronograma .....                                    | 80 |
| Conclusiones..... |   | 81 |
| Referencias ..... |   | 83 |
| Anexos .....      |   | 90 |

**Lista de tablas**

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Tabla 1. Normatividad de Referencia. ....</i>                                       | <i>58</i> |
| <i>Tabla 2. Resumen de Cálculos de Periodos de Retorno (2,33,5,20 y 100 años).....</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabla 3. Resumen de Datos de las Secciones Transversales cada 300 m.....</i>        | <i>75</i> |

## Lista de figuras

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 1. Imagen Sector Sur Este del Municipio de Girardot. ....</i>  | <i>18</i> |
| <i>Figura 2. Sistema de Drenaje del Municipio de Girardot. ....</i>  | <i>19</i> |
| <i>Figura 3. Imagen Sector para el Análisis del Caso. ....</i>   | <i>20</i> |
| <i>Figura 4. Imagen del Río Bogotá. ....</i>   | <i>26</i> |
| <i>Figura 5. Mapa de ubicación geográfica del municipio de Girardot - Cundinamarca. ....</i>                           | <i>34</i> |
| <i>Figura 6. Clasificación de las inundaciones. ....</i>   | <i>40</i> |
| <i>Figura 7. Clasificación de satélites. ....</i>  | <i>42</i> |
| <i>Figura 8. Clasificación de satélites de Observación de tierra. ....</i>   | <i>43</i> |
| <i>Figura 9. Fuentes para producir un DEM. ....</i>  | <i>48</i> |
| <i>Figura 10. Modelo Digital de Elevación del Municipio de Girardot con Rampa de Colores. ....</i>                     | <i>49</i> |
| <i>Figura 11. Software de sistemas de Información Geográfica (SIG). ....</i>   | <i>51</i> |
| <i>Figura 12. Curvas de Nivel con intervalos de 10 m del Municipio de Girardot. ....</i>                               | <i>53</i> |
| <i>Figura 13. Red Irregular de Triángulos de la Zona de Estudio, en Vista 3D. ....</i>                                 | <i>54</i> |
| <i>Figura 14. Mapa de Cobertura vegetal y Usos del Suelo del Municipio de Girardot. ....</i>                           | <i>55</i> |
| <i>Figura 15. Mapa de Vulnerabilidad del Municipio de Girardot. ....</i>   | <i>56</i> |
| <i>Figura 16. Enfoque de la Investigación. ....</i>  | <i>61</i> |
| <i>Figura 17. Diseño de Investigación. ....</i>  | <i>62</i> |
| <i>Figura 18. Diagrama de Flujo e Información Necesaria para la Elaboración de Mapa de Amenaza de Inundación. ....</i> | <i>63</i> |
| <i>Figura 19. Diagrama de Flujo de Análisis de Datos para Elaboración de Mapa de Amenaza por Inundación. ....</i>      | <i>64</i> |
| <i>Figura 20. Histórico de Caudales Máximos Mensuales de la Estación La Campiña. ....</i>                              | <i>67</i> |
| <i>Figura 21. Histórico de Caudales Mínimos Mensuales de la Estación La Campiña. ....</i>                              | <i>67</i> |
| <i>Figura 22. Histórico de Caudales Máximos Mensuales de la Estación Girardot 2. ....</i>                              | <i>67</i> |
| <i>Figura 23. Histórico de Caudales Mínimos Mensuales de la Estación Girardot 2. ....</i>                              | <i>68</i> |
| <i>Figura 24. Histórico de Caudales Máximos Mensuales de la Estación Puente Portillo. ....</i>                         | <i>68</i> |
| <i>Figura 25. Niveles Históricos de Caudales Mínimos de la Estación Puente Portillo. ....</i>                          | <i>68</i> |



|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 26. Histograma de Caudales Máximos Mensuales.....</i>  | <i>69</i> |
| <i>Figura 27. Histograma de Caudales Mínimos Mensuales. ....</i>   | <i>70</i> |
| <i>Figura 28. Diseño del Eje, Bordes, Llanuras de Posible Inundación y Trazo de Secciones Transversales del Afluente en Análisis. ....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 29. Visualización de la Geometría de la Sección Transversal No. 5.....</i>   | <i>73</i> |
| <i>Figura 30. Visualización de la Geometría de la Sección Transversal No. 8, en Función de la Velocidad del Flujo. ....</i>                | <i>74</i> |
| <i>Figura 31. Resumen del Comportamiento del Fluido en los Tiempos de Retorno Calculados.....</i>  | <i>74</i> |
| <i>Figura 32. Mapa de Amenaza de Inundación con TR 2.33 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca. ....</i>                          | <i>77</i> |
| <i>Figura 33. Mapa de Amenaza de Inundación con TR 5 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca. ....</i>                             | <i>77</i> |
| <i>Figura 34. Mapa de Amenaza de Inundación con TR 20 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca. ....</i>                            | <i>78</i> |
| <i>Figura 35. Mapa de Amenaza de Inundación con TR 100 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca. ....</i>                           | <i>78</i> |
| <i>Figura 36. Presupuesto. ....</i>  | <i>79</i> |
| <i>Figura 37. Programación de Actividades del Proyecto.....</i>  | <i>80</i> |

**Lista de anexos**

|   |           |
|---|-----------|
| <i>Anexo 1. Mapa de Riesgo Físico Relativo (RF) a Nivel Municipal.....</i>        | <i>90</i> |
| <i>Anexo 2. Mapa de Pérdida Anual Porcentual Esperada a Nivel Municipal. ....</i> | <i>90</i> |

## Resumen

El presente documento se centra en realizar el diseño del mapa de amenaza de inundación para la cuenca baja del río Bogotá en el municipio de Girardot Cundinamarca. El objetivo principal es proporcionar información sobre las áreas que son propensas a inundación, con el fin de comunicar a la población y a los gobiernos locales para la toma de decisiones. Con base en lo anterior, se utilizaron metadatos suministrados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR para delimitar la zona de análisis. Además, se ejecutó un estudio de los caudales máximo y mínimos históricos de las estaciones la campiña, Girardot 2 y Puerto Portillo, datos que fueron entregados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM, una vez se efectuó esto, se calcularon los caudales para los periodos de retorno de 2.33, 5, 20, y 100 años por el método de Gumbel. Luego de ello, se realizó la modelación de la geometría del área del río por medio del software HEC-RAS. Posteriormente, se obtuvo información importante que ayudó a la precisión en la elaboración de la cartografía, finalmente se representaron gráficamente los mapas de amenaza de inundación con los caudales de los Tiempos de retorno antes mencionados.

*Palabras clave: Mapa de amenaza de inundación, Inundaciones, Sistemas de alerta temprana por Inundación.*

### **Abstract**

This document focuses on designing the flood hazard map for the lower basin of the Bogotá river in the municipality of Girardot Cundinamarca. The main objective is to provide information on the areas that are prone to flooding, in order to communicate to the population and local governments for decision making. Based on the above, metadata provided by the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca - CAR was used to delimit the area of analysis. In addition, a study of the maximum and minimum historical flows of the La Campiña, Girardot 2 and Puerto Portillo stations was carried out, data that was delivered by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies -IDEAM, once this was done, they were calculated the flows for the return periods of 2.33, 5, 20, and 100 years by the Gumbel method. After that, the modeling of the geometry of the river area was carried out by means of the HEC-RAS software. Subsequently, important information was obtained that helped the precision in the elaboration of the cartography, finally the flood threat maps were graphically represented with the flows of the aforementioned Return Times.

*Keywords: Flood hazard map, Floods, Flood Early Warning Systems*

## Introducción

Desde el inicio de la humanidad el ser humano era nómada, saciando el hambre y la sed a medida que se desplazaban por los extensos terrenos explorables, sin embargo, con el pasar de los miles de años esas comunidades se convirtieron en sedentarias. (Pokutta, 2019). Según lo mencionado por Chen et al. (2023) donde afirmó que “la humanidad empezó a crecer de forma exponencial, con la necesidad de edificar las comunidades en las riberas de los ríos, observando que, el recurso hídrico es vital para los seres vivos y otras actividades como la agricultura, entre otras” (p.2). Recalcando que, con el incremento de la población, de igual manera creció la necesidad del fluido hidráulico.

En la misma línea, como fueron pasando los años en el tiempo, la ocupación sin control en las riberas de los afluentes tributarios y recursos hídricos de menor proporción, teniendo en mente lo mencionado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2018), donde afirma que “con las intervenciones en las márgenes de los drenajes, así como el crecimiento de las poblaciones con las actividades socioeconómicas asociadas han acentuado los efectos negativos que ocasionan los incrementos periódicos en los niveles de los ríos” (p.16). Resaltando que, en épocas de aguas altas y aguas bajas, así como la transición entre estos dos estados, corresponde a la naturaleza inherente de la dinámica hidrológica.

A lo largo de la historia, los cambios climáticos cada vez son más fuertes, debido a diversos factores que influyen en estas alteraciones, pero el principal motivo es la actividad humana, la cual produce cambios en la atmósfera, lo que provoca una variación en las temperaturas y más precipitaciones, causando así efectos naturales que son nocivos para el ser humano; las fuertes lluvias últimamente traen consigo una serie de afectaciones para las personas, lo que conlleva a deslizamientos y crecientes en ríos o quebradas, produciendo un desastre natural como los son las inundaciones.

Como consecuencia, las inundaciones generan una situación de emergencia para las comunidades que viven en zonas de alto riesgo, ocasionando daños económicos, naturales, sociales y de

mortalidad. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2015, como se citó en Cruz y Cheng, 2019) afirma que en el mundo “las inundaciones se encuentran en primer lugar entre los 10 mayores desastres en el período comprendido entre los años 1900 y 2012 por el número de personas afectadas y están en segundo lugar por la cantidad de pérdidas económicas”. (p.12). Por ello, realizar planes que minimicen esta situación es una alternativa que toda ciudad debería contemplar, dado que son eventos que se pueden presentar en cualquier momento.

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (2019) afirma que “En el país se identificaron 190.935 km<sup>2</sup> que tienen condiciones favorables a la inundación, es decir, aproximadamente el 17% del área continental del territorio nacional”. (p.82). De acuerdo con los datos anteriormente mencionados, cierta cantidad de área nacional es afectada por estos procesos naturales; superficies donde se pueden encontrar, viviendas, cultivos, edificaciones, personas, animales, entre otros. Es por esto, que los daños de las inundaciones en la mayoría de los casos son abrasivos, no solo para los hogares, también en sectores productivos, por las pérdidas económicas que origina.

Por estas razones, es importante tener en cuenta los cambios climáticos, sobre todo en la parte de las lluvias, tener una prevención del riesgo que pueda mitigar las catástrofes que se ocasionan por las inundaciones, igualmente que los planes de gobierno local generen soluciones y ayudas a las comunidades que habitan cerca a los afluentes.

Por otra parte, Colombia cuenta con más de 50 ríos, entre ellos está el río Bogotá, con 375 Km, que desemboca en el río Magdalena en el municipio de Girardot Cundinamarca. Haciendo un llamado a la memoria, en el mes de junio del 2022 el río Bogotá sufrió un desbordamiento por las fuertes lluvias causadas en ese tiempo, según lo mencionado en la revista Semana (2022) el IDEAM aseguró que, “la cuenca baja del río Bogotá, ubicada al occidente de la ciudad, presentaba una creciente que podría afectar a los ciudadanos que viven cerca a la fuente hídrica más importante de la capital”. Cuando se hace referencia a la cuenca baja del río es desde, el Salto del Tequendama hasta Girardot; de la misma

manera, la revista semana (2022) mencionó que el IDEAM afirmó en su cuenta de Twitter que, “se debe prestar especial atención a los municipios de Tena, La Mesa, Anapoima, Apulo, Viotá, Anolaima, Tocaima, Agua de Dios y Girardot”. Por consiguiente, el municipio de Girardot, también, se puede ver afectando por la creciente del río Bogotá en épocas invernales, perjudicando los habitantes que se encuentran cerca al afluente.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo pretende realizar el modelamiento de la huella de inundación del río Bogotá en la cuenca baja del municipio de Girardot Cundinamarca, empleando diversos softwares como ArcGIS, QGIS, Google Earth Engine y Hec-RAS, que permiten el modelo digital de la zona de cobertura del recurso hídrico estudiado. También, la metodología empleada es la propuesta en la “Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación”, de igual forma, se empleará la metodología para los mapas de amenaza por inundación, todo esto emitido por el centro nacional de modelación del IDEAM, además, para el suministro de los datos necesarios para la investigación se tomarán de la plataforma del IDEAM, de la batimetría realizada en el segmento a estudiar y Google Earth.

Con referencia a la elaboración de los mapas de inundación, según el objetivo de la investigación los mapas a modelar son el mapa de evento de inundación, en el cual será necesario cierta información básica, como: Información histórica de eventos, registro estaciones Hidrológicas, Información documental, entre otras, con el propósito de realizar la reconstrucción de la extensión de la inundación, y así obtener las áreas que se verán afectadas por inundación. Ahora bien, para el mapa de amenaza de inundación, es necesario una información básica como: modelo de elevación digital, Cartografía básica, Mapas de eventos, Hidrotopografía, entre otras, con el propósito de realizar la modelación Hidrológica y la modelación Hidráulica.

## CAPÍTULO I

### 1 Formulación del Problema

#### 1.1 Descripción del problema

Observando la variación de las condiciones meteorológicas, surgió la preocupación sobre las fuentes hidrográficas en el planeta Tierra, en consecuencia, a las precipitaciones. En este caso se realiza un enfoque a la cuenca del río Bogotá. Este afluente está dividido en 3 subcuencas, alta, media y baja. Teniendo en cuenta lo mencionado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (2020), donde afirma que “la subcuenca río bajo Bogotá está conformada por 9 municipios, con un área de 54.431,013 ha, longitud del cauce de 65,3 Km, la cabecera está sobre la cota 1450 msnm y en la desembocadura está sobre la cota 275 msnm” (p. 6). En ese sentido, se focaliza el esfuerzo en la cuenca baja (Apúlo – Girardot) del afluente en mención, cabe mencionar que, esta se encuentra ubicada en el sector del Tequendama. Realizando énfasis en el tramo del río Bogotá que colinda con el municipio de Girardot.

De otro modo, con el aumento de precipitaciones como resultado del cambio climático que se están presentando en la actualidad, este se está viendo reflejado en el incremento de los caudales de los afluentes y recursos hídricos como las lagunas, quebradas y humedales, los cuales representan un gran riesgo debido a la posibilidad de ampliación en las inundaciones pluviales, particularmente en áreas urbanas y desarrolladas. De acuerdo con Wasko (2021) donde afirma que “se encuentra que la intensidad máxima de los eventos de lluvia de 1 día aumenta aproximadamente a una tasa de 6–7%/°C, con intensidades de eventos más raras que aumentan a una tasa que excede la Relación Clausius-Clapeyron”. Es importante decir que, a pesar de que existe tecnología para pronosticar variables meteorológicas, estas están quedando sin factores para calcular, considerando los niveles de contaminación que existe en la atmosfera.



Desde otro punto de vista, están pronunciadas como zonas de amenaza natural, las que representen riesgo considerable de acontecimiento de catástrofe en función a la vulnerabilidad de la localidad, la infraestructura física y las actividades económicas, como lo hace notar el Consejo Municipal de Girardot en el acuerdo No. 012 del 13 de junio de 2002 donde se ajusta el Plan de Ordenamiento Territorial – POT del 2000, “quedando definido para el municipio de Girardot como zona de amenaza natural por inundaciones y desastre ecológico, el cauce, las riberas del río Bogotá, sus aguas y zonas de influencia en el recorrido de este río dentro del municipio” (p. 33). Posee un valor resaltar que, el nivel de contaminación que este afluente es otro factor contribuyente que afecta a los seres vivos y la agricultura del sector en cuestión.

En la misma línea, de acuerdo con información de geográfica tomada con análisis del software ArcGIS, en los 11,91 Km aproximados del cauce del río Bogotá que se encuentran en límites con el municipio de Girardot, se encuentran 13 barrios con vulnerabilidad por inundación (Bocas del Bogotá, Parques Bocas del Bogotá, Divino Niño, Villa del Río, Acacias II, San Rafael, Obrero, Salsipuedes, Brisas del Bogotá, Santa Fé, Urbanización la Victoria, Urbanización la Campiña y el Kennedy al sur este), resaltando que, el municipio no cuenta con un sistema alerta de temprana por inundación (SAT) con tecnología que integre las organizaciones de gestión de desastres en tiempo real, en ninguno de esos sectores.

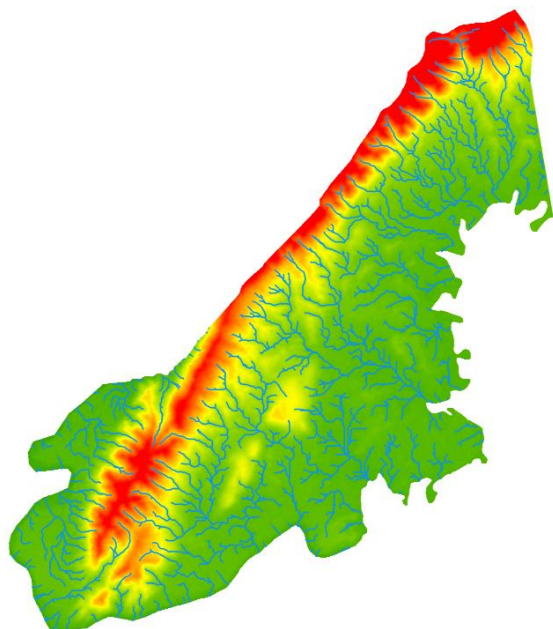
Del mismo modo, en la longitud del cauce del río Bogotá que limita con el municipio de Girardot, se encuentran con vulnerabilidad por inundación dos (2) conjuntos residenciales (San Antonio, ubicado en coordenadas latitud 4°17'54.58"N, longitud 74°47'47.53"O y el condominio campestre el Peñón ubicado en coordenadas latitud 4°18'30.09"N, longitud 74°46'22.77"O), una (01) institución Educativa (el colegio Instituto Kennedy de Girardot en coordenadas latitud 4°18'34.18"N, longitud 74°47'22.12"O) y una (1) institución pública (La estación de policía de Girardot, ubicada en coordenadas latitud 4°17'58.85"N, longitud 74°47'43.15"O). Hay que recalcar que, las ubicaciones geográficas mencionadas



afluentes, los drenajes quedan imposibilitados de cumplir su función, estos pueden actuar hasta que el caudal del cauce disminuye.

**Figura 2.**

*Sistema de Drenaje del Municipio de Girardot.*



Fuente Propia.

De esta manera, de conformidad al POT (2002) del municipio de Girardot, los sectores con afectación están compuestos por Viviendas de Densidad Alta Unifamiliar - VDAU (en este tipo de uso están los barrios Brisas del Bogotá, Obrero, Kennedy), Viviendas de Densidad Alta Bifamiliar -VDAB (en este tipo de uso están los barrios Bocas del Bogotá, Santa Fe, Parques Bocas del Bogotá, Salsipuedes y Urbanización la Victoria), Viviendas de Densidad Media Bifamiliar -VDMB (en este tipo de uso está el barrio La Campiña), Viviendas de Densidad Baja Unifamiliar -VDBU (en este tipo de uso está el barrio El Peñón).

Finalmente, se observa que el sector del cauce del río Bogotá que limita con el municipio de Girardot presenta la necesidad sentida de contar con un sistema de alerta temprana por inundación SAT, sin embargo, un insumo indispensable para este sistema son los mapas de eventos de inundación y

mapas de amenaza por inundación, analizando que este insumo provee información valiosa para una reacción inmediata para los entes de Gestión del Riesgo de Desastres y los habitantes en vulnerabilidad, y son la principal herramienta para la elaboración de los mapas de riesgo de inundación y mapas de emergencia de inundación (IDEAM, 2018).

## 1.2 Delimitación del problema

Tendiendo en el aspecto espacial, esta investigación se delimitará al estudio de 1.040 metros aguas arriba tomando como punto de referencia inicial el puente que comunica los municipios de Girardot y Ricaurte, y 1.590 m aguas abajo, es decir, hasta la desembocadura del río Bogotá con el río Magdalena. Considerando, la vulnerabilidad por inundación que presenta este sector, esto se refleja en la Figura 2.

### Figura 3.

*Imagen Sector para el Análisis del Caso.*



Nota: Adaptado de *Sector para el Análisis del Caso* [Imagen], por Google Earth, 2023, Fuente

(<https://earth.google.com/web/search/girardot/>).

De otro lado, estimando la parte temporal, el proyecto será llevado a cabo desde el inicio del periodo académico 2023-1 y se dará término pasados 120 días, dado que, para el modelo digital de elevación es requerida la batimetría al tramo en análisis, seguido a eso, se realiza el estudio por medio de los diferentes software (ArcGIS, QGIS, Google Earth Engine y Hec-RAS), esto con el propósito de obtener el insumo principal para la simulación, los mapas de evento y amenaza de inundación de los zona en estudio.

### **1.3 Definición del problema**

En el tramo del río Bogotá que limita con el municipio de Girardot, existen unas locaciones con diferentes tipos de viviendas y variedad en la clasificación de edades, estipulando que, el lugar geográfico de algunas ubicaciones de residencia se encuentra en vulnerabilidad de inundación, teniendo en cuenta que, esas viviendas fueron construidas dentro de la huella de inundación. Vale la pena mencionar que, el municipio de Girardot – Cundinamarca no cuenta con un sistema de alerta temprana por inundación del río Bogotá.

Frente a lo anterior, cabe destacar que, para la implementación de un SAT es indispensable contar con algunos insumos previos, como lo son los mapas de evento y amenaza de inundación, dado que, con ello se obtienen datos importantes para la alerta en tiempo real a los entes de gestión del riesgo por desastres y los habitantes en afectación. Destacando que, esto es en consecuencia al incremento a las precipitaciones y al movimiento de masas.

### **1.4 Planteamiento del problema**

Teniendo en cuenta la vulnerabilidad de los habitantes del sector con mayor riesgo por inundación, se visualiza una necesidad para la zona en análisis, como lo es la determinación de la huella de inundación, esto con el propósito de identificar los sectores con mayor afectación, por cual surge la siguiente interrogante:

¿Cómo determinar la afectación por inundación en la ribera del río Bogotá en el municipio de Girardot?

## 2 Antecedentes

Para comenzar a indagar acerca de las modelaciones de huella de inundación en una zona, ha sido necesario reconocer que existe información previa que permite ahondar conocimientos, con el propósito de tener una guía a seguir o tomar información que pueda ser relevante para el análisis, igualmente, tener una amplia comprensión del tema a tratar, con el fin de estructurar de una mejor manera la investigación a realizar, teniendo en cuenta lo que otros autores han estudiado al respecto; de tal forma, en este apartado se recopilan estudios, hallazgos, hechos y situaciones que han pasado.

En primer lugar, se tiene que, en diciembre del 2015 fue presentado en la Universidad San Francisco de Quito, el trabajo de grado *SIG aplicado a la zonificación por amenaza de inundación en la cuenca del río Polochic, Alta Verapaz, Guatemala*, por Torres Sam Luis Osmundo, como requisito para optar el título de *Magister en Sistemas de Información Geográfica (SIG)*.

La investigación es un estudio de las zonas de amenaza de inundación de la cuenca del río Polochic en Guatemala, con la finalidad de Identificar que zonas son las más propensas a sufrir amenaza por inundación en dado caso que la altura del cauce del río Polochic aumente, con el propósito de obtener una metodología que considere los factores físico-naturales y socioambientales que inciden en la ocurrencia de inundaciones y definir medidas de mitigación adecuadas para la región. Además, para la recolección de los datos de estudio, se emplearon sensores remotos y SIG, para el procesamiento y análisis de estos, con lo que se obtuvo información como: Pendiente, altura topográfica, geomorfología, datos de precipitaciones máximas y periodos de retorno. Para el análisis de los resultados fue indispensable la utilización de los modelos digitales de elevación (DEM) y la revisión de imágenes satelitales utilizando diferentes sensores, que fueron útiles para el trazado de áreas de inundación. Lo

que permitió que a través de los SIG se determinara el área susceptible a inundación de la cuenca Polochic y las zonas aledañas al río que pueden ser damnificadas en caso de un desbordamiento del río.

Esta investigación ayudo a la comprensión de como los SIG y los sensores remotos son herramientas importantes para el desarrollo del presente trabajo, teniendo en cuenta que, son fundamentales para el análisis de factores relacionados con las inundaciones, es decir son instrumentos indispensables para poder llegar al resultado esperado, y poder determinar las zonas de amenaza por inundación del área estudiada.

También se consultó el trabajo, que, en el 2020, fue presentado por Rivera Mendivelso Gustavo Alexander. Como requisito para optar por el título de *Ingeniero Civil* que se dicta en la facultad de Ingeniería en la Universidad Militar Nueva Granada, titulado *Determinación de la Superficie de Inundación del Río Bogotá en el Sector de la Universidad Militar Nueva Granada - Sede Campus Cajicá*.

Este trabajo establece un análisis estadístico de probabilidades para comprender el escenario de inundación por precipitaciones extremas para diferentes periodos de retorno en la cuenca del río Bogotá a la altura del Campus de la Universidad Militar Nueva Granada, para determinar la vulnerabilidad de la Universidad Militar ante una situación de creciente súbita del nivel del río Bogotá, y reconocer cuales serían las áreas afectadas del campus en dado caso de desbordamiento del río a partir de un modelo hidrológico e hidráulico de la cuenca alta del río Bogotá. Para la recolección de datos de estudio, se emplearon diferentes fuentes como: estaciones meteorológicas del IDEAM, datos suministrados por la Corporación Autónoma Regional (CAR), datos topográficos del campus de la Universidad, batimetría del río, mecanismos de teledetección como las Imágenes Satelitales, (ASTER). Cabe destacar, que para la modelación de la zona de inundación se utilizaron programas como ArcGIS y Hec-Ras. En definitiva, lo que permitió determinar las potenciales zonas de inundación de la universidad confirmando que actualmente el Jarillón no permite que el agua llegue hasta los terrenos del Campus en caso de desbordamiento del río.

El estudio conduce y orienta esta investigación porque el objetivo es similar al del presente trabajo, por consiguiente, contribuye a la ejecución y análisis, permitiendo ser una guía y sustento para la elaboración, también se logró comprender que datos básicos se necesitan para la modelación hidráulica y los cálculos estadísticos que se realizan para la obtención de los caudales máximos proyectando varios tiempos de retorno. En conclusión, esta investigación es una fuente considerable para orientar y así poder llegar a los resultados esperados.

En esta misma labor de investigación y consulta se encontró el trabajo titulado *Modelamiento de la zona de inundación en el margen del río Magdalena en el municipio de Girardot Cundinamarca*, presentado en noviembre del 2022, por Diaz Rafael y Rodriguez Brenda en la facultad de Ingeniería en la Corporación Universitaria Minuto de Dios, como requisito para optar por el título de Ingeniero Civil.

El trabajo tiene como objetivo, realizar un modelamiento de las zonas de inundación en el margen del río Magdalena en el municipio de Girardot, en el departamento de Cundinamarca por medio de las herramientas SIG, ello permitirá hacer un análisis del comportamiento del caudal del río y generar el mapa de la huella de inundación a fin de que este a disposición del municipio, también que sirva para realizar una actualización del POT y como base para prevenir y mitigar que una posible inundación afecte a la gente que habita en la ribera del río.

Por otra parte, los objetivos específicos del estudio están orientados hacia la generación del histograma de caudales máximos y mínimos, para procesar la información recolectada en software especializados y por último generar la cartografía de la zona de estudio. Todo esto, se llevó a cabo gracias a la recolección de los datos suministrados por estaciones cercas al municipio y por la batimetría obtenida, datos que permitieron el modelamiento del caudal del río en periodos de retorno de 10,25,50y 100 años. Para finalizar, se hizo el modelamiento de la huella de inundación en el programa ArcScene para cada uno de los periodos, observando las zonas de amenaza de inundación.



El planteamiento anterior y la experiencia de ejecución, análisis y obtención de datos de la investigación, permite al presente estudio crear una guía de conocimiento acerca el tema trabajado, aportando nuevos conocimientos con respecto al área, para así sustentar de una mejor manera y contribuir al desarrollo de la solución del problema trazado, debido a que cuenta con objetivos que se encaminan a resultados similares, comprobando las diferentes maneras y software que existen para el tratamiento de los sistemas de Información Geográfica.

### 3 Estado del arte

El río Bogotá es alimentado hídricamente por afluentes de menor proporción, ese conjunto crea un sistema natural, teniendo en cuenta lo mencionado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR (2019) donde afirma que, “el río Bogotá nace en el municipio de Villa Pinzón a los 3300 msnm y desemboca en el río Magdalena en el municipio de Girardot a los 275 msnm” (p.4). Siendo un afluente hídrico importante, contemplando el sostenimiento ecológico que este cumple y el empleo que los habitantes ribereños le dan, para sistemas de riego, generación de energía y por su puesto para cubrir necesidades domésticas después del respectivo tratamiento.

#### Figura 4.

Imagen del Río Bogotá.



Nota: Adaptado de “Las cuentas pendientes con el río Bogotá” (párr. 16), por T. Pardo, 2016, *El espectador*, Fuente (<https://blogs.elespectador.com/actualidad/el-rio/las-cuentas-pendietes-con-el-rio-bogota>).

En la actualidad el planeta Tierra está presentando variaciones ineludibles, donde la humanidad está tratando de generar sistemas de alerta temprana (SAT) ya sea por sequías o inundaciones, esto con

el propósito de salvaguardar la integridad de las personas, sin embargo, los cambios climáticos están produciendo deterioros añadidos. Tiene valor mencionar que, según UNEP & GEAS (2012), afirmaron que “existen fisuras e insuficiencias para establecer modelos para desenvolver un sistema global de alerta temprana de peligros múltiples, estimando la evaluación de vanguardia de los sistemas existentes de alerta temprana como el tipo de amenazas ambientales, amenazas hidrometeorológicas, entre otras” (p.136). Con los riesgos que tiene que enfrentar el ser humano en la actualidad se están generando SAT específicos, teniendo en consideración, las características de la ubicación geográfica del terreno.

En otro orden de ideas, está el sistema de alerta temprana (SAT) basado en la comunidad, examinando que, estos pueden estar diseñados a nivel nacional o internacional, donde estos involucran la compilación y el estudio de los datos impulsados por la muestra permitiendo que los mensajes de advertencia ayuden a una reacción pronta ante un peligro, reduciendo la pérdida o el daño resultante. También, “los SAT basados en la comunidad se enfocan en desastres como inundaciones, sequías y deslizamientos de tierra. Las metodologías para el desarrollo de estos SAT se basan en el conocimiento del riesgo, seguimiento, comunicación de alertas y capacidad de respuesta” (Macherera & Chimbari, 2016, p. 2016). Enfatizando que, en la actualidad gran parte de los municipios del territorio colombiano tienen implementado este sistema de alerta temprana.

Ahora bien, desde un contexto más integral donde no solo sea primordial una base sólida científica y técnica, sino también, sea necesaria la intervención de la comunidad en cuestión, reflexionando que, esa está expuesta directamente al riesgo, ya sea que este surja de los peligros naturales o debilidades sociales, y de métodos a breve o extenso lapso. Así como lo expresa Basher (2006), donde afirma que, “los desastres aumentan en número y gravedad, de igual modo, los marcos institucionales internacionales para reducir los desastres se están fortaleciendo bajo la supervisión de las Naciones Unidas, desde el tsunami del Océano Índico del 2004, incrementó el interés en desarrollar

SAT” (p. 2167). Lo anterior, solo con el propósito de prever una reacción inmediata de evacuación o en busca de refugio.

En el mismo sentido, los sistemas de alerta temprana pueden generar un aporte significativo, en pro de minimizar el riesgo, permitiéndole a una muestra de una comunidad vulnerable que reaccione ante cualquier peligro inminente, esto con el propósito de reducir las pérdidas y daños. Sin embargo, en el desarrollo de los SAT se han evidenciado falencias en capacidad tales como monitoreo, pronóstico y equipos de telecomunicación de aviso. Se debe recalcar que, las deficiencias mencionadas anteriormente, deben ser reforzadas y optimizadas localmente, dado que, la población en amenaza por desastres naturales es la primera en tomar las medidas de protección necesarias para salvaguardar la integridad física de las personas en primera medida. Según Maskrey (1997) afirmó que, “Una estructura de alerta efectiva requiere el desarrollo de la capacidad institucional para el análisis de riesgos, alerta, preparación para desastres y comunicación a nivel local, así como el flujo horizontal y vertical de información” (p. 6). Es importante mencionar que, a nivel internacional existen grupos de personas expuestas a diferentes peligros y tienen una conciencia situacional alta frente a las acciones a realizar ante cualquier aviso de reacción, por ejemplo, como sucede en Guatemala, Costa Rica, El Salvador, entre otros.

De igual manera, el profesor Reid Basher (2006), mencionó en un artículo de investigación realizado para la Estrategia Internacional de las Naciones Unidas para la Reducción de Desastres (UNISDR), que “un desastre surge de la combinación del evento o episodio de peligro, las condiciones de vulnerabilidad a ese peligro y la insuficiencia de la capacidad o las medidas para hacer frente al peligro” (p. 2167). También se ilustra que, estadísticamente en la década de 1995 al 2004 se registraron aproximadamente 6000 desastres en todo el mundo, causando consigo alrededor de 900.000 muertos, US\$ 738 millones en pérdidas materiales y cerca de 2500 millones de personas afectadas. Hay que mencionar que, gran parte de la vulnerabilidad de una comunidad es ella misma, es decir, por la falta

aplicación de las políticas de gobierno, estos permiten que familias se ubiquen en zonas de alto riesgo y por la falta de interés en la prevención de desastres.

Frente a lo anterior, el jefe de la Secretaría del Fondo Mundial para la Reducción y Recuperación de Desastres (GFDRR) Francis Ghesquiere y el Dr. Olivier Mahul Líder global, gerente de programas de financiación de riesgos de desastres del Banco Mundial en el año 2010 presentaron un artículo de investigación, mencionan algunas de las falencias que tienen los países en desarrollo y entre estas está la falla en el ordenamiento territorial y la falta de inversión en sistemas de aviso para la prevención de desastres. Por el contrario, ellos mencionan que, las economías avanzadas dedican recursos cada vez mayores a la modernización de la infraestructura vital y generan códigos de construcción, esto con el propósito de cumplir al pie de la letra su programa de ordenamiento del territorio.

De la misma forma, Colombia no es la excepción en el tema de la prevención de desastres según Campos et al. (2012) mencionan que, “La ausencia de una política clara y los antecedentes donde la responsabilidad es asumida por el Estado, desincentivan la ciudadanía y al sector privado al posesionarse en el rol de reducción y el manejo del riesgo, generando grandes costos fiscales” (p. 7). Valorando que, en referencia a lo ocurrido en eventos anteriores en catástrofes naturales, se reducirían de forma significativa las pérdidas, si se aplica más importancia a la prevención de desastres, teniendo en cuenta, lo que está en eso implícito.

En el mismo orden de ideas, las inundaciones constituyen un fenómeno que se genera de forma ágil y es una amenaza constante que representa una de las más frecuentes y con mayor magnitud de daño en el mundo, causan miles de muertes y pérdidas económicas muy altas, a causa de los desastres. (Chandrasekar & Cifelli, 2012, p.389). Es importante aclarar que, las inundaciones son directamente proporcionales a varios factores, uno de esos son las precipitaciones extremas, especificando que, ese fluido llega finalmente a incrementar el caudal de los ríos, quebradas, entre otros.

Finalmente, en el año 2022 el Dr Konstantine P. Georgakakos Gerente del Centro de Investigación Hidrológica en San Diego, California y 8 investigadores más presentaron un artículo de investigación sobre la implementación del sistema de guía de crecidas repentinas en todo el mundo, ellos proponen “el diseño y desarrollo de sistemas operativos para ayudar a los pronosticadores locales en su desafiante tarea de proporcionar alertas anticipadas de inundaciones repentinas en todo el mundo” (p. E665). Merece la pena destacar que, después de varias décadas en estudios para la predicción de incremento de caudales en afluentes, ya se cuenta con una herramienta que proporciona información en tiempo real para más de 60 países, calificando que, con esto le ayudarían a más de 3 mil millones de personas.

## **CAPÍTULO II**

### **4 Justificación**

El análisis y registro de las fuertes precipitaciones que se han originado en los últimos años son el principal motivo para la realización de este proyecto, con el cual se busca generar un aporte tanto al municipio de Girardot como a la población que reside en la ribera de la cuenca baja del río Bogotá. De este modo, se hará el modelamiento de la huella de inundación con respecto al análisis de la dinámica fluvial, mediante la cual se pretende evaluar y generar una prevención y control con respecto a estos eventos naturales. Puesto que, es de vital importancia reconocer que zonas se pueden ver afectadas y que poblaciones son las más propensas a sufrir por la susceptibilidad de inundación.

En relación con la problemática expuesta, el impacto humano del proyecto es el más importante, debido a que este es diseñado para mitigar las afectaciones que sufren las poblaciones por dichos fenómenos naturales, que ocasionan dificultades para las personas que ocupan las llanuras de inundación. De igual forma, el proyecto permitirá estimar las inundaciones en la zona, con el fin de que se pueda tener una alerta, para así mismo proponer alternativas de solución que permitan evitar afectaciones como pérdidas humanas, de bienes materiales y la proliferación de enfermedades.

En cuanto a, el impacto social el proyecto permitirá que las instituciones encargadas del manejo de estos desastres evalúen e identifiquen los terrenos de inundación y otras áreas propensas, para así poder estudiar el grado de impacto que tendrán las zonas adyacentes al río Bogotá en la cuenca baja en el municipio de Girardot. Del mismo modo, la modelación de la huella de inundación permitirá que cualquier persona del municipio este al tanto de que áreas se pueden afectar en dado caso que se presenten lluvias continuas.

No obstante, teniendo en cuenta el impacto tecnológico, gracias a los avances de la Informática y el mundo globalizado, el uso de software se encuentra en diversos espacios de la actividad humana, de ahí nace la necesidad del uso de herramientas digitales y aplicaciones para realizar procesos cotidianos y rutinarios, también se han implementado a gran escala el uso de sistemas de información computacional que funcionan a base de software, que permiten el monitoreo de fenómenos naturales como los niveles de agua en una fuente hídrica superficial, es por ello que para la ejecución de la investigación se implementaran varios software para el modelamiento, con el objeto que este permita que otros estudios se puedan guiar, a fin de generar mejores resultados.

Además, el proyecto tendrá un impacto significativo en la economía local, ya que las inundaciones afectan negativamente a diversas actividades productivas, como la agricultura, la industria y el comercio. Además, este fenómeno natural puede causar daños materiales considerables, como la destrucción de viviendas, vías y otros bienes. Por lo tanto, es importante tomar medidas para prevenir y mitigar los efectos de las inundaciones en la economía local. Por estas razones, es fundamental contar con toda la información previa para identificar las amenazas por inundación, considerando que, los efectos que esto deja en las comunidades son desbastadores, por tal motivo, con el modelamiento se busca determinar las áreas afectadas, y los habitantes que podrían ser perjudicados por el crecimiento del caudal de la fuente hídrica.

Por último, en el impacto ambiental según estudios realizados al río Bogotá se han encontrado elementos tóxicos que se concentran como: cadmio, zinc, plomo, arsénico, cromo, mercurio entre otros...debido a los desechos que diariamente recibe el cauce. Es decir, que estos elementos ocasionan efectos en el medio ambiente, por tal motivo si el río Bogotá se llega a desbordar en la zona delimitada en el presente proyecto, puede generar contaminación en el suelo, degradación y erosión de los mismos, esto quiere decir que, aumenta el riesgo hidrológico, como deslizamientos de tierras, inundaciones, pérdidas en la biodiversidad y minimiza la productividad agrícola, todo esto, debido a que, por la contaminación del agua del río altera la capa superficial del suelo.



## 5 Objetivos

### 5.1 Objetivo General

Realizar el mapa de amenaza de inundación por medio del estudio hidrológico de la cuenca baja del Río Bogotá en el municipio de Girardot, departamento de Cundinamarca por medio de las herramientas SIG.

### 5.2 Objetivos Específicos

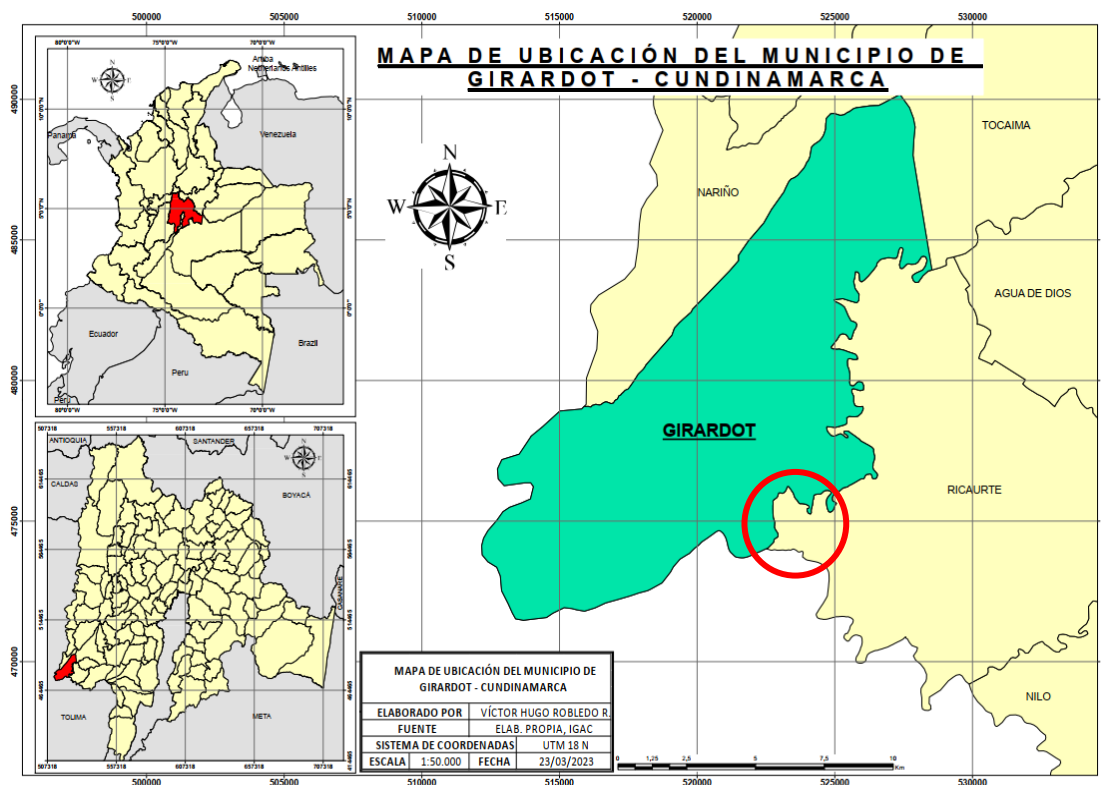
- Recopilar los datos de caudales máximos y mínimos de la zona del proyecto.
- Realizar la modelación en el software (ArcGIS y Hec-RAS) del cauce del río Bogotá en análisis.
- Elaborar un mapa de la representación espacial, de los niveles de amenaza por inundación de la zona en estudio.

## 6 Localización Geográfica del Proyecto

La zona de análisis comprende 1.040 metros aguas arriba del cauce del río Bogotá hasta las coordenadas geográficas, Latitud Norte 4°18'30.76" y Longitud Oeste 74°47'22.52", tomando como punto de referencia el puente ubicado en coordenadas geográficas, Latitud Norte 4°18'5.03" y Longitud Oeste 74°47'40.82", señalando que, este comunica los municipios de Girardot y Ricaurte, y 1.590 m aguas abajo, es decir, hasta la desembocadura del río Bogotá con el río Magdalena en coordenadas geográficas, Latitud Norte 4°17'18.25" y Longitud Oeste 74°47'48.19".

**Figura 5.**

*Mapa de ubicación geográfica del municipio de Girardot - Cundinamarca.*



Fuente Propia.

Asimismo, esta zona es de clima tropical y según CLIMATE-DATA.ORG (s.f) afirma que “El clima aquí se clasifica como Am por el sistema Köppen-Geiger”, dicho de otra manera, la clasificación corresponde a un clima tropical húmedo o Monzónico. También, data que la temperatura en ese

terruño es en promedio de 24.8 °C y que, en un año, la precipitación es 4493 mm. Además, se tiene como dato estadístico que el mes más seco es enero, con 138 mm de lluvia. La mayor cantidad de precipitación ocurre en mayo, con un promedio de 686 mm, que febrero es el mes más cálido del año y la temperatura promedio es 28.5 °C y las medias más bajas del año se producen en julio, cuando está alrededor de 23.8 °C. (CLIMATE-DATA.ORG, s.f).

## **7 Factibilidad**

El presente trabajo tiene como finalidad realizar la modelación de la huella de inundación de la cuenca baja del río Bogotá en la zona de estudio en el municipio de Girardot - Cundinamarca, teniendo como referencia que el tramo de estudio cuenta con una longitud de 2.63 Km, este, se realiza con el objetivo de saber la zona que se puede llegar afectar en dado caso que el cauce del río aumente, y comprender como puede crecer el afluente en unos periodos de retorno establecidos, la modelación del mapa de amenaza de inundación es un proyecto factible y altamente relevante en la actualidad, especialmente en áreas propensas a inundaciones y desastres naturales.

Por otro lado, es importante llevar acabo esta investigación puesto que, el tramo escogido para el análisis en una gran parte de su área se encuentra habitado en zonas de ronda hídrica, lo que ocasiona una problemática que debe ser tratada; hasta el momento no ha ocurrido ningún evento que perjudique a las personas que viven allí, pero cabe resaltar que, cada día se están presentando más precipitaciones lo que puede ser una amenaza. Es por ello, que efectuar la investigación es de gran valor no solo para adquirir nuevos conocimientos si no por el alcance que puede llegar a tener, dado que sería un instrumento que se puede proporcionar al municipio de Girardot con la información que se obtenga en los resultados, para que esta se tenga como referencia y se pueda efectuar medidas preventivas para que la comunidad que habita allí no sufra más adelante afectaciones. También, puede ser útil para la

sociedad porque la representación del mapa de amenaza de inundación del cauce puede servir como alerta y advertir que están habitando en una zona riesgosa.

Dentro de la viabilidad técnica, hay que tener en cuenta que para llevar a cabo el proyecto es fundamental el uso de las SIG, donde se maneja una amplia variedad de software especializados que permiten obtener información geográfica para modelar el comportamiento del agua en diferentes escenarios y generar mapas de inundación precisos. Los recursos tecnológicos disponibles para la ejecución del proyecto son: ArcGIS, Hec-Ras, QGIS, Global Mapper y Google Earth Engine, con los programas anteriormente mencionados, se puede efectuar el análisis correspondiente para poder llegar al resultado esperado. Por consiguiente, se deben tener conocimientos básicos para el manejo de las aplicaciones que permitan realizar el análisis de los datos geográficos, la programación y diseño de estos.

En cuanto a, la viabilidad económica, no es necesario contar con un presupuesto de alta cuantía, dado que, los autores son los encargados de ejecutar todo el procedimiento para la obtención del resultado final, lo que, si hay que tener en cuenta es el pago de cursos online de aprendizaje sobre las SIG, que ayuden a capacitar para adquirir los conocimientos más a profundidad del uso y aplicación de los sistemas de Información geográfica. Teniendo en cuenta esto, si es factible económicamente realizar el estudio que se desea.

Otro aspecto, es la viabilidad operativa, en el cual el equipo de trabajo está en la capacidad de llevar a cabo la implementación del estudio, con los conocimientos adquiridos en el transcurso del proceso de pregrado y las capacitaciones autónomas sobre el tema a tratar. Los recursos necesarios para obtener los resultados esperados son los programas básicos para el modelamiento de la zona, una computadora funcional que tenga gran capacidad de almacenamiento e internet. Por lo demás, es necesario contar con tecnología adecuada para procesar y analizar los datos recopilados.

Acerca de, la viabilidad temporal, es un aspecto importante y determinante a la hora de hacer la investigación, se cuenta con un semestre para ejecutarla, es factible si se considera un plan de trabajo riguroso y con buen uso del tiempo, por ello, se establece un cronograma de trabajo detallado, incluyendo las fechas límites para cada etapa del proyecto, se organiza la información y el material recolectado, se contempla el apoyo del tutor el cual brindara la orientación y retroalimentación del trabajo.

En conclusión, los principales aspectos que hacen factible la investigación son: el fácil acceso a capacitaciones sobre los sistemas de información geográfica, para los softwares a utilizar se encuentran licencias gratuitas por un tiempo y con una correcta organización se puede finalizar la investigación en el tiempo determinado. A su vez, es un proyecto que tiene una gran importancia y relevancia para el campo de estudio, puesto que, es una herramienta que puede ayudar a la sociedad, debido a que va a proporcionar información que va a contribuir en la toma de decisiones, la seguridad pública y a tomar medidas preventivas en la zona.

## **8 Marco teórico**

### **8.1 Inundaciones**

Las inundaciones se definen como “Un fenómeno natural provocado por la persistencia de las lluvias en una región determinada que resulta en la anegación de vastas zonas y en el desbordamiento de corrientes de aguas superficiales, arroyos, quebradas, elevación del nivel freático, etc.” (Velis, et al, 1991, como se citó en Sedano, R. 2012).

#### **8.1.1 Inundaciones como recursos**

Tiempo atrás, las primeras civilizaciones utilizaban los aspectos beneficiosos de las inundaciones, principalmente para la fertilización natural de los campos agrícolas. En Colombia, las provincias de Panzenú, Zenufaná, y Finzenú eran comerciales, Panzenú era la región productora de

alimentos, Zenufaná se concentraba en la producción aurífera y en la minería, y Finzenú producía la elaboración de textiles y artesanías. Además, la cultura Zenú tenía la capacidad de adaptarse a su entorno y beneficiarse de ello, por lo que los Zenú tomaron las inundaciones como un beneficio y se favorecieron de ellas para las producciones agrícolas, sin que las inundaciones los afectaran, lo cual se logró por la construcción de un sistema hidráulico compuesto por canales de drenaje para controlar las inundaciones. Este sistema permitía que los Zenú vivieran en esa zona sin que la creciente del agua significara una amenaza para ellos, si no que esta era provechada para abonar y fertilizar la tierra, aumentando la producción agrícola (IDEAM, 2018, p. 14).

### **8.1.2 Inundaciones como amenazas**

El incremento periódico del caudal de los ríos genera efectos negativos para las poblaciones, sobre todo las que viven cerca a los afluentes. En Colombia en los años 2010 y 2011 se presentó un evento que provocó una gran cantidad de inundaciones en el país ocasionado por un fenómeno que fue denominado “La niña” el cual se caracterizó por irregularidades en las precipitaciones más que todo en las regiones Andina, Caribe y pacífico, ocasionando inundaciones con una magnitud mayor a los registros históricos recientes. Este suceso afectó amplias zonas del país y tuvo consecuencias económicas, sociales y ambientales severas. (IDEAM, 2018, p. 17)

Asimismo, durante septiembre 2010 y mayo 2011 el número de emergencias fue mayor con 1.233 inundaciones un 55,6%, 778 deslizamientos con un 35,1%, 174 vendavales y 24 avalanchas. Por añadidura, según el Registro Único de Damnificados (RUD) el número de personas afectadas en ese evento invernal fue de 3'219.239, mencionando que, 2'350.207 equivalen al 73% de individuos damnificados y 869.032 son afectados que corresponden al 27%, lo que significa el 7.0% de la población nacional. (IDEAM, 2018, p.18)

### **8.1.3 Tipos de Inundaciones**

Existen 3 tipos de inundaciones: Naturales, inducidas y antrópicas.

### **8.1.3.1 Inundaciones Naturales**

Dentro de las inundaciones naturales hay 2 tipos:

#### **8.1.3.1.1 Terrestres**

Puede ser debido al desbordamiento de corrientes fluviales o bien por el encharcamiento de zonas planas o endorreicas sin vinculación con la red fluvial, tanto por acumulación de la precipitación sin que circule sobre la superficie terrestre (precipitación in situ, sobrealimentación de un lago) como de origen hidrogeológico asociado a la elevación de la superficie freática sobre la superficie del terreno. (IDEAM, 2018, p. 20)

#### **8.1.3.1.2 Litorales o Costeras**

Las causas pueden relacionarse con aumentos del nivel del agua de mares y lagos durante tormentas, fenómenos ciclónicos atípicos (huracanes, tifones, tormentas tropicales, ciclones, tornados), fuertes variaciones mareales y barométricas, o como consecuencia de tsunamis. En ocasiones, estos fenómenos costeros se producen combinados, ayudados o acelerados por el hundimiento progresivo de las zonas costeras, bien de forma natural (subsistencia) o artificial (sobrepeso de construcciones, sobreexplotación de acuíferos, aprovechamiento de recursos minerales, como hidrocarburos, diapiros salinos, etc.). (IDEAM, 2018, p. 20)

### **8.1.3.2 Inundaciones Inducidas**

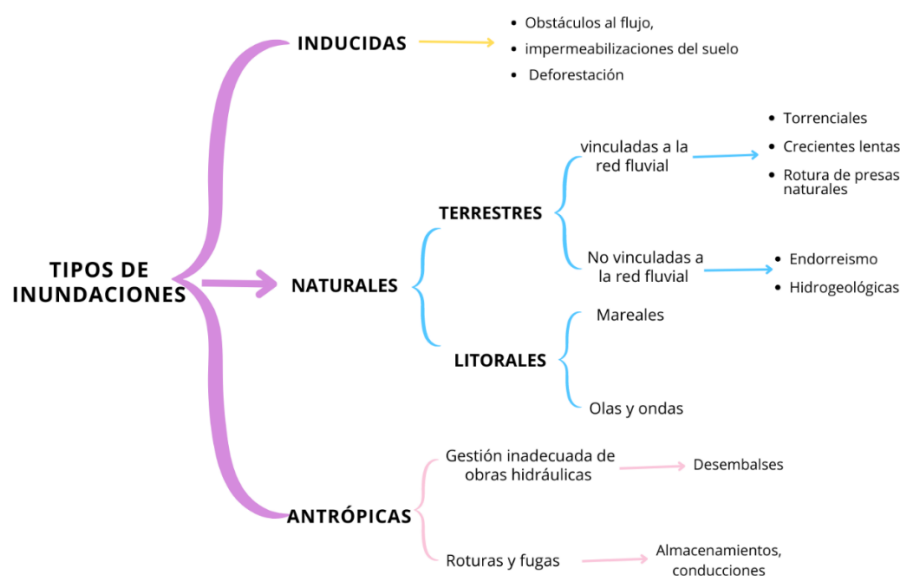
Son aquellas que se desarrollan por error o por mal manejo del hombre.

#### **8.1.3.3 Inundaciones Antrópicas**

Este tipo de inundación está dada por las actividades producidas por el hombre que se han ido generando durante el tiempo como la rotura de presas, invasión de los cauces por construcciones, gestión inadecuada de obras hidráulicas, lo que provoca una disminución en la sección útil del cauce.

Figura 6.

## Clasificación de las inundaciones



Nota: Adaptado de *guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación* [Imagen], por IDEAM, 2018,

Fuente([http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA\\_METODOLOGICA\\_MAPAS\\_INUNDACION\\_MARZO\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf)).

## 8.2 Tipos de Mapas de Inundación

Según el IDEAM (2018) existen una serie de mapas de inundación cuyo objetivo principal es obtener información, ya sea de eventos pasados o de posibles eventos que puedan suceder, generando una extensión probable de inundación, estos mapas permiten tener información que puede ser de gran ayuda para la gestión integrada de inundaciones, con el fin de estar alertas a cualquier situación que se pueda presentar, del mismo modo son fundamentales para reconocer que áreas son más susceptibles a estos eventos.

De la misma manera, es posible elaborar distintos tipos de mapas de inundación, todo depende de la información que se tenga y el objetivo a llevar a cabo, los tipos de mapas son:



### **8.2.1 Mapa de Susceptibilidad de Inundación**

Este tipo de mapas se utiliza para realizar una planificación de emergencias y gestión del riesgo, para hacer programas de inventario de inundaciones y ejecutar una planeación nacional o regional. Igualmente, la escala de este mapa puede estar entre 1:500.000 y 1:100.000. El mapa de susceptibilidad de inundación indica:

El tipo de inundación (lenta o súbita) y los límites externos para un evento extremo elaborado por la superposición de áreas potencialmente inundables y los usos del suelo u otros parámetros que representen daño potencial. Por tanto, la zona afectada es una superposición de mapas topográficos, imágenes de satélite o mapas de uso del suelo. (IDEAM, 2018, p. 22)

### **8.2.2 Mapa evento de Inundación**

Este tipo de mapas se utiliza para concientizar a las comunidades de los eventos de inundaciones pasadas ocurridas en una determinada área, con el propósito de demostrar que es una zona propensa a inundación, también se utiliza para validación de modelos hidrológicos e hidráulicos para mapas de amenaza de inundación. Además, la escala de este mapa puede estar entre 1:5.000 a 1:100.000. El mapa de evento de inundación indica:

Están basados en eventos recientes o pasados, cuya información del evento puede ser obtenida de varios tipos de fuentes, tales como documentos históricos o imágenes de satélite debidamente interpretadas y verificadas. Dichos mapas incluyen límites de la inundación, nivel de inundación registrado, caudales, profundidades y secciones transversales. (IDEAM, 2018, p. 23)

Para la elaboración del mapa de evento de inundación se adquiere información de sensores remotos que permiten identificar la extensión de la inundación a partir del procesamiento y análisis de las imágenes disponibles con las mediciones realizadas en campo para establecer otros atributos de alto interés para la caracterización del evento de inundación como altura de

lámina de agua, tanto en estaciones hidrométricas de control como en sitios de interés, así como velocidad del flujo de agua y tiempo de arribo en los casos que las características del evento lo permitan. (IDEAM, 2018, p. 32)

### 8.2.2.1 Características básicas de los insumos para elaborar un mapa de evento de inundación.

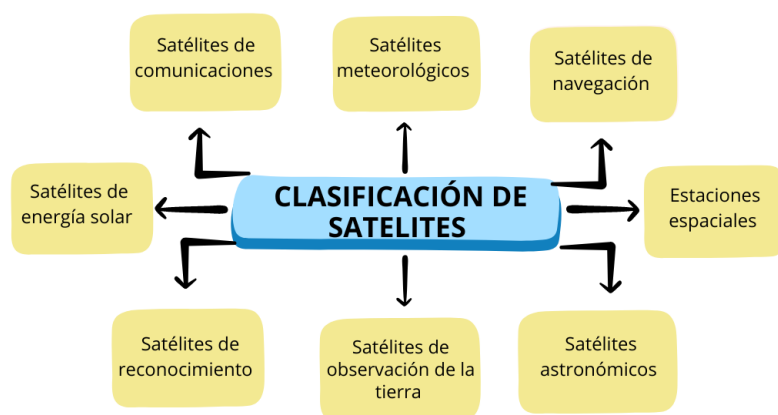
#### 8.2.2.1.1 Sensores Remotos

Los sensores remotos sirven para obtener información de la superficie terrestre mediante imágenes capturadas por un sensor de un satélite artificial, las cuales son un insumo para la identificación y monitoreo de emergencias naturales como: inundaciones, deslizamientos, incendios forestales entre otros

Por un lado, existen diferentes tipos de satélites cada uno utilizado para una tarea específica, estos se clasifican en:

#### Figura 7.

*Clasificación de satélites.*



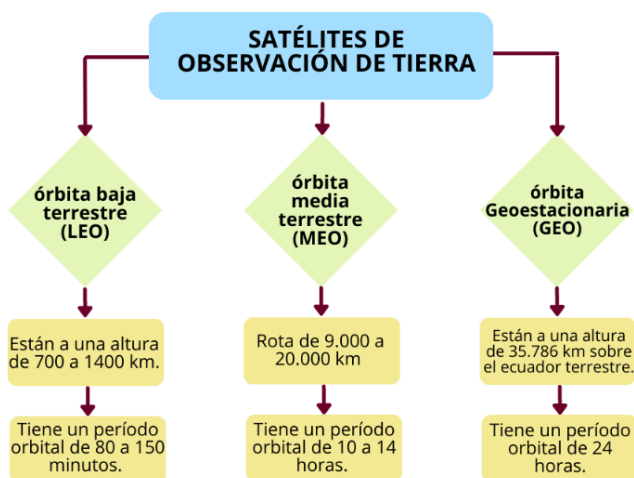
Nota: Adaptado de *guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación* [Imagen], por IDEAM, 2018,

Fuente([http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA\\_METODOLOGICA\\_MAPAS\\_INUNDACION\\_MARZO\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf)).

Teniendo en cuenta la clasificación de los satélites y los diferentes tipos que existen, para la elaboración de los mapas de inundación son utilizados los satélites de observación de tierra, donde también cuentan con una clasificación la cual depende de la órbita y se dividen según su altura:

**Figura 8.**

*Clasificación de satélites de Observación de tierra*



Nota: Adaptado de *guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación* [Imagen], por IDEAM, 2018,

Fuente([http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA\\_METODOLOGICA\\_MAPAS\\_INUNDACION\\_MARZO\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf)).

### **8.2.2.1.2 Imágenes Ópticas**

Son las imágenes que suministran los sensores pasivos y se caracterizan por recibir radiación emitida o reflejada por la Tierra, estas imágenes se ven afectadas por las condiciones meteorológicas especialmente la presencia de nubes. (IDEAM, 2018, p. 33)

### **8.2.2.1.3 Imágenes de Radar**

Un sistema de radar posee tres funciones primarias: (1) Emite señales de microondas (en sus principios fueron de radio, de ahí su nombre) hacia una escena. (2) Recibe la fracción de energía reflejada por la escena en su misma dirección y (3) Observa la intensidad (detección) y el retardo de tiempo (distancia) de las señales o eco de retorno. (IDEAM, 2018, p. 34)

Las imágenes de radar están compuestas por pixeles, cada uno de los cuales representa el eco proveniente de un área correspondiente sobre el terreno: zonas oscuras en la imagen representan bajo retorno de energía hacia el radar, zonas brillantes corresponden a alto retorno. (IDEAM, 2018, p. 35)

### **8.2.3 Mapa de amenaza de Inundación**

Este tipo de mapa brinda la información de las inundaciones que pueden ocurrir en un área determinada, con información básica como: la extensión de la inundación, la profundidad del agua, la velocidad del flujo y la propagación de la inundación. Por tal razón, la realización del mapa de amenaza de inundación es fundamental para obtener información de un evento que probablemente puede ocurrir, con el fin de mitigar y reducir desastres naturales, que permiten tomar decisiones con respecto a la gestión del riesgo de inundaciones. La escala de estos mapas es de 1:2.000 a 1:25.000, de este modo, el propósito y los usos de los mapas de amenaza de inundación son:

Proporcionar información básica para desarrollar la orientación técnica sobre varios problemas de manejo de llanuras de inundación y ayudan a las diferentes partes interesadas, incluyendo los gobiernos locales a tomar decisiones en la gestión de inundaciones. Por tanto, son importantes para la evaluación del riesgo de inundación, el desarrollo de planes de mitigación de inundaciones, la preparación de esquemas de manejo integral del riesgo de inundación y en particular para la planificación urbana local. Los mapas de amenaza de inundación forman la base para los mapas de riesgo de inundación, mapas de emergencia de inundación y otros mapas relacionados. (IDEAM, 2018, p. 24)

Por un lado, para la realización de este tipo de mapa se debe hacer un modelo de tipo hidrológico e hidráulico, con el objetivo de saber el comportamiento hidrológico del afluente y el comportamiento hidrodinámico de la lámina de agua, para si obtener los mapas de velocidad y profundidad del agua. Esto es fundamental para la elaboración del mapa de amenaza de inundación.

Para la elaboración del mapa de amenaza por inundación se deben llevar a cabo los siguientes pasos:

### **8.2.3.1 Obtener información gráfica de un evento ocurrido**

### **8.2.3.2 Modelación Hidrológica**

Para la ejecución del mapa de amenaza por inundación “se debe determinar el caudal de crecienta de crecienta para el período de retorno deseado”. (IDEAM, 2018, p. 38)

Es importante establecer un modelo que permita visualizar los sitios inundables durante la época de lluvias. Identificar las zonas de recarga es importante debido a que desde ahí se puede valorar la importancia en la preservación de zonas boscosas, la cantidad de precipitaciones a lo largo de la cuenca y como estas inciden en la ocurrencia de inundaciones. (Torres, 2015, p. 22)

Para la realización de la modelación hidrológica se debe tener en cuenta los siguientes casos y determinar en cual de todos esta la investigación, con el fin de emplear esa metodología. Los casos se clasifican cuando se cuenta con:

#### **8.2.3.2.1 Con registros de caudal en el sitio de interés**

En el caso de contar con una estación limnimétrica o limnigráfica en el sitio de interés con datos históricos de caudal máximo instantáneo, se toman sus valores máximos instantáneos anuales, se ajustan a distribuciones probabilísticas conocidas, y se hacen inferencias estadísticas. (IDEAM, 2018, p. 39)

#### **8.2.3.2.2 Con registros de caudal en la misma corriente, pero no en el sitio de interés:**

##### ***Transposición de datos del caudal***

Cuando la estación limnimétrica o limnigráfica se encuentre en la misma cuenca hidrográfica pero no en el sitio de interés se pueden transferir caudales máximos instantáneos anuales de diferentes periodos de retorno de esta estación hasta el sitio de interés, mediante relaciones de áreas de drenaje. (IDEAM, 2018, p. 39)

### **8.2.3.2.3 Con registros de caudal en la misma cuenca, pero no en el sitio de interés:**

#### **Análisis regional de caudales máximos instantáneos anuales**

Cuando se cuenta con varias estaciones hidrométricas con datos de caudales máximos instantáneos anuales históricos en una región de cierta magnitud e hidrológicamente homogénea, se puede aplicar el método del análisis regional de frecuencias de esta variable hidrológica. Para ello, según el IDEAM (2018), prosigue la siguiente metodología:

- a) Se calculan los valores de caudal para diferentes periodos de retorno en cada una de las estaciones hidrométricas.
- b) Se calcula la relación generalizada para la región, entre el caudal con periodo de retorno de 2.33 años  $Q_{2.33}$  (caudal promedio en la distribución Gumbel) y el área de drenaje  $A$ , con base en los datos de cada una de las estaciones hidrométricas.  $Q_{2.33} = f(A)$
- c) Para cada estación, se calcula la relación entre el caudal para cada periodo de retorno  $T$  definido (dando valores de periodos de retorno iguales a 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años) y el caudal con periodo de retorno de 2.33 años  $Q_T/Q_{2.33}$ .
- d) Se debe realizar un ensayo de homogeneidad estadístico, con el fin de asegurar que los datos obtenidos correspondan a una región hidrológicamente homogénea. Si el resultado de una de las estaciones queda por fuera de la franja de confianza del referido ensayo, se debe eliminar tal valor
- e) Se calcula el valor promedio o el valor mediano de la relación  $Q_T/Q_{2.33}$  para la región para los diferentes periodos de retorno considerados, con base en los valores individuales para cada estación.
- f) Para una estación no aforada en la región con un área de drenaje  $A$ , el valor del caudal con un periodo de retorno determinado  $Q_T$  se calcula estableciendo, en primer lugar, el valor

del Q2.33 con la relación generalizada  $Q2.33 = f(A)$  para la región y, luego, utilizando la relación generalizada QT/Q2.33 para la referida región.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, esta es la metodología por utilizar en la presente investigación, debido a que se tienen registros en la cuenca, pero no en el sitio de interés, cabe destacar que se seguirán cada uno de los pasos mencionados para poder obtener el mapa de amenaza de inundación.

#### **8.2.3.2.1 Sin registros del caudal: Modelos lluvia escorrentía**

“Son utilizados cuando no existe la posibilidad de obtener medidas directas de caudales de drenaje en las cuencas hidrográficas” (IDEAM, 2018, p.40).

#### **8.2.3.3 Modelación Hidráulica**

Es la modelación grafica que permite estimar parámetros como: profundidad, velocidad y energía de una cuenca, con el fin de analizar el comportamiento hidráulico del afluente, para así poder simular las condiciones del flujo. De tal forma que, existen diferentes tipos de modelos (1D, 2D, 3D) y diversos softwares para la ejecución de estos. Según Cárdenas et. al (2017) “para la determinación de un apropiado modelo como primera medida se debe conocer cuál es el objetivo de la modelación y la información de entrada que se requiere” (p. 36).

Los programas computacionales más utilizados para la modelación grafica de inundación son:

- Hec-HMS: Sistema de Modelación Hidrológica
- QGIS: Quantum GIS
- Hec-RAS: Centro de Ingeniería Hidrológica y Sistema de Análisis de Ríos
- ArcGIS

### 8.2.3.4 Modelo digital de elevación (DEM)

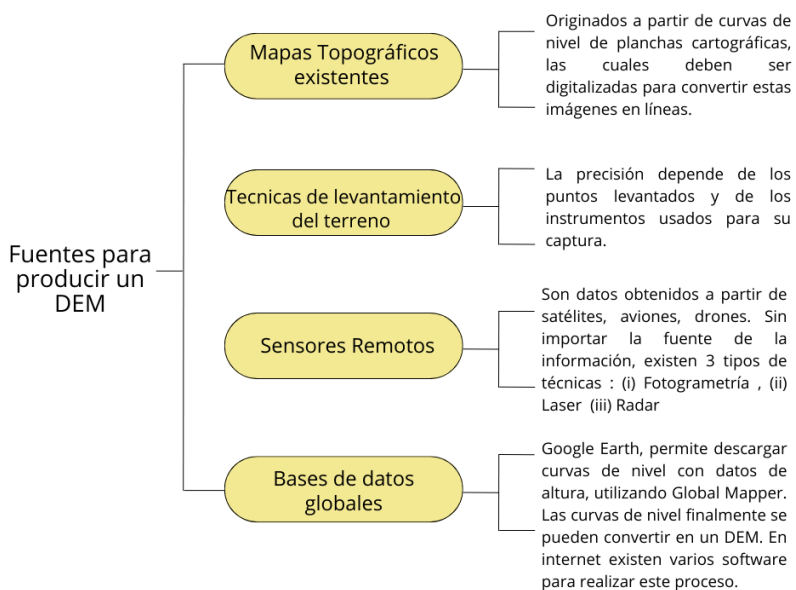
El modelo digital de elevación es una representación gráfica de un valor numérico de altitud con respecto al nivel del mar de un terreno, los datos que brindan los DEM son necesarios para medir las características de la superficie del suelo y estudiar sus propiedades.

Sanabria, W. (2021) define el DEM como “Un modelo que representa visualmente los valores de la altura y forma de relieve de la zona de estudio. Se puede identificar o representar por medio de mediciones topográficas, visualización con drones y mediante el registro de satélites” (p.11).

Varias fuentes de datos se aplican para generar el DEM y así generar precisión vertical, tal como se describe en la figura 7:

**Figura 9.**

*Fuentes para producir un DEM*



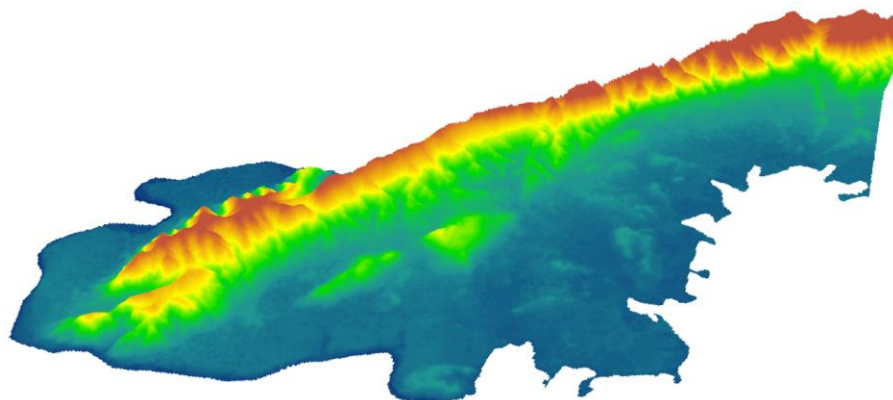
Nota: Adaptado de *guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación* [Imagen], por IDEAM, 2018,

Fuente([http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA\\_METODOLOGICA\\_MAPAS\\_INUNDACION\\_MARZO\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf)).



**Figura 10.**

*Modelo Digital de Elevación del Municipio de Girardot con Rampa de Colores*



Fuente Propia.

Con respecto a lo anterior, la Fuente a utilizar en el análisis del DEM, son las bases de datos globales, para lo cual se empleará el servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), Google Earth Engine y Alaska Satellite Facility (ASF).

#### **8.2.4 Mapa de Zonificación de amenaza por inundación**

Este tipo de mapas muestran la clasificación de las zonas de inundación como: amenaza baja, media y alta. Los planificadores se ocupan de localizar áreas con una exposición limitada a los peligros para diversos usos, tales como, los asentamientos humanos, las industrias, la infraestructura y la agricultura. La planificación del uso de la tierra no influye en los riesgos existentes, pero se pueden inducir cambios en el uso de la tierra. (IDEAM,2018)

#### **8.2.5 Mapa de vulnerabilidad de inundación**

Un mapa de vulnerabilidad de inundaciones indica el daño potencial a personas, bienes, infraestructura y actividades económicas expuestas a inundaciones, directa o indirectamente. Los mapas de vulnerabilidad proporcionan la base para mapas de riesgo de inundación que apoyan las decisiones de gestión de riesgo de inundación y son la entrada necesaria para la planificación de emergencia. Estos

mapas muestran las posibles consecuencias de un evento de inundación en la actividad humana.

(IDEAM,2018)

### **8.2.6 Mapa de riesgo de inundación**

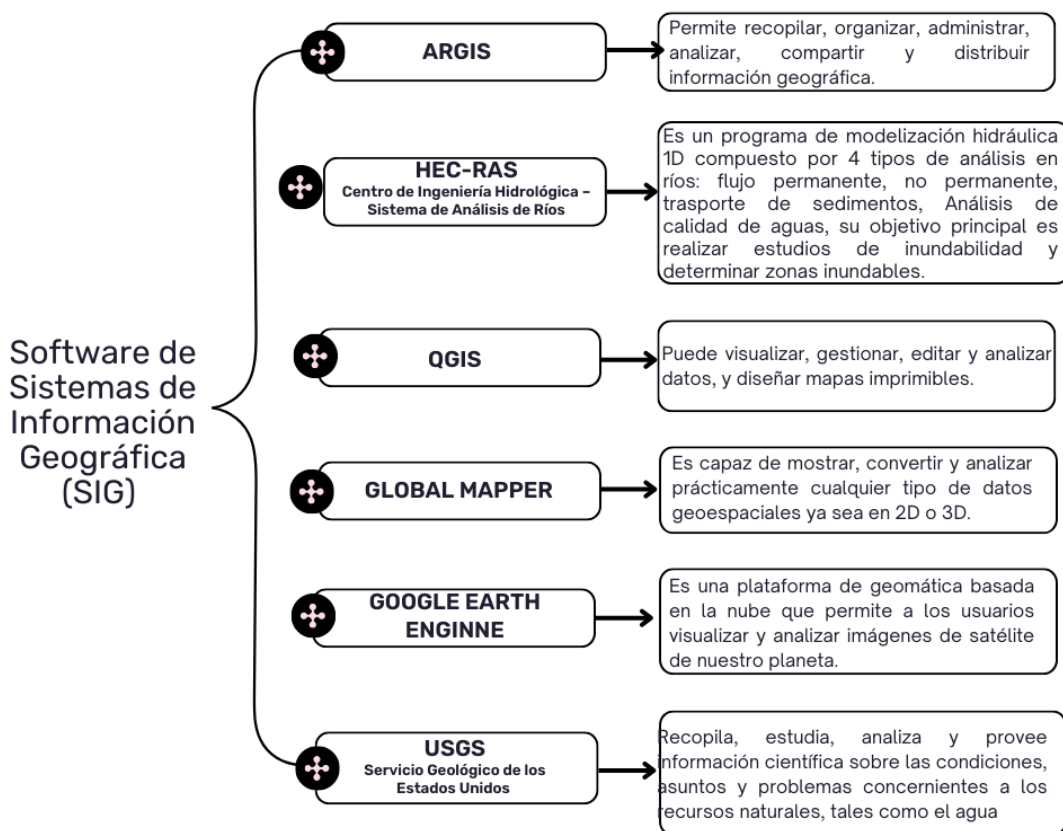
Los mapas de riesgo de inundación integran las amenazas potenciales con las vulnerabilidades de actividades económicas cuando se exponen a inundaciones de un rango de probabilidades. Los mapas de riesgo son una integración de mapas de amenazas y mapas de vulnerabilidad, mostrando el daño medio por unidad de área.

### **8.3 Software y Programas**

En la actualidad, los programas de sistemas de información Geográfica (SIG) cada vez son mayores y más accesibles, dado que en internet se pueden encontrar un sinnúmero de software dependiendo de la necesidad y de la información que se requiera, puesto que permiten analizar y representar información geográfica de un terreno. En la siguiente figura se especificarán algunos softwares y una breve descripción de su utilidad.

Figura 11.

Software de sistemas de Información Geográfica (SIG)



Nota: Adaptado de *Análisis De Riesgo Hidrográfico Por Crecidas En La Desembocadura De La Quebrada Cay*

[Imagen], por Cruz & Cheng, 2019, Fuente

(<https://repositorio.unibague.edu.co/server/api/core/bitstreams/f49e37bb-ecb6-4235-b1e7-d2237c161f46/content>).

#### 8.4 Marco Conceptual

Aproximación al concepto de Sistemas de Información Geográfica (SIG) el cual hace referencia a la obtención de datos geográficos a través de diferentes fuentes, como fotografías aéreas, mapas, satélites entre otros, donde se almacenan en una base de datos que permite la gestión de la información de manera integrada, estas herramientas tecnológicas se han convertido esenciales, ya que permiten un trámite más eficiente de los recursos. Según Alvarado (2014) los SIG son aplicados para

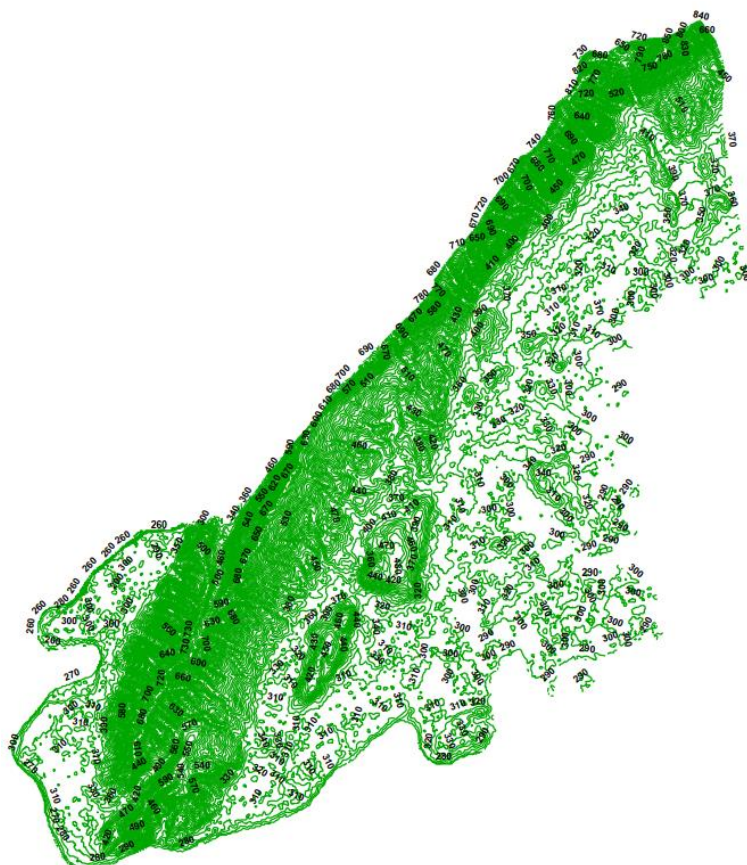
“Identificar cambios al hacer análisis simultaneo de mapas producidos en diferentes fechas sobre el mismo tema, con la tecnología de las computadoras permite el examen de grandes áreas y con una creciente cantidad de datos” (p.18). Con respecto a la opinión de Torres (2015) los SIG consisten en “Un sistema de software con la capacidad de capturar, almacenar, analizar y visualizar información geográfica. La ventaja en la utilización es la aplicación y procesamiento de datos, donde pueden realizar actualizaciones de acuerdo con el tipo de investigación” (p.26).

En el mismo sentido, aspectos clave del concepto Estaciones Hidrológicas, es una estación instalada en la ribera de una afluente, con el fin de registrar y obtener la medición del nivel del caudal regularmente. De este modo, las estaciones hidrológicas “tienen por objeto la obtención de los diferentes caudales en sitios específicos, necesarios para conocer los rendimientos hídricos de las cuencas, estas se conforman por estaciones: limnimétricas; limnigráficas y de medición de caudales o aforos” (Murcia,2014, p.50).

Teniendo en cuenta la noción de curvas de nivel, son un instrumento útil en la cartografía y topografía, que permiten representar de manera grafica la variación de un terreno. Estas curvas se representan en mapas topográficos donde la distancia entre las líneas de curva de nivel indica la inclinación del terreno, las líneas más juntas indican zonas de terreno empinado y las líneas más espaciadas indican terrenos más planos. Samet (2012) refiere que las curvas de nivel “son líneas imaginarias que unen puntos de igual elevación en la superficie de la tierra por encima o por debajo de una superficie de referencia como el nivel medio del mar”. Adicionalmente, Florez & López (2018) señala que una curva de nivel “Es aquella línea que en un mapa une todos los puntos que tienen igualdad de condiciones, normalmente altitud sobre el nivel del mar o profundidad, (elevación). Son el resultado de la intersección del terreno con una serie de planos horizontales” (p.11).

**Figura 12.**

*Curvas de Nivel con intervalos de 10 m del Municipio de Girardot*



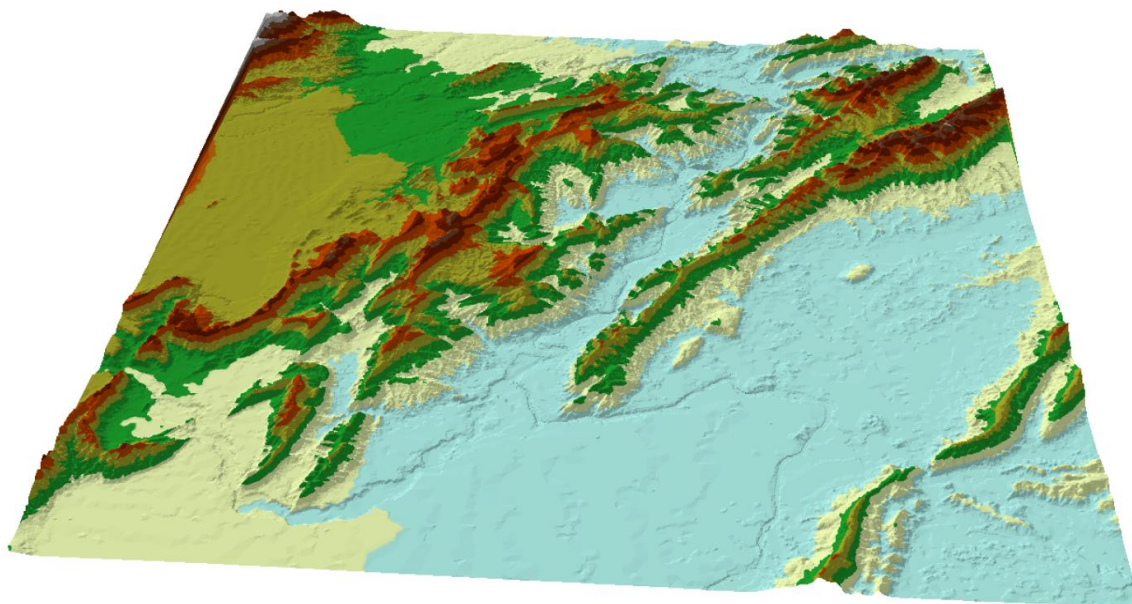
Fuente Propia.

En el mismo sentido, la Red Irregular de Triángulos (TIN), permite la representación y análisis de la superficie terrestre en una variedad de campos, este modelo es importante para el manejo de información espacial en la actualidad. Desde el punto de vista de Yang & Shi (2005) los modelos (TIN) son “Un modelo popular para representar modelos en sistemas de información geográfica (GIS), gráficos por computadora y realidad virtual (VR) porque tiene una estructura de datos simple y se puede representar fácilmente usando hardware de gráficos común”. Por otro lado, lo señalado por Ali & Mehrabian (2009) los modelos TIN son “Una representación en cuadrícula de la superficie del terreno adoptada en numerosos sistemas de información geográfica y cartografía. La creación de un TIN implica,

elegir puntos de muestra, conectar puntos en triángulos y modelar la superficie dentro de cada triángulo”.

**Figura 13.**

*Red Irregular de Triángulos de la Zona de Estudio, en Vista 3D.*



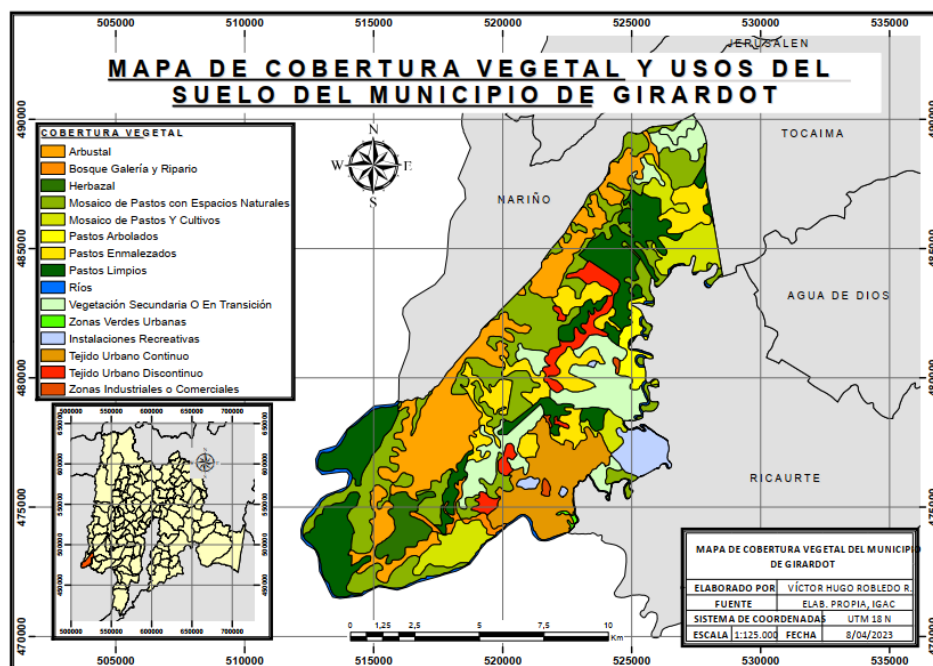
Fuente Propia.

Desde otro punto de vista, aproximando al concepto de Mapas de Cobertura Terrestre (LCM), estos permiten visualizar y analizar el uso del suelo, la distribución vegetal, la presencia de cuerpos de agua entre otros, también, pueden ser utilizados para la gestión de recursos hídricos, además, los LCM se realizan a partir de imágenes satelitales para identificar los diferentes tipos de cobertura terrestre en un área. Teniendo en cuenta lo que define Cea & Álvarez (2022) “Los datos de cobertura del suelo son necesarios para la estimación de inundaciones con el fin de caracterizar los procesos hidrológicos como la resistencia al flujo y la evaporación. Hay varios productos de datos de cobertura terrestre disponibles de forma gratuita”. Con respecto a la opinión de T.S., C., & Bhagyanathan (2022) sobre los mapas LCM señalan que estos “ayudan a comprender el grado de crecimiento urbano, modelar la calidad del agua,

monitorear las pérdidas de humedales, los impactos potenciales del aumento del nivel del mar, clasificar las áreas para la conservación y comparar los efectos en el medio ambiente”.

**Figura 14.**

*Mapa de Cobertura vegetal y Usos del Suelo del Municipio de Girardot.*



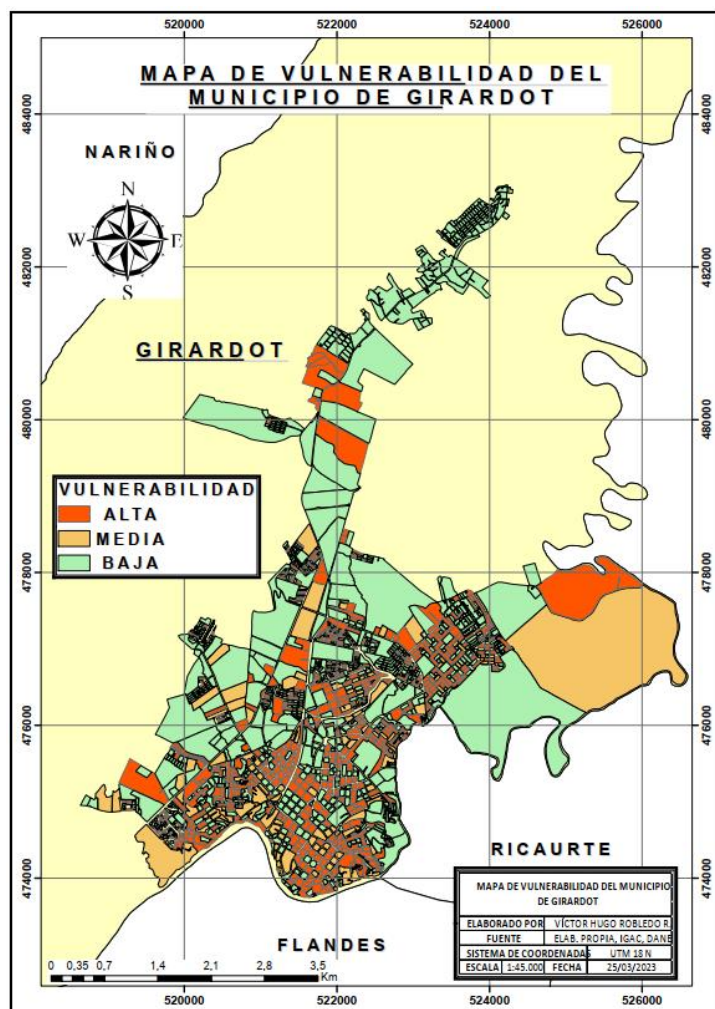
Fuente Propia.

No obstante, los aspectos clave del concepto Gestión Integrada de Inundaciones (GII), implica la determinación de las áreas de riesgo de inundación y la evaluación de la vulnerabilidad de las comunidades, también incluye la identificación y evaluación de medidas de mitigación, las GII debe ser adaptable para poder responder a las condiciones cambiantes que cada día tiene el medio ambiente. Con base en lo que menciona por Senado (2012) la GII tiene en cuenta “la importancia económica y de desarrollo que representan las llanuras de inundación, la necesidad de optimizar el uso eficaz de los recursos de una cuenca fluvial y de reconocer los riesgos de pérdidas económicas y de vidas ocasionadas por las inundaciones” (p.36). Desde el punto de vista de Kiaei & Ahmadi (2022) la Gestión Integrada de Inundaciones “tiene como objetivo lograr un conjunto óptimo o equilibrado de medidas preventivas a

corto y largo plazo, denominadas alternativas en lo sucesivo, para atenuar los peligros de inundación a un nivel aceptable de costos sociales, económicos y ambientales”.

**Figura 15.**

*Mapa de Vulnerabilidad del Municipio de Girardot.*



Fuente Propia.

Teniendo en cuenta el concepto de las variables meteorológicas, son factores del estado del tiempo que mide los fenómenos que producen cambios en la atmosfera como: lluvias, vientos, temperatura, la humedad entre otros... Estos datos son indispensables para monitorear y determinar las variaciones en el cambio climático, también para reconocer el comportamiento y características de las cuencas hidrográficas. Con base en lo indica por el IDEAM (2019) en la Guía Metodológica de la



Operación Estadística Variables Meteorológicas estas variables tienen como propósito “generar información de variables meteorológicas que permitan establecer el comportamiento atmosférico, del clima del país. Las variables a las que hace referencia corresponden a la temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, la precipitación, la humedad relativa y el brillo solar” (p.8).

Elementos Esenciales del significado Amenazas de Inundación, este hace referencia a las crecientes en la lámina de agua de un río o quebrada por las fuertes precipitaciones, lo que conlleva a situaciones de emergencia en algunas áreas donde viven comunidades en alto riesgo por habitar a orillas del afluente o en zonas susceptibles a Inundación. En la opinión de Robayo (2014) “Corresponde a las zonas o áreas donde existe una probabilidad de ocurrencia de inundaciones por desbordamiento de cauces y/o cuerpos de agua intervenidos asociados a periodo de retorno, a la altura de la lámina de agua con efectos potencialmente dañinos” (p.42).

Aproximación al concepto Gestión del riesgo, el cual es el proceso donde se analiza, determina y evalúa los factores que están o que pueden ocurrir, y el impacto que pueden causar, con el propósito de generar una alternativa para evitar que suceda o minimizarlo con acciones preventivas. Según Robayo (2014) la Gestión del Riesgo “Busca el manejo de los efectos de las amenazas y reducir la incertidumbre de su ocurrencia, a través de una secuencia de actividades humanas que incluyen evaluación de riesgo, estrategias de desarrollo para manejarlo y mitigación del riesgo utilizando recursos gerenciales” (p.23). En la opinión del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible - MADS (S.f) la Gestión del Riesgo es la “planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo y promoción de una mayor conciencia de este, impedir o evitar que se genere, reducirlo o controlarlo para prepararse y manejar las situaciones de desastre”.

Aspectos claves del concepto Mitigación del riesgo, hace referencia a las soluciones y acciones que se implementan para disminuir las condiciones de riesgo y conseguir la prevención hacia los desastres naturales, con el objetivo de reducir las pérdidas humanas o de bienes. Desde la perspectiva

de la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres - UNGRD (2019) se entiende como “medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza” (p.1). Desde el punto de vista de Robayo (2014) la mitigación del riesgo es “medidas de intervención prescriptiva o correctiva dirigidas a reducir o disminuir los daños y pérdidas que se puedan presentar a través de reglamentos de seguridad y proyectos de inversión pública o privada cuyo objetivo es reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad existente” (p.23).

### 8.5 Marco legal

Desde la perspectiva del aprovechamiento de los recursos naturales y la gestión del riesgo, a nivel internacional, nacional y regional existe un compendio normativo relevante para la administración de estos, contemplando que, con esto se busca fomentar el desarrollo y la conservación de los entornos hídricos. Es así, que existen normas, las cuales están relacionadas en la tabla 1.

**Tabla 1.**

*Normatividad de Referencia.*

| NORMATIVIDAD  | ENTIDAD QUE EXPIDE   | CONTENIDO   |
|---|--|---|
| Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 | Oficina de las Naciones Unidas para la reducción del riesgo de desastres | Trata sobre la reducción sustancial del riesgo de desastres y pérdidas en vidas, medios de subsistencia, salud y en los activos económicos, físicos, sociales, culturales, ambientales de personas, empresas, comunidades y países.       |
| Artículos 58, 79, 80, 95, 268, 313, 317, 334 y 339                  | Constitución Política de la República de Colombia                        | Estos regulan la protección de los recursos naturales como los derechos adquiridos para el bien público y social, previniendo y controlando el deterioro ambiental garantizando un desarrollo sostenible, su conservación y restauración. |

|  |                                      |  |
|--|--------------------------------------|--|
| LEY 99 DE 1993                             | Congreso de la República de Colombia | 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. En el Art. 31, literal 19 se establece como función la defensa contra inundación por medio de obras civiles. |
| Ley 1523 del 24 de abril del 2012.         | Congreso de la República de Colombia | Esta adopta la política Nacional de gestión del riesgo de desastres, establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y dicta otras disposiciones.   |
| Ley 1575 del 21 de agosto de 2012.         | Congreso de la República de Colombia | Esta establece la responsabilidad compartida a todas las autoridades y habitantes de la nación sobre la gestión integral del riesgo.   |
| Decreto 4147 - 3 de noviembre 2011         | Presidencia de la República          | Creación de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, se establece su objeto y estructura.   |
| Decreto 1974 - 11 de septiembre de 2013    | Presidencia de la República          | Se establece el procedimiento para la expedición y actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo.  |
| Decreto 2672 - 20 de noviembre del 2013    | Presidencia de la República          | Aquí se modifica parcialmente la estructura de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres.   |
| Decreto 1807 del 19 de septiembre del 2014 | Presidencia de la República          | Este reglamenta el artículo 189 del Decreto Ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial.  |
| Decreto 1081 de 2015                       | Presidencia de la República          | Trata sobre la expedición el Decreto Reglamentario Único del Sector Presidencia de la República  |
| Decreto 2157 de 2017                       | Presidencia de la República          | Este adopta directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la ley 1523 de 2012.   |

|  |                             |   |
|--|-----------------------------|---|
| Decreto 1289 de 2018                                     | Presidencia de la República | Aquí se adiciona el Capítulo 6 al Título 1 de la Parte 3 del Libro 2 del Decreto 1081 de 2015, Único Reglamentario del Sector de la Presidencia de la República, en lo relacionado con el Fondo Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres.  |
| Decreto 1478 de 2022                                     | Presidencia de la República | Esta trata sobre la actualización del Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se modifica el Artículo 2.3.1.2.2.4.3 de la Subsección 4, Sección 2, Capítulo 2, Título 1, Libro 2, del Decreto Único Presidencial 1081 de 2015.   |
| Sentencia No. 25000-23-27-000-2001-0479-01. (Río Bogotá) | Consejo de Estado           | Esta menciona en su fallo en el numeral Cuarto, literal h, la orden del dragado del río Bogotá y de sus afluentes, en concordancia con el CONPES 3631 (adecuación hidráulica, comprendida en la construcción de obras para controlar las inundaciones ocasionadas por el río, con un periodo de retorno de 100 años). |

Fuente: Propia.

### CAPÍTULO III

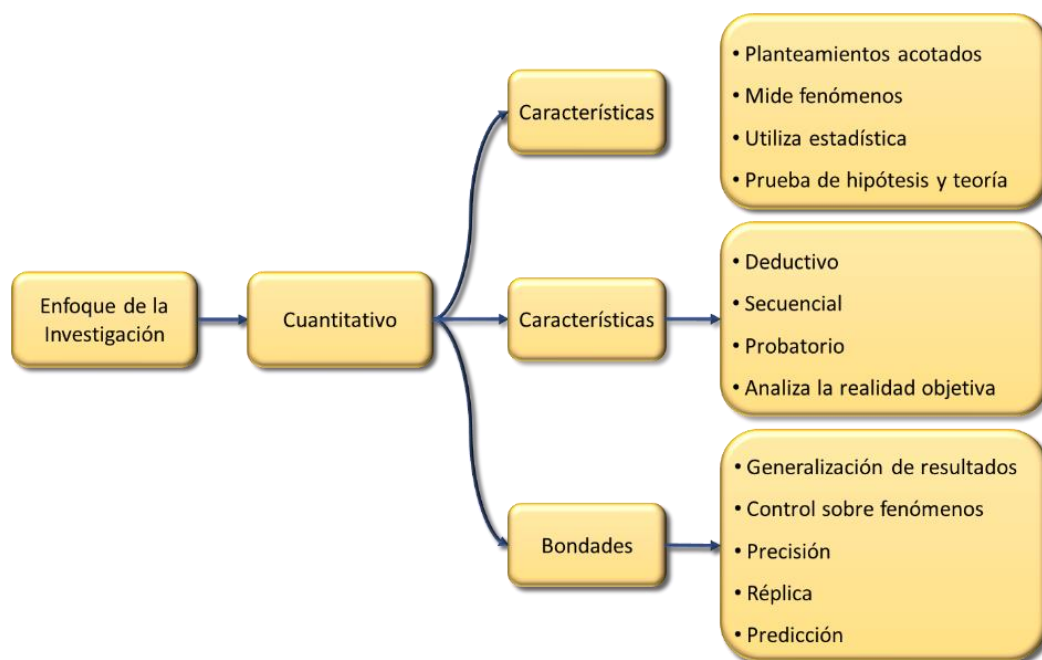
#### 9 Marco metodológico

##### 9.1 Método

Contemplando los diferentes puntos de vista de la metodología de la investigación (cuantitativa, cualitativa y mixta), en el estudio de caso, el enfoque es cuantitativo, según Hernández *et al* (2014) afirmó que, este es “secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente sin eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación” (p.4). Adicionalmente, en este se efectúa una revisión de la literatura, dando paso a la construcción del marco con una óptica teórica, el establecimiento de la hipótesis en función de incógnitas; asimismo, se plantea un diseño, se estudian los resultados empleando métodos estadísticos y finalmente, se obtienen conclusiones.

Figura 16.

*Enfoque de la Investigación.*



Nota: Adaptado de *Metodología de la investigación* (p.36), por Hernández et al, 2003, Fuente

(<https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>).

En el mismo sentido, esta perspectiva brindó unas características, como; “reflejar la necesidad de medir y estimar magnitudes de los fenómenos o problemas de investigación, el investigador plantea un problema de estudio delimitado y concreto sobre el fenómeno, aunque en evolución. Sus preguntas de investigación versan sobre cuestiones específicas” (Hernández *et al*, 2014, p. 5). Efectuando un seguimiento al direccionamiento del Doctor Hernández del punto de vista en mención, este presenta un total de 16 particularidades.

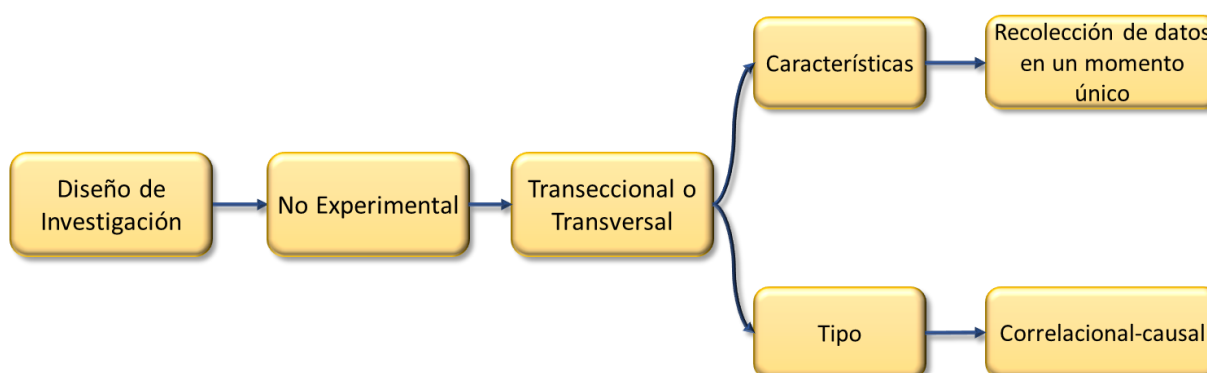
En otro orden de ideas, el alcance está definido como correlacional, teniendo en mente lo mencionado por Hernández *et al* (2014), donde afirmo que, “la utilidad de los estudios correlacionales es saber cómo se puede comportar una variable al conocer el comportamiento de otras variables vinculadas. Intentando predecir el valor aproximado que tendrán unos casos en una variable, a partir de

un valor” (p. 94). Tiene valor mencionar que, este permite analizar múltiples factores, siempre y cuando, estas estén relacionadas.

En el mismo orden de ideas, el diseño del estudio de caso fue de tipo no experimental, donde se llevó a cabo con un análisis transeccional correlacional - causal, “Este diseño describe relaciones entre dos o más categorías, conceptos o variables en un momento determinado. A veces, únicamente en términos correlacionales, otras en función de la relación causa-efecto (causales)” (Hernández *et al*, 2014). A continuación, se representa gráficamente la estructura del diseño aplicado, teniendo en mente las características propias.

**Figura 17.**

*Diseño de Investigación.*



Nota: Adaptado de *Metodología de la investigación* (p.160), por Hernández et al, 2003, Fuente

(<https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>).

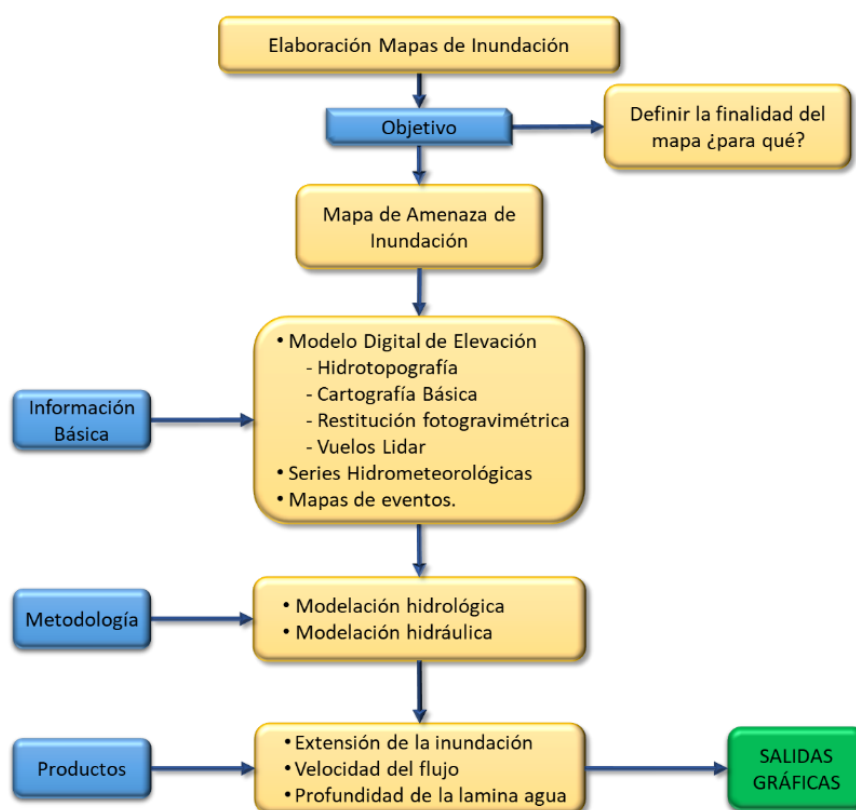
## 9.2 Metodología

Para el desarrollo del proceso del estudio de caso, se tuvieron en cuenta las recomendaciones mencionadas en la guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación realizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales -IDEAM en el año 2017. En esa misma línea, con el propósito de cumplir con el objeto principal se tomaron como referencia los métodos para la realización de mapas de amenaza de inundación, dando valor a lo mencionado por el IDEAM (2017)

donde afirma que, “este provee información gráfica de la inundación esperada, tal como, alturas de la lámina de agua, profundidades, velocidades del flujo, extensión de la inundación y tiempo de permanencia, ya sea para un evento de una probabilidad dada o varias probabilidades” (p. 36). En la figura 6 se representa gráficamente la información requerida para la determinación del producto final (mapa de amenaza de inundación).

**Figura 18.**

*Diagrama de Flujo e Información Necesaria para la Elaboración de Mapa de Amenaza de Inundación.*



Nota: Adaptado de *guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación* [Imagen], por IDEAM, 2018,

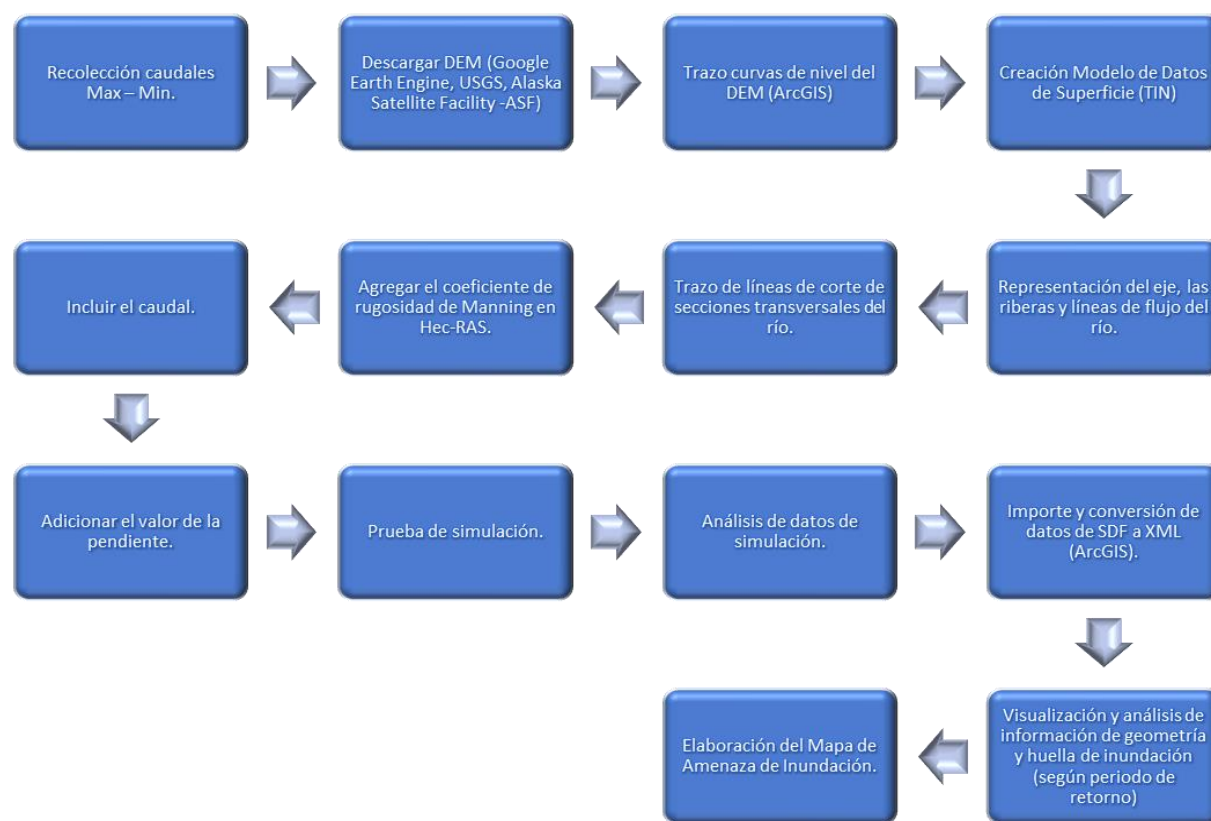
Fuente([http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA\\_METODOLOGICA\\_MAPAS\\_INUNDACION\\_MARZO\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf)).

En el mismo sentido, teniendo en cuenta la delimitación de la investigación (1.040 metros aguas arriba tomando como punto de referencia inicial el puente que comunica los municipios de Girardot y

Ricaurte, y 1.590 m aguas abajo, es decir, hasta la desembocadura del río Bogotá con el río Magdalena). Inicialmente, se efectuó la recopilación de los caudales máximos y mínimos de la zona en análisis, aclarando que, esto fue realizado por medio de la información suministrada por el IDEAM en la página web [WWW.ideam.gov.co](http://WWW.ideam.gov.co), con lo anterior se dio respuesta al primer objetivo específico.

**Figura 19.**

*Diagrama de Flujo de Análisis de Datos para Elaboración de Mapa de Amenaza por Inundación.*



Fuente Propia.

Seguidamente, se realizó la descarga del Modelo Digital de Elevación (DEM), confirmando que, este debe tener la mejor resolución posible, esto con el fin que, los cálculos tengan mayor precisión. Procediendo seguidamente, al procesamiento del DEM para obtener el trazo de las curvas de nivel y el modelo de datos de superficie (TIN), del área en análisis. Una vez obtenido el insumo con las



características de elevación representadas gráficamente, por medio de capas de shapefile tipo línea se elabora el eje, las riberas (derecha e izquierda) y las zonas de flujo del río en la zona de estudio.

Después, se elaboraron los segmentos de corte de secciones transversales automáticamente, con este paso realizado, se realizó el exporte de los datos para procesarlos en el programa Hec-RAS. Ahora bien, se verificaron los detalles del archivo en análisis, valorando que, concordara la dirección de flujo del afluente, el nombre del río, que no se interceptaran los cortes de las secciones transversales y las características ingresadas anteriormente, esto con el propósito que, al momento de realizar el simulacro de inundación, este no presente errores.

Por otro lado, desde Hec-RAS se introdujeron los valores del coeficiente de rugosidad de Manning para corrientes naturales y el caudal máximo del afluente en cuestión. Por una parte, se adicionó el porcentaje de la pendiente aguas abajo, esto se verificó por medio del empleo del aplicativo de 3D análisis de ArcGIS, aclarando que, esto permite precisión en el procesamiento de la información. Posteriormente, se realizó una prueba de la simulación de inundación y una visión puntual de los resultados de esta, solo con el objeto de exportar los resultados finalmente al aplicativo ArcGIS.

En otro orden de ideas, estando en herramienta de procesamiento de datos de geográficos ArcGIS se importa el archivo producto del análisis realizado anteriormente, acentuando que, antes se debe realizar una conversión de extensión, de SDF a XML en ArcGIS, esto con fin visualizar la geometría y los atributos de cada sección transversal, velocidad del flujo, entre otros. Con el desarrollo de la modelación y tratamiento de la información con los diferentes softwares mencionados se dio cumplimiento al segundo objetivo específico.

## 10 Resultados

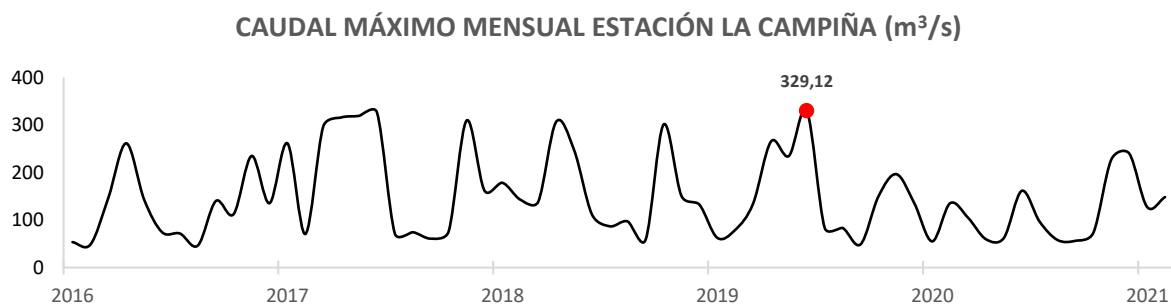
Los resultados obtenidos en la investigación indican que se recolectó información histórica de caudales máximos y mínimos de la cuenca baja del río Bogotá, utilizando la plataforma del IDEAM como fuente de referencia. Sin embargo, se encontró que hay pocas estaciones limnigráficas con serie de datos completos en el periodo que comprende el análisis disponible en la trayectoria del afluente en estudio. A pesar de esto, se considera de gran valor la información extraída de los lapsos de tiempo en los que el fenómeno de la niña se ha presentado.

Igualmente, es importante mencionar que la recolección de datos históricos es fundamental para la elaboración de un mapa de amenaza por inundación, ya que permite conocer el comportamiento del caudal en el río y las zonas de inundación en el pasado. Estos datos son necesarios para estimar los niveles de caudal que podría alcanzarse en el futuro en caso de presentarse una inundación, lo que permitiría tomar medidas preventivas y de respuesta ante esta eventualidad. Cobra valor mencionar que, la información obtenida es valiosa para la elaboración del mapa de amenaza de inundación. Reiterando que, es importante continuar con la investigación para obtener más datos y mejorar la precisión del análisis de riesgo de desbordamiento del afluente en esta zona.

Seguidamente, están representados gráficamente los caudales máximos y mínimos, información obtenida de la plataforma del IDEAM de las estaciones ubicadas en los municipios de Girardot (automática La Campiña y convencional Girardot 2) y Tocaima (convencional Puente Portillo), cobra valor mencionar que, estas se encuentran en el cauce de la cuenca baja del río Bogotá. Con esto se cumple el primer objetivo específico propuesto.

**Figura 20.**

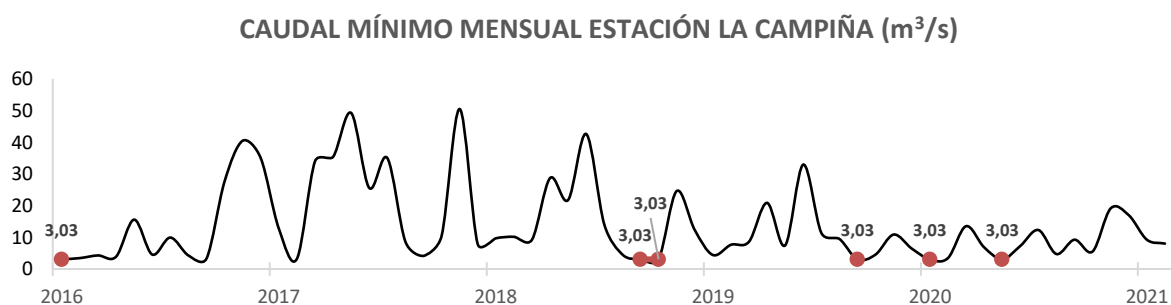
*Histórico de Caudales Máximos Mensuales de la Estación La Campiña.*



Fuente Propia.

**Figura 21.**

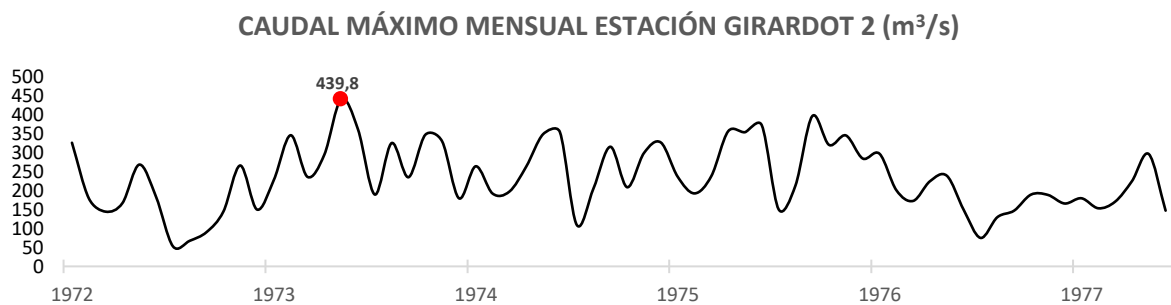
*Histórico de Caudales Mínimos Mensuales de la Estación La Campiña.*



Fuente Propia.

**Figura 22.**

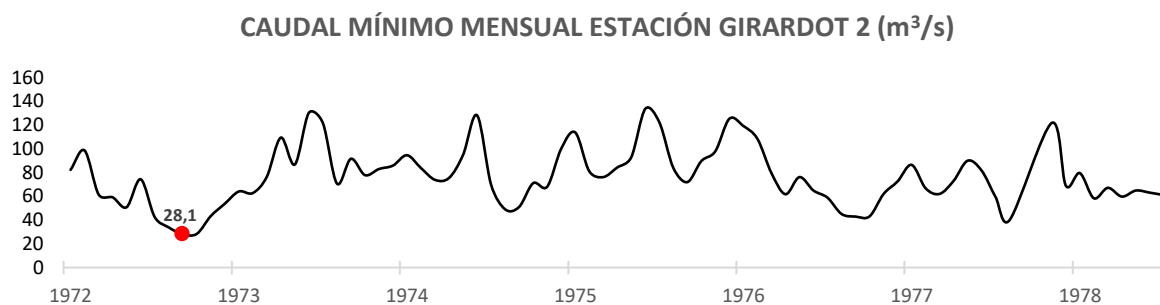
*Histórico de Caudales Máximos Mensuales de la Estación Girardot 2.*



Fuente Propia.

**Figura 23.**

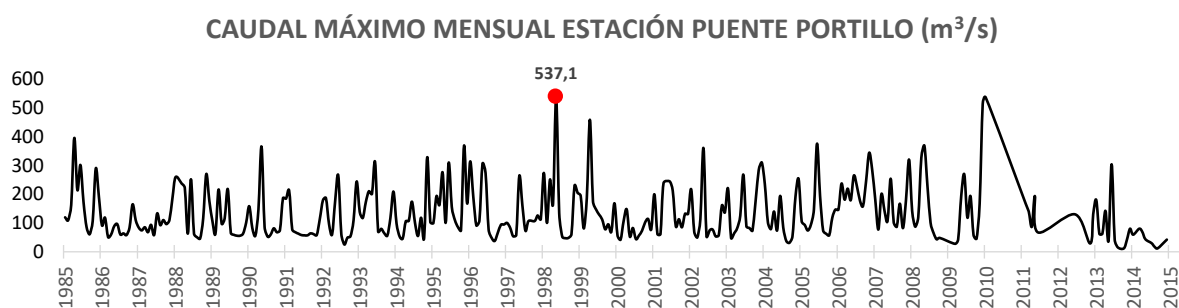
*Histórico de Caudales Mínimos Mensuales de la Estación Girardot 2.*



Fuente Propia.

**Figura 24.**

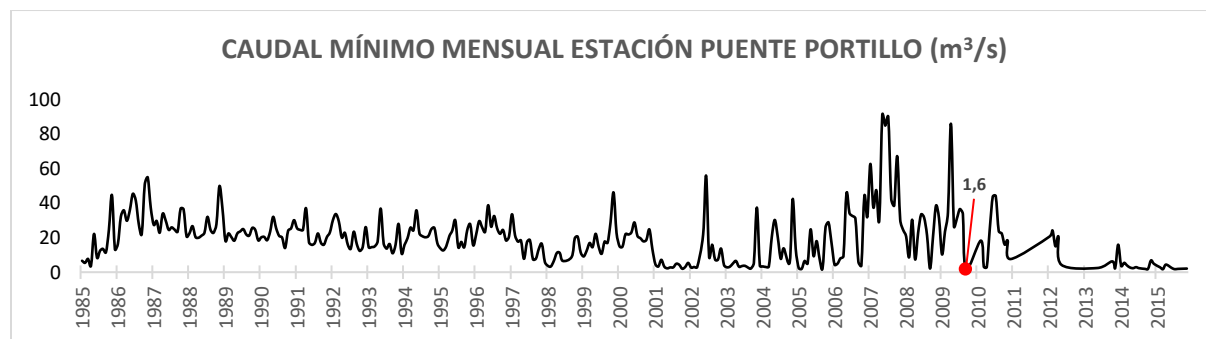
*Histórico de Caudales Máximos Mensuales de la Estación Puente Portillo.*



Fuente Propia.

**Figura 25.**

*Niveles Históricos de Caudales Mínimos de la Estación Puente Portillo.*



Fuente Propia.

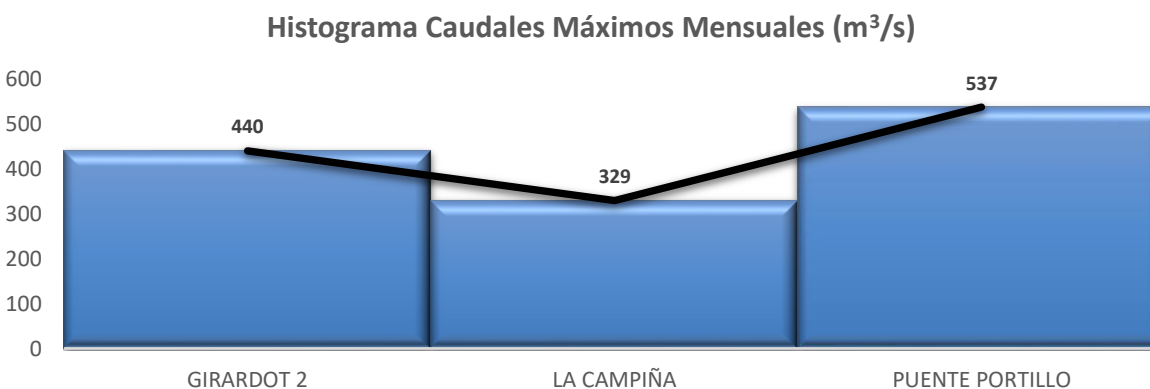
Una vez tratados los datos de los caudales máximos y mínimos obtenidos, se relaciona un histograma por cada tipo de nivel, así como está representado más adelante, vale la pena recalcar que, la información que se logró recopilar en la plataforma del IDEAM fue escasa, sin embargo, esta es confiable y concuerda con las épocas donde el fenómeno de la niña ha sido considerable.

En el mismo sentido, los resultados de la investigación muestran gráficamente los caudales máximos y mínimos obtenidos de la plataforma del IDEAM de las estaciones ubicadas en los municipios de Girardot y Tocaima, que se encuentran en el cauce de la cuenca baja del río Bogotá. Estas fueron, la automática La Campiña y las convencionales Girardot 2 y Puente Portillo. Con la obtención de estos datos, se cumple el primer objetivo específico propuesto. Cobra valor mencionar que, esta información es esencial para la elaboración de un mapa de amenaza por inundación, ya que permite conocer el comportamiento del caudal en el río y las zonas de inundación.

Por lo tanto, estos resultados son importantes para la evaluación de los riesgos de inundación, la implementación de medidas preventivas y de respuesta ante esta eventualidad. Es necesario continuar con la investigación para obtener más datos y mejorar la precisión del análisis de riesgo de inundación en la zona de estudio.

### Figura 26.

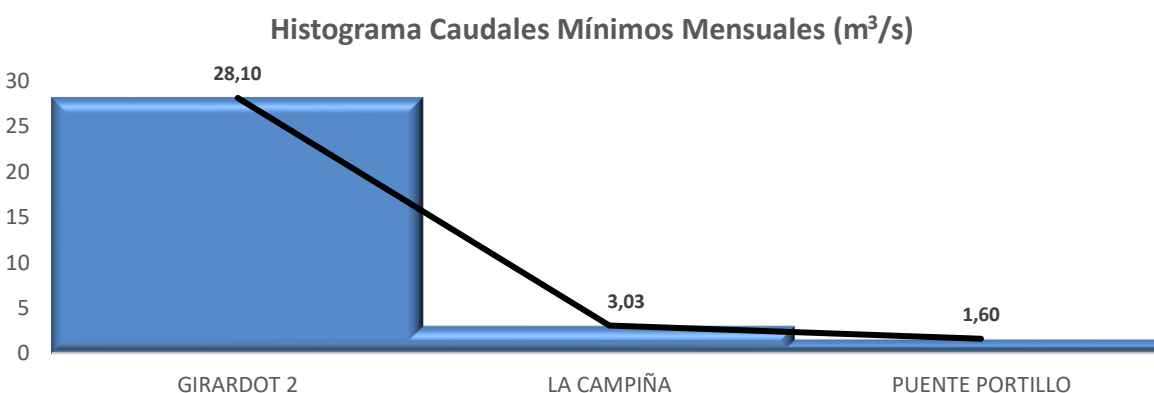
*Histograma de Caudales Máximos Mensuales.*



Fuente Propia.

**Figura 27.**

*Histograma de Caudales Mínimos Mensuales.*



Fuente: Propia.

Después de la obtención de los caudales, se tomó como referencia la estación de Puente Portillo, según el historial, esta provee los valores representativos para el análisis de los periodos de retorno y continuación del estudio de la cuenca baja del río Bogotá. Seguidamente, se calcularon los periodos de retorno (2.33, 5, 20 y 100 años) por medio del método de Gumbel, Weibull, y Distribución General de Valores Extremos (GVE), donde, se determinaron los caudales máximos para cada uno de los años mencionados como se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 2.**

*Resumen de Cálculos de Periodos de Retorno (2.33,5,20 y 100 años).*

| MÉTODOS | COEFICIENTE CORRELACIÓN LINEAL | TIEMPO DE RETORNO 2.33 AÑOS (m <sup>3</sup> /s) | TIEMPO DE RETORNO 5 AÑOS (m <sup>3</sup> /s) | TIEMPO DE RETORNO 20 AÑOS (m <sup>3</sup> /s) | TIEMPO DE RETORNO 100 AÑOS (m <sup>3</sup> /s) |
|---------|--------------------------------|---|--|---|--|
| Weibull | 0.964                          | 302.05  | 409.81                                       | 581.76  | 772.40   |
| Gumbel  | 0.987                          | 620.85  | 701.92                                       | 809.09  | 890.16   |
| GVE     | 0.952                          | 290.62  | 405.24                                       | 568.25  | 723.84   |

Nota: Caudales calculados por cada uno de los métodos para diferentes periodos de retorno. Fuente Propia.

En relación con la modelación hidráulica, se obtuvo mediante la herramienta ArcGIS para procesar los datos recopilados. Se destaca que esta herramienta proporciona una gran facilidad en el manejo de los datos y la interacción de múltiples capas, lo que resultó muy útil en la investigación. Sin

embargo, se encontraron fallas al exportar los datos procesados en ArcGIS al software Hec-RAS, lo que imposibilitó la continuidad de este proceso. Esto se debe a las diferencias en las versiones de cada extensión, generando un retraso en el análisis de la modelación hidráulica. Es importante mencionar que, estos problemas son comunes en la investigación científica y es necesario buscar soluciones para superarlos. Se recomienda realizar una actualización de las herramientas utilizadas para garantizar su compatibilidad y evitar este tipo de inconvenientes en el futuro. También se sugiere explorar otras alternativas de software de modelación hidráulica que puedan ser más compatibles con los datos procesados en ArcGIS.

Frente a lo anterior, aunque la modelación hidráulica en ArcGIS fue útil, las fallas encontradas en el proceso de exportación a Hec-RAS generó un retraso en el análisis. Se sugiere continuar explorando otras alternativas de software de modelación hidráulica y actualizar las herramientas utilizadas para garantizar su compatibilidad.

En la misma línea, el producto demuestra que se realizó completamente la modelación hidráulica utilizando el programa Hec-RAS después de enfrentar algunos inconvenientes en el proceso de exportación de datos desde ArcGIS. La herramienta RAS-Mapper de Hec-RAS permitió realizar las mismas opciones de diseño hidráulico que ArcGIS, lo que facilitó la tarea de definir el eje del afluente, los bordes del río y las posibles zonas de inundación. Igualmente, este permite representar características de diseño hidráulico como puentes, alcantarillas y otras estructuras.

Cabe destacar que, la herramienta RAS-Mapper de Hec-RAS también permitió importar archivos shapefile con características específicas, como es el caso de las rugosidades de Manning en función del uso del suelo, lo que permitió una mayor precisión en la modelación hidráulica. En efecto, el uso del programa Hec-RAS resultó ser una solución efectiva y eficiente para completar la modelación hidráulica y obtener resultados precisos para la elaboración del mapa de amenaza por inundación.

**Figura 28.**

*Diseño del Eje, Bordes, Llanuras de Posible Inundación y Trazo de Secciones Transversales del Afluyente en Análisis.*



Nota: Diseño del eje, bordes, llanuras de posible inundación y trazo de secciones transversales del afluyente en análisis con el mapa base. Fuente Propia.

Por consiguiente, se realizó el proceso computacional del software (Hec-RAS) para asociar la geometría del canal al proyecto, esto con el propósito de efectuar una visualización de los datos calculados de las 54 secciones transversales diseñadas y verificar si los resultados eran coherentes a la información introducida. Además, en esa vista se pueden observar los valores numéricos de las estaciones, la elevación de cada punto y la rugosidad de Manning correspondiente a cada tramo, así como se refleja en la siguiente figura. De la misma forma, al ingresar el valor del caudal, este refleja la altura de la lámina de agua. Es de resaltar que, con la realización del modelamiento hidráulico de la zona en análisis se cumple con el segundo objetivo específico propuesto.

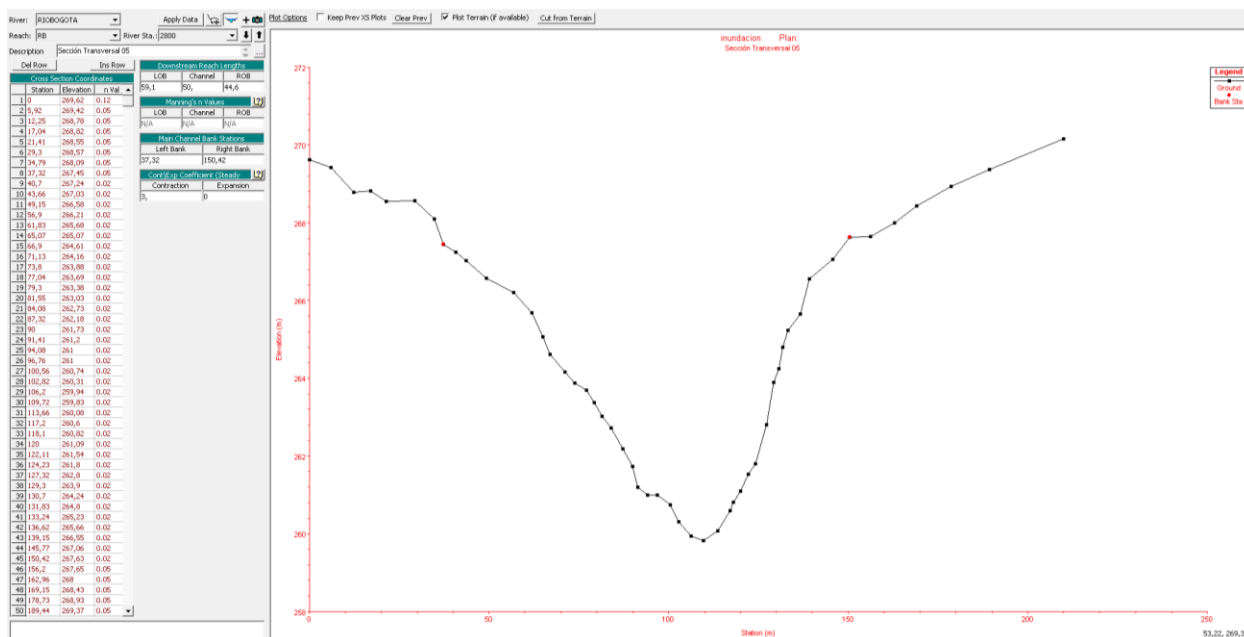


Por otra parte, se realizó la asociación de la geometría del canal al proyecto a través del software Hec-RAS, lo que permitió una visualización de los datos calculados de las 54 secciones transversales trazadas y verificar la coherencia con la información descubierta. En esa vista se pueden observar los valores numéricos de las estaciones, la elevación de cada punto y la rugosidad de Manning correspondiente a cada tramo, lo que es esencial para el análisis hidráulico de la zona.

Igualmente, al ingresar el valor del caudal, se puede observar la altura de la lámina de agua en cada punto, las velocidades que actúan en el canal, los tirantes (crítico y normal), eso en función de los diferentes tiempos de retorno analizados (2.33, 5, 20 y 100 años), lo que permite estimar los niveles de inundación en caso de presentar un incremento del río. Con la realización del modelamiento hidráulico se cumple con el segundo objetivo específico propuesto.

**Figura 29.**

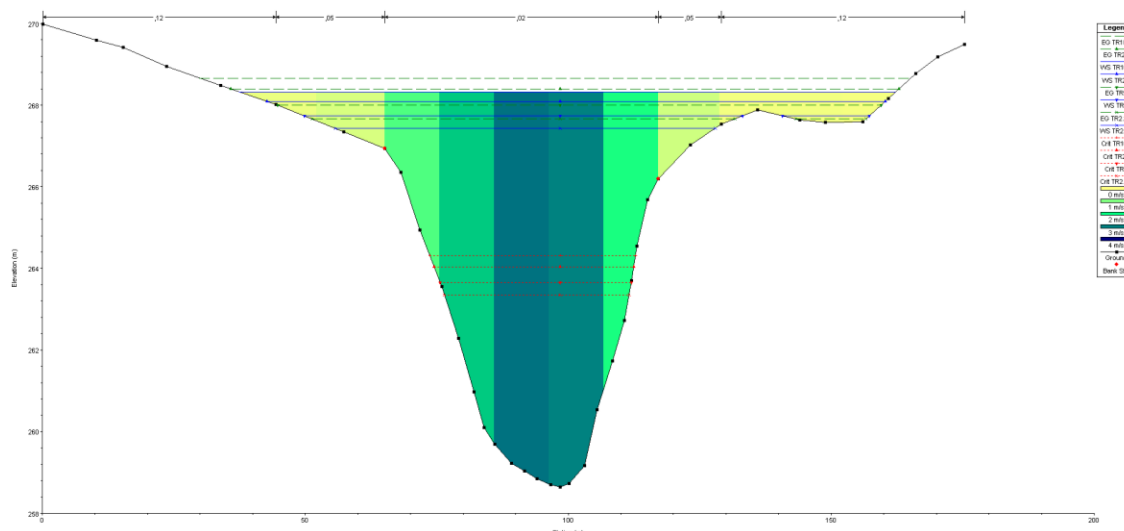
*Visualización de la Geometría de la Sección Transversal No. 5.*



Fuente Propia.

Figura 30.

Visualización de la Geometría de la Sección Transversal No. 8, en Función de la Velocidad del Flujo.

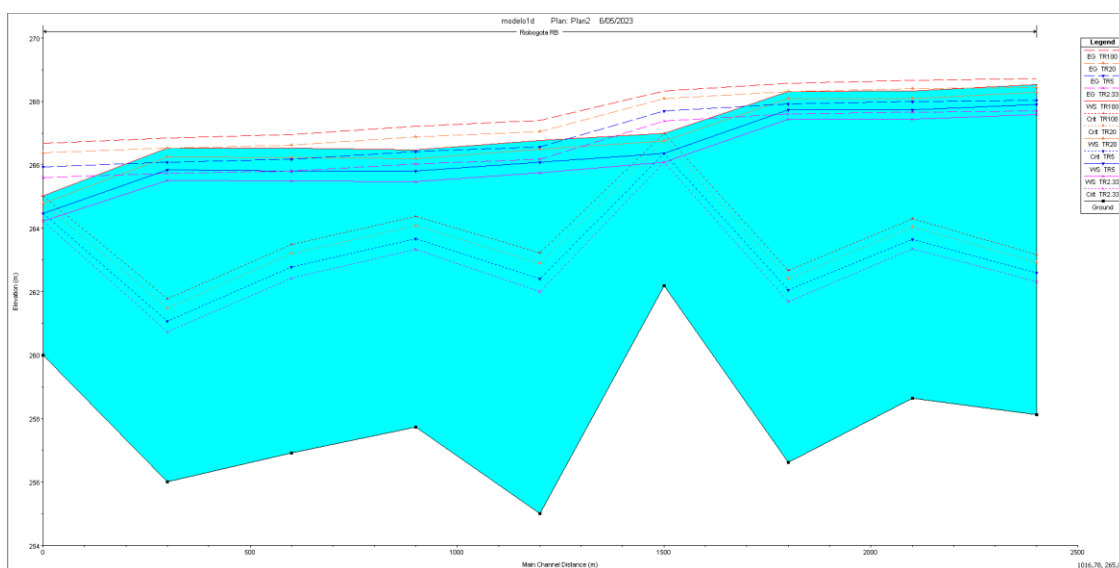


Nota: Visualización de la geometría de la sección transversal No. 8, en función de la velocidad del flujo, la altura de la lámina de agua en los diferentes tiempos de retorno, las rugosidades de Manning y los tirantes crítico y normal,

Fuente Propia.

Figura 31.

Resumen del Comportamiento del Fluido en los Tiempos de Retorno Calculados.



Nota: Resumen del comportamiento del fluido en los tiempos de retorno calculados (2.33, 5, 20 y 100 años), en función de la altura de la lámina de agua y los tirantes crítico y normal, Fuente Propia.

Es importante mencionar, que el uso del software Hec-RAS permitió la realización de múltiples opciones de diseño hidráulico y se cumplirá con los objetivos propuestos, donde se obtendrá información valiosa para la elaboración del mapa de amenaza por inundación en la cuenca baja del río Bogotá.

**Tabla 3.**

*Resumen de Datos de las Secciones Transversales cada 300 m*

| River Sta | TR (Years) | E. G. Elev (m) | W.S. Elev (m) | Vel. Head (m) | Frctn Loss (m) | C & E Loss (m) | Q Channel (m <sup>3</sup> /s) | E. G. Slope (m/m) | Vel Chnl (m/s) | Vel Total (m/s) | Flow Area (m <sup>2</sup> ) | Froude # |
|-----------|------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------------------------------|-------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|----------|
| #1        | 100        | 266,68         | 265,02        | 1,67          | 0,1            | 0              | 890                           | 47,05             | 0,002781       | 5,72            | 5,72                        | 155,66   |
|           | 20         | 266,38         | 264,79        | 1,59          | 0,09           | 0              | 809,09                        | 46,06             | 0,002816       | 5,58            | 5,58                        | 145,1    |
|           | 5          | 265,94         | 264,48        | 1,47          | 0,08           | 0              | 701,92                        | 44,7              | 0,002864       | 5,36            | 5,36                        | 130,85   |
|           | 2.33       | 265,6          | 264,22        | 1,38          | 0,08           | 0              | 620,86                        | 43,77             | 0,002934       | 5,19            | 5,19                        | 119,55   |
| #2        | 100        | 266,85         | 266,53        | 0,32          | 0,17           | 0              | 890                           | 53,46             | 0,000237       | 2,52            | 2,52                        | 352,84   |
|           | 20         | 266,54         | 266,24        | 0,29          | 0,16           | 0              | 809,09                        | 52,27             | 0,00022        | 2,4             | 2,4                         | 337,74   |
|           | 5          | 266,09         | 265,84        | 0,25          | 0,15           | 0              | 701,92                        | 50,58             | 0,000195       | 2,21            | 2,21                        | 317      |
|           | 2.33       | 265,73         | 265,51        | 0,22          | 0,14           | 0              | 620,86                        | 49,2              | 0,000175       | 2,06            | 2,06                        | 300,72   |
| #3        | 100        | 266,95         | 266,52        | 0,43          | 0,1            | 0              | 890                           | 62,28             | 0,00046        | 2,9             | 2,9                         | 306,59   |
|           | 20         | 266,63         | 266,23        | 0,4           | 0,09           | 0              | 809,09                        | 60,53             | 0,000449       | 2,8             | 2,8                         | 288,54   |
|           | 5          | 266,17         | 265,81        | 0,36          | 0,08           | 0              | 701,92                        | 58                | 0,00043        | 2,66            | 2,66                        | 264,07   |
|           | 2.33       | 265,81         | 265,48        | 0,33          | 0,08           | 0              | 620,86                        | 55,61             | 0,000408       | 2,53            | 2,53                        | 245,15   |
| #4        | 100        | 267,21         | 266,48        | 0,73          | 0,17           | 0,09           | 890                           | 48,32             | 0,000734       | 3,79            | 3,79                        | 234,7    |
|           | 20         | 266,88         | 266,2         | 0,68          | 0,17           | 0,08           | 809,09                        | 47,03             | 0,000717       | 3,66            | 3,66                        | 221,24   |
|           | 5          | 266,41         | 265,8         | 0,61          | 0,16           | 0,07           | 701,92                        | 45,04             | 0,000689       | 3,46            | 3,46                        | 202,91   |
|           | 2.33       | 266,03         | 265,48        | 0,55          | 0,15           | 0,07           | 620,86                        | 43,44             | 0,000665       | 3,29            | 3,29                        | 188,66   |
| #5        | 100        | 267,4          | 266,76        | 0,63          | 0,19           | 0              | 890                           | 39,34             | 0,000526       | 3,53            | 3,53                        | 252,34   |
|           | 20         | 267,06         | 266,48        | 0,57          | 0,18           | 0              | 809,09                        | 38,56             | 0,00049        | 3,35            | 3,35                        | 241,41   |
|           | 5          | 266,57         | 266,08        | 0,49          | 0,16           | 0              | 701,92                        | 36,88             | 0,000433       | 3,1             | 3,1                         | 226,19   |
|           | 2.33       | 266,18         | 265,75        | 0,43          | 0,15           | 0              | 620,86                        | 35,88             | 0,000391       | 2,9             | 2,9                         | 214,25   |
| #6        | 100        | 268,33         | 267           | 1,33          | 0,32           | 0              | 890                           | 65,4              | 0,003101       | 5,11            | 5,11                        | 174,07   |
|           | 20         | 268,08         | 266,75        | 1,33          | 0,3            | 0              | 809,09                        | 59,29             | 0,003084       | 5,1             | 5,1                         | 158,67   |
|           | 5          | 267,7          | 266,37        | 1,33          | 0,28           | 0              | 701,92                        | 51,92             | 0,003174       | 5,11            | 5,11                        | 137,34   |
|           | 2.33       | 267,38         | 266,09        | 1,29          | 0,26           | 0              | 620,86                        | 48,29             | 0,003236       | 5,03            | 5,03                        | 123,31   |
| #7        | 100        | 268,58         | 268,32        | 0,26          | 0,14           | 0,11           | 890                           | 56,46             | 0,000178       | 2,25            | 2,25                        | 395,03   |
|           | 20         | 268,32         | 268,09        | 0,23          | 0,13           | 0,11           | 809,09                        | 55,41             | 0,00016        | 2,12            | 2,12                        | 382,11   |
|           | 5          | 267,93         | 267,74        | 0,19          | 0,11           | 0,11           | 701,92                        | 53,91             | 0,000138       | 1,93            | 1,93                        | 362,9    |
|           | 2.33       | 267,6          | 267,43        | 0,16          | 0,1            | 0,11           | 620,86                        | 52,64             | 0,000122       | 1,79            | 1,79                        | 346,68   |
| #8        | 100        | 268,66         | 268,33        | 0,34          | 0,06           | 0,02           | 876,93                        | 124,88            | 0,00024        | 2,59            | 2,26                        | 393,43   |
|           | 20         | 268,4          | 268,09        | 0,3           | 0,06           | 0,02           | 800,96                        | 117,56            | 0,000226       | 2,46            | 2,22                        | 365,05   |
|           | 5          | 268            | 267,74        | 0,26          | 0,05           | 0,02           | 698,53                        | 99,84             | 0,000209       | 2,27            | 2,15                        | 325,76   |
|           | 2.33       | 267,66         | 267,43        | 0,23          | 0,05           | 0,02           | 619,47                        | 72,23             | 0,000196       | 2,12            | 2,07                        | 300,11   |
| #9        | 100        | 268,71         | 268,54        | 0,17          | 0,05           | 0              | 865,1                         | 156,27            | 0,000106       | 1,87            | 1,57                        | 567,29   |
|           | 20         | 268,44         | 268,28        | 0,16          | 0,04           | 0              | 790,98                        | 145,53            | 0,0001         | 1,77            | 1,53                        | 529,16   |
|           | 5          | 268,04         | 267,9         | 0,14          | 0,04           | 0              | 691,8                         | 130,03            | 0,000092       | 1,64            | 1,47                        | 476,77   |
|           | 2.33       | 267,7          | 267,58        | 0,12          | 0,04           | 0              | 615,17                        |                   |                |                 |                             |          |

Nota: Resumen datos de las secciones transversales cada 300 m, siendo la estación #1 = K0+300 y la #9 = K2+700,

Fuente Propia.

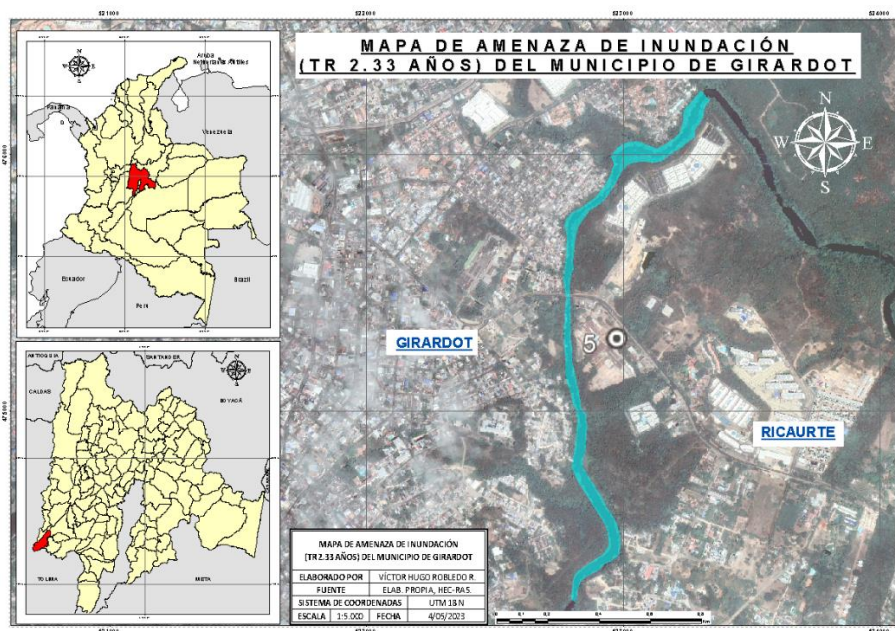
Teniendo en cuenta la tabla 3, a continuación, se realiza la descripción de cada ítem que ahí está consignado, así:

- **TR:** Tiempo de retorno específico en años
- **E.G. Elev:** Cota a la que se sitúa la línea de energía, es decir la suma de cota rasante del canal más el tirante más el término cinético ( $E = Z + y + a \cdot v^2 / 2g$ ).
- **W.S. Elev:** Cota a la que se sitúa la superficie de la lámina de agua, es decir la suma de cota rasante del canal más el tirante ( $Z + y$ ).
- **Vel Head:** Valor del término cinético de la energía ( $a \cdot v^2 / 2g$ ).
- **Frctn Loss:** Pérdida de energía debido a la fricción.
- **C & E Loss:** Pérdida de energía debida a contracción y/o expansión del flujo.
- **Q Channel:** Caudal total que circula por la sección.
- **E. G. Slope:** Pendiente de la línea de energía, es decir la variación de la cota de la línea de energía de una sección a la siguiente según la distancia entre ambas.
- **Vel Chnl:** Velocidad media del flujo en una parte de la sección.
- **Vel Total:** Velocidad media del flujo en la sección.
- **Flow Area:** Área efectiva de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de este.
- **Froude #:** Número de Froude en la parte del canal principal de la sección.

Por último, con los datos necesarios y las capas ráster proporcionadas por el software Hec-RAS se procedió a realizar la cartografía de la zona en estudio con cada tiempo de retorno, teniendo como referencia la información procesada, esto con el propósito de suministrar el insumo necesario para la oficina Prodesarrollo del municipio de Girardot, estimando que, esta cumple la función de entidad de gestión del riesgo y prevención de desastres.

Figura 32.

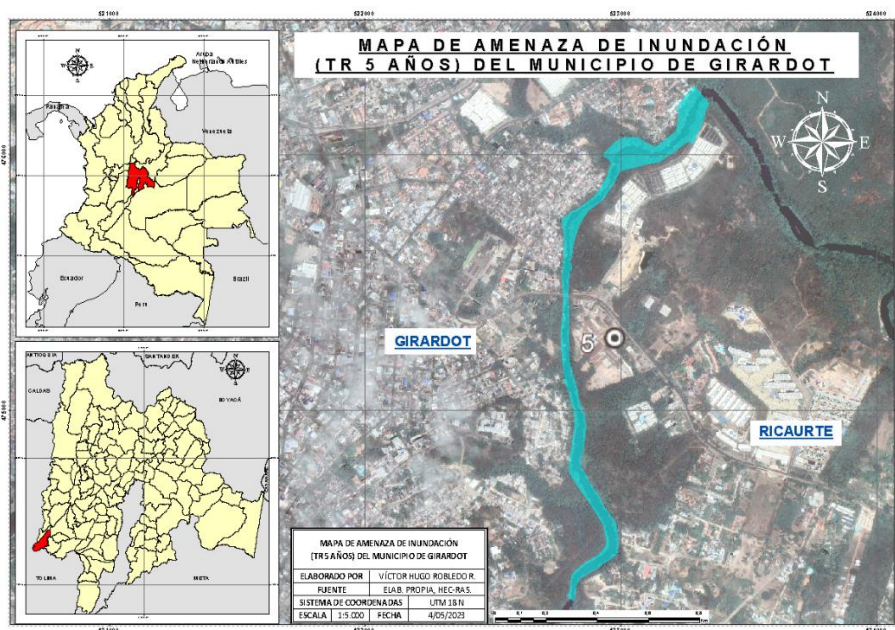
Mapa de Amenaza de Inundación con TR 2.33 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca.



Fuente Propia.

Figura 33.

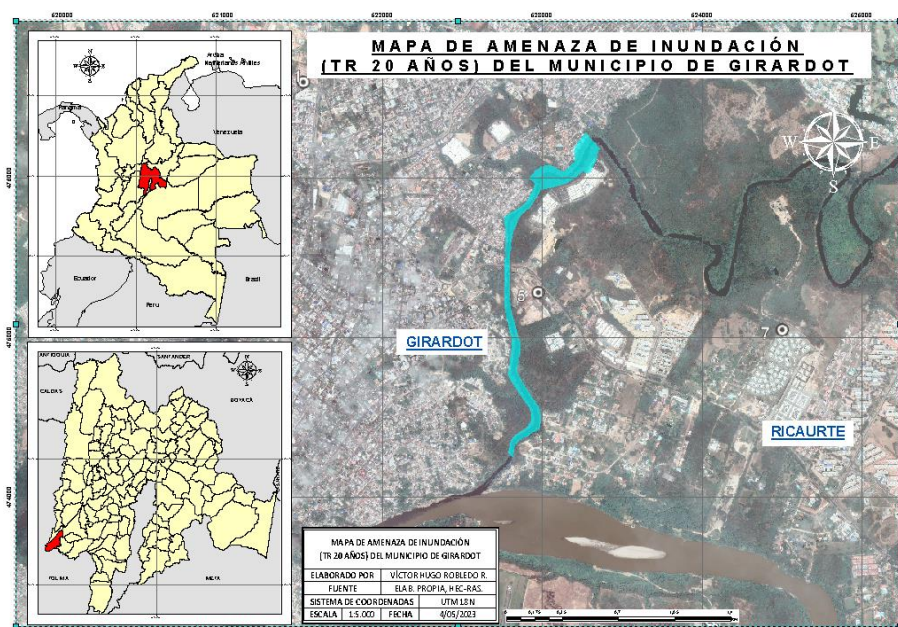
Mapa de Amenaza de Inundación con TR 5 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca.



Fuente Propia.

Figura 34.

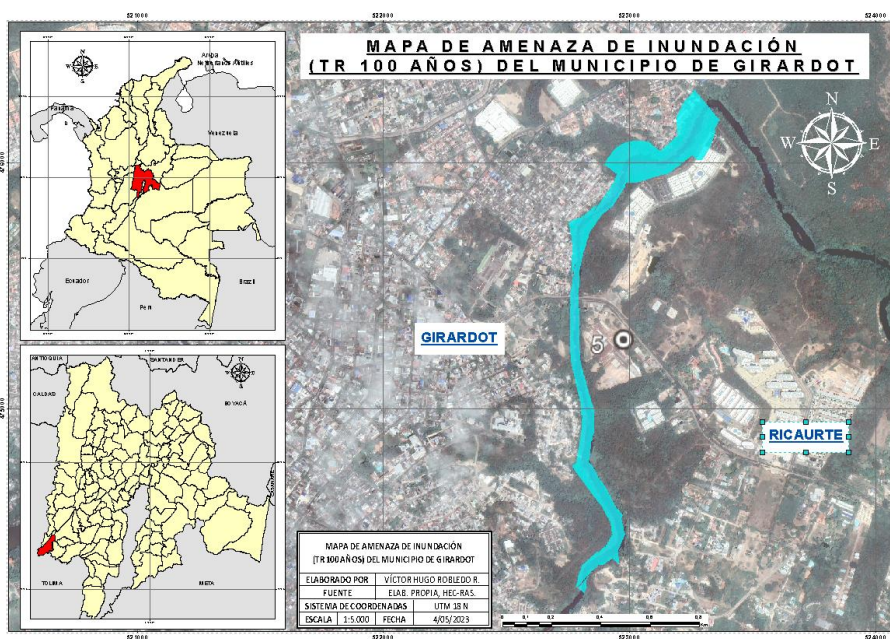
Mapa de Amenaza de Inundación con TR 20 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca.



Fuente Propia.

Figura 35.

Mapa de Amenaza de Inundación con TR 100 años en el Municipio de Girardot - Cundinamarca.



Fuente Propia.


## 11 Administración del Proyecto

### 11.1 Presupuesto

El presupuesto está conformado por los ítems necesarios para el cumplimiento de la elaboración del mapa de amenaza de inundación, sin embargo, gracias a la gestión de información batimétrica con la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, por parte del asesor del proyecto Ing. Edgar Orjuela Montoya, no fue necesario gastar recursos en ese indicador, a continuación, se refleja la estimación de costos.

**Figura 36.**

*Presupuesto.*

|    |  | CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS |          | <b>MODELACIÓN HIDRÁULICA Y ELABORACIÓN DE MAPA DE AMENAZA DE INUNDACIÓN</b> |                  | <b>ELABORADO POR:</b><br><b>MARÍA CAMILA CASTRO REY</b><br><b>VÍCTOR ROBLEDO RODRÍGUEZ</b> |  |
|---|--|--|----------|---|------------------|--|--|
|   |  | "UNIMINUTO"                              |          | PRESUPUESTO   |                  |  |  |
| Capítulo/Ítem   | Descripción  | Unidad                                   | Cantidad | Valor parcial   | Valor total      |  |  |
| 1   | Preliminares   |  |          |   | \$ 11.000.000,00 |  |  |
| 1,1   | Levataimiento tografico y batimetría del tramo del río en análisis (incluye equipos, salidas de campo, empleo de software, servicio técnico, toma de coordenadas de las riberas y batimetría del afluente) | ml                                       | 3.000,00 | \$ 11.000.000,00  |                  |  |  |
| 2   | Modelación Hidráulica  |  |          |   | \$ 4.000.000,00  |  |  |
| 2,1   | Modelación hidráulica del afluente (incluye equipos, empleo y actualización de software, servicio técnico, entrega de datos resultantes del análisis)  | Gb                                       | 1,00     | \$ 4.000.000,00   |                  |  |  |
| 3   | Cartografía  |  |          |   | \$ 2.000.000,00  |  |  |
| 3.1   | Elaboración de mapa de amenaza de inundación (incluye mapa en archivos solicitados y cartografía impresa)  | Gb                                       | 1,00     | \$ 2.000.000,00   |                  |  |  |
| Total costos directos   |  |  |          |   | \$ 17.000.000,00 |  |  |
| <b>Los porcentajes presentados por concepto de AIU son indicativos, cada entidad territorial tiene la responsabilidad de ajustarlos y presentar el correspondiente análisis detallado, de acuerdo a sus condiciones particulares.</b> |  |  |          | 19,00%  | \$3.230.000,00   |  |  |
|   |  |  |          | 5,00%   | \$850.000,00     |  |  |
|   |  |  |          | 6,00%   | \$1.020.000,00   |  |  |
|   |  |  |          | 30,00%  | \$5.100.000,00   |  |  |
| Costo total   |  |  |          |   | \$22.100.000,00  |  |  |
| Notas aclaratorias:   |  |  |          |   |                  |  |  |

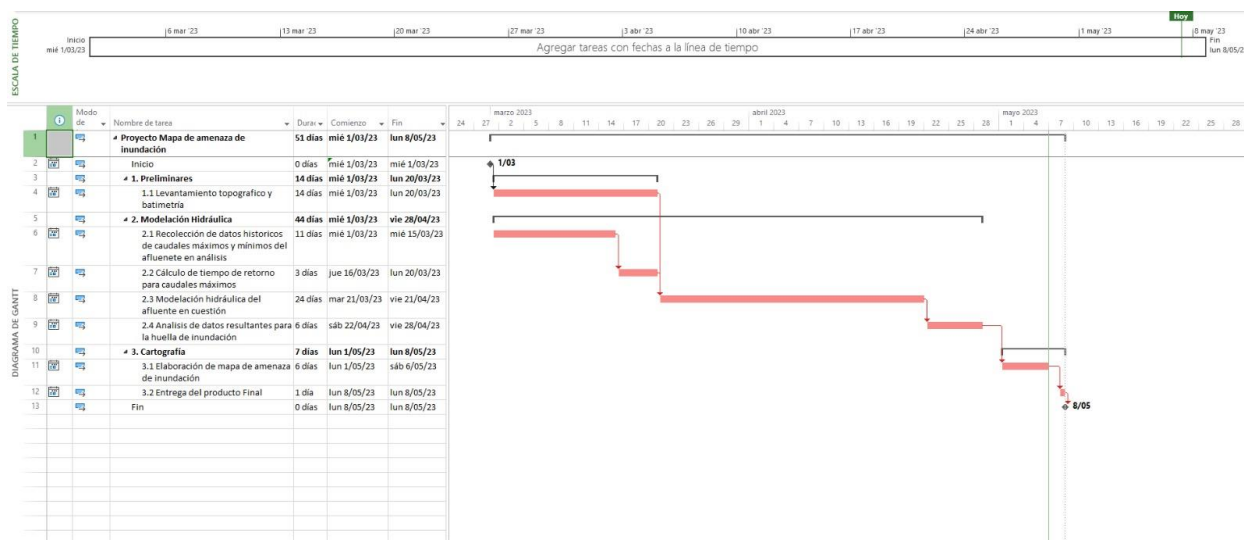
Fuente Propia.

## 11.2 Cronograma

En la proyección de las actividades a realizar en la investigación están contemplados los procesos desde el inicio hasta la entrega del producto final, para llevar un correcto control en la programación y control de los procedimientos, se realizó por medio del software Project la sistematización de este. Cabe destacar que, el proyecto se llevó a cabo en los límites de tiempo propuestos.

**Figura 37.**

*Programación de Actividades del Proyecto.*



Fuente Propia.



## Conclusiones

Se realizó el mapa de amenaza de inundación por medio del estudio hidrológico de la cuenca baja del Río Bogotá en el municipio de Girardot en el departamento de Cundinamarca, con el software HEC-RAS, donde se llevó a cabo la modelación hidráulica y se extrajeron datos como, la geometría de las secciones transversales, la altura de la lámina de agua, la elevación en cada punto en las secciones, la velocidad total que actuaba en el canal, esto con el propósito de realizar la cartografía con precisión.

Por otro lado, se recopiló la información del historial de los caudales máximos y mínimos de tres estaciones (la campiña, puente portillo y Girardot 2) que se encuentran ubicadas en la cuenca baja del río Bogotá, siendo de gran valor, considerando que, esta concordaba con los lapsos de tiempo donde el fenómeno de la niña ha actuado. Dentro de la investigación se obtuvo que la estación Puente Portillo tenía el mayor registro de caudal con  $537 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con base en lo anterior, se hallaron los caudales máximos para los periodos de retorno seleccionados en el análisis (2.33, 5, 20 y 100 años)

En el mismo sentido, se tomaron como referencia los antecedentes históricos de caudales máximos de la estación Puente Portillo. Adicionalmente, el cálculo de los periodos de retorno se realizó por el método de Gumbel debido a que contaba con un coeficiente de correlación lineal de 0.987, por lo que permitió tener un mejor grado de precisión que los demás métodos.

Por otra parte, se efectuó la modelación hidráulica del afluente en cuestión en la herramienta ArcGIS inicialmente, además se utilizaron las extensiones necesarias para tal fin como Hec- GeoRAS, Arc Hydro Tools, 3D Analyst y Spatial Analyst, resaltando que, al momento de ejecutar el exporte del archivo de datos a Hec-RAS surgían errores, muchos de estos eran a causa de actualización software, ocasionando que el análisis se retardara. Finalmente, se realizó el diseño completo por intermedio del programa computacional Hec-RAS, enfatizando que, en la actualidad este permite realizar toda la graficación con el empleo de la extensión de RAS Mapper. Con la realización de lo anterior, se lograron obtener datos de gran valor para la investigación.

Frente a la anterior, con la información obtenida en la modelación se efectuó la cartografía correspondiente a los mapas de huellas de inundación en función de los Tiempos de retorno de 2.33, 5, 20 y 100 años calculados, vale la pena mencionar que, este insumo será suministrado a la oficina de Prodesarrollo del municipio de Girardot, teniendo en cuenta que, existen comunidades que se encuentran en alto grado de vulnerabilidad de sufrir una tragedia a causa de inundaciones, como lo es el sector ubicado entre el K1+800 y k2+700 de la zona de estudio.

De igual forma, entre el tramo K1+800 y k2+100 se presentan los valores más altos de velocidad del flujo, además, en esa zona se encuentran viviendas unifamiliares ubicadas a menos de 100 metros de la ribera del afluente, recalcando que, en ese sector hay antecedentes por inundaciones sin pérdidas materiales, ni humanas. Sin embargo, el terreno presenta erosión por socavación, a causa de fluido del río.

Concluyendo, el producto final de esta investigación representa un insumo con alto impacto social, evaluando que, gracias al suministro de estos mapas, la oficina de Prodesarrollo del municipio de Girardot está llevando a cabo un Sistema de Alerta Temprana (SAT) por Inundaciones para ese sector, esto con el propósito de salvaguardar las vidas de las personas que habitan en la ribera del río Bogotá de la zona en análisis. De igual manera, en el evento de un incremento del caudal del afluente, el equipo de aviso proporcionará la alerta a los entes de gestión del riesgo y prevención de desastres del municipio para que puedan evacuar a los individuos que allí moran.

## Referencias

- Ali, T., & Mehrabian, A. (2009). A novel computational paradigm for creating a Triangular Irregular Network (TIN) from LiDAR data. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 71(12), e624-e629. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.na.2008.11.081>
- Alvarado Bello, S. (2014). *Uso de un sistema de información geográfica para el análisis de amenaza por inundaciones en la cuenca alta del río Bogotá, municipio de Cota, límites localidad de Suba* [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/1800>
- Basher, R. (2006). Global early warning systems for natural hazards: systematic and people centred. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 364(1845), 2167–2182. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1819>
- Campos, A., Holm, N., Díaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramírez, F. & Dickson, E. (2012). Resumen ejecutivo. Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia: un aporte para la construcción de políticas públicas. *Banco Mundial. Bogotá*.  
[https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Colombia\\_Estrategia\\_de\\_Pol%C3%ADtica\\_de\\_Gesti%C3%B3n\\_Financiera\\_P%C3%ABblica\\_ante\\_el\\_Riesgo\\_de\\_Desastres\\_por\\_Fen%C3%B3menos\\_de\\_la%20Naturaleza.pdf](https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Colombia_Estrategia_de_Pol%C3%ADtica_de_Gesti%C3%B3n_Financiera_P%C3%ABblica_ante_el_Riesgo_de_Desastres_por_Fen%C3%B3menos_de_la%20Naturaleza.pdf)
- Cárdenas Casas, N, Muñoz Barragán, J y Riaño Rincón, E. (2017). *Evaluación de amenaza por inundación en el sector Betania del municipio de Gachancipá, perteneciente a la cuenca alta del río Bogotá* [Tesis de posgrado, Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/14628>
- Cea, L., Álvarez, M., & Puertas, J. (2022). Estimation of flood-exposed population in data-scarce regions combining satellite imagery and high resolution hydrological-hydraulic modelling: A case study in the Licungo basin (Mozambique). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101247. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.ejrh.2022.101247>

- Chandrasekar, V. & Cifelli, R. 2012. Concepts and principles of rainfall estimation from radar: multi-sensor environment and data fusion. *Indian Journal of Radio y Space Physics*. 41: 389-402.  
<http://nopr.niscpr.res.in/bitstream/123456789/14747/1/IJRSP%2041%284%29%20389-402.pdf>
- Chen, Y., Fu, Q., Singh, V. P., Ji, Y., Li, M., & Wang, Y. (2023). Optimization of agricultural soil and water resources under fuzzy and random uncertainties: Synergy and trade-off between equity-based economic benefits, nonpoint pollution, and water use efficiency. *Agricultural Water Management*, 281, 108264. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.agwat.2023.108264>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (2019). Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá. POMCA río Bogotá 2019. p735.  
<https://www.car.gov.co/vercontenido/3691>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR. (2020). Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá, Subcuenca del Río Bajo Bogotá Apúlo - Girardot. p.432. <https://www.car.gov.co/vercontenido/46>
- Cruz Torres, H.E., & Cheng Lugo. (2019). *Análisis de riesgo hidrográfico por crecidas en la desembocadura de la Quebrada Cay* [Tesis de pregrado, Universidad de Ibagué].  
<https://hdl.handle.net/20.500.12313/1819>
- El Espectador (2016). Las cuentas pendientes con el Río Bogotá. [Imagen].  
<https://blogs.elespectador.com/actualidad/el-rio/las-cuentas-pendientes-con-el-rio-bogota>.
- Flores Domínguez, H. A., & López castro, J. A. (2018). *importación de puntos topográficos: creación de curvas de nivel y triangulación en softwares mineros minesight y vulcan* [Tesis de Licenciatura, Universidad de Sonora]. <http://hdl.handle.net/20.500.12984/1835>
- Georgakakos, K., Modrick, T., Shamir, E., Campbell, R., Cheng, Z., Jubach, R., Sperfslage, J, Spencer, C & Banks, R. (2022). La implementación del sistema de guía de inundaciones repentinas en todo el mundo: un esfuerzo exitoso de investigación a operaciones multidecadal, *Boletín de la Sociedad*

*Meteorológica Estadounidense*, 103 (3), p. E665-E679.

<https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/103/3/BAMS-D-20-0241.1.xml>

Ghesquiere, F. & Mahul O. (2010). Protección Financiera del Estado contra los Desastres Naturales: Una Cartilla. Documento de trabajo sobre investigación de políticas; No. WPS 5429. *Banco Mundial*.

<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/3912>

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2014). Metodología de la Investigación. México: McGraw Hill. Retrieved from <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (2023). Sector sur este del municipio de Girardot. [Imagen].

<https://www.colombiaenmapas.gov.co/?e=-79.65193536165513,1.9010551031861072,-66.6221502054086,8.614370417520995,4686&b=igac&u=76109&module=catastral#>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (S.f). Amenazas Inundación.

<http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2019, marzo). Estudio Nacional del Agua. [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023858/ENA_2018.pdf)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2018). Guía Metodológica para la elaboración de mapas de inundación. Bogotá, D.C., 2017. 110.

[http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA\\_METODOLOGICA\\_MAPAS\\_INUNDACION\\_MARZO\\_2018.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023774/GUIA_METODOLOGICA_MAPAS_INUNDACION_MARZO_2018.pdf)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (s.f). Modelación Hidrológica.

<http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrologica#:~:text=Un%20modelo%20hidrol%C3%B3gico%20es%20pues,representado%20por%20una%20expresi%C3%B3n%20anal%C3%ADtica>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM (2019). Guía Metodológica de la operación de estadística variables meteorológicas.

<http://www.ideam.gov.co/documents/11769/72085840/M-GDI-M-G002+GUIA+METODOL%C3%93GICA+DE+LA+OPERACI%C3%93N+ESTADISTICA+VARIABLES+METEOROL%C3%93GICAS.pdf/16ed20ac-dd40-4e37-a296-632e6e6d83fe>

Japan Aerospace Exploration Agency (2021). ALOS World 3D 30-meter DEM. V3.2, Jan 2021. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G94M92HB>

Kiaei, A., & Ahmadi, M. (2022). Evaluation of integrated Flood Management Alternatives (FMAs) by measuring basin-scale sustainability and resiliency capacities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 82, 103320. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.ijdrr.2022.103320>

Macherera, M & Chimbari, M. (2016). A review of studies on community based early warning systems. *Jamba*. 8(1):206. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29955285/>

Maskrey, A. (1997). Informe sobre las capacidades nacionales y locales para la alerta temprana. *Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN)*. <http://lib.riskreductionafrica.org/bitstream/handle/123456789/1255/4044.Report%20on%20national%20and%20local%20capabilities%20for%20early%20warning.pdf?sequence=1>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – MADS. (S.f). ¿Qué es la Gestión del Riesgo de Desastres? <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/gestion-del-riesgo-de-desastres/#:~:text=De%20acuerdo%20con%20la%20ley,del%20mismo%2C%20impedir%20o%20evitar>

Murcia, J. (2014). *Diseño de un modelo de comunicación satelital empleando redes VSAT para la telemetría del cauce del río Bogotá* [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia]. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/1026>.

Pokutta, D. A., Borodovskiy, A. P., Oleszczak, Ł, Toth, P., & Lidén, K. (2019). Mobility of nomads in central asia: Chronology and <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr isotope evidence from the pazyryk barrows of northern altai, russia.

Journal of Archaeological Science: Reports, 27, 101897. [https://doi-](https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.jasrep.2019.101897)

[org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.jasrep.2019.101897](https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.jasrep.2019.101897)

Rivera, G. (2020). *Determinación de la superficie de inundación del Río Bogotá en el sector de la Universidad Militar Nueva Granada-sede campus Cajicá*. [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/36807>

Revista Semana. (2022). Alerta por lluvias: se desborda el río Bogotá y estos son los municipios afectados. *Revista Semana*. <https://www.semana.com/nacion/articulo/alerta-por-lluvias-se-desborda-el-rio-bogota-y-estos-son-los-municipios-afectados/202229/>

Robayo, L. (2014). *Análisis de amenaza por inundación para la localidad de Tunjuelito, desarrollado a través de sistemas de información geográfica*. [Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/entities/publication/a89a4710-3ceb-4256-a1aa-41a1cb6d0d09>

Samet, R., & Hancer, E. (2012). A new approach to the reconstruction of contour lines extracted from topographic maps. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 23(4), 642-647. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.jvcir.2012.02.005>

Sanabria Diaz, W. (2021). *Análisis comparativo de los modelos Hec Ras e Iber en la determinación de las zonas de amenaza por inundación en el corregimiento de Santa Fe de Morichal, municipio de Yopal, departamento de Casanare* [Tesis de Posgrado, Universidad Católica de Colombia]. <https://hdl.handle.net/10983/26383>

Sánchez Alfonso, A. C., Venegas, C., Díez, H., Méndez, J., Blanch, A. R., Jofre, J., & Campos, C. (2020). Microbial indicators and molecular markers used to differentiate the source of faecal pollution in the Bogotá River (Colombia). *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 225, 113450. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.ijheh.2020.113450>

- Senado Cruz, R.K. (2012) *Gestión Integrada del riesgo de Inundaciones en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia].  
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27223/TFM\\_Gesti%C3%B3n\\_%20Inundaciones\\_Colombia\\_Karime\\_Sedano.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/27223/TFM_Gesti%C3%B3n_%20Inundaciones_Colombia_Karime_Sedano.pdf?sequence=1)
- Styring, A. K., Höhn, A., Linseele, V., & Neumann, K. (2019). Direct evidence for agricultural intensification during the first two millennia AD in northeast burkina faso. *Journal of Archaeological Science*, 108, 104976. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2019.104976>
- Torres Sam, L. O. (2015). *SIG aplicado a la zonificación por amenaza de inundación en la cuenca del río Polochic, Alta Verapaz, Guatemala* [Tesis de Maestría, Universidad San Francisco de Quito]. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/5671>
- T.S., S., C., M. F., & Bhagyanathan, A. (2022). The impact of upstream land use land cover change on downstream flooding: A case of Kuttanad and Meenachil River Basin, Kerala, India. *Urban Climate*, 41, 101089. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.uclim.2022.101089>
- UNEP & GEAS. (2012). Early Warning Systems: A State-of-the-Art Analysis and Future Directions. *Environmental Development*. 4: 136-171. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2012.09.004>
- Unidad Nacional para la Gestión de Riesgos de Desastres - UNGRD (2019). Guía para la Formulación de Proyectos de Intervención Correctiva.  
[http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Reduccion/Guia\\_proyectos\\_de\\_intervencion\\_correctiva.pdf](http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Documents/Reduccion/Guia_proyectos_de_intervencion_correctiva.pdf)
- UNISDR. (2006). Global Survey of Early Warning Systems. United Nations Report. Ginebra, Suiza. p. 46.  
<https://www.undrr.org/publication/global-survey-early-warning-systems>
- Wasko, C., Nathan, R., Stein, L., & O'Shea, D. (2021). Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change. *Journal of Hydrology*, 603, 126994. <https://doi-org.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.jhydrol.2021.126994>



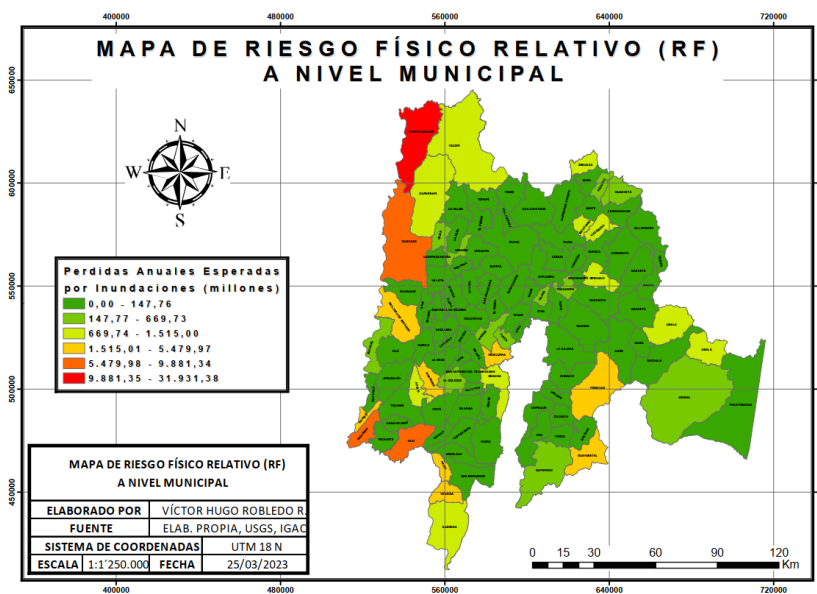
Yang, B., Li, Q., & Shi, W. (2005). Constructing multi-resolution triangulated irregular network model for visualization. *Computers & Geosciences*, 31(1), 77-86.

<https://doiorg.ezproxy.uniminuto.edu/10.1016/j.cageo.2004.09.011>

Anexos

Anexo 1.

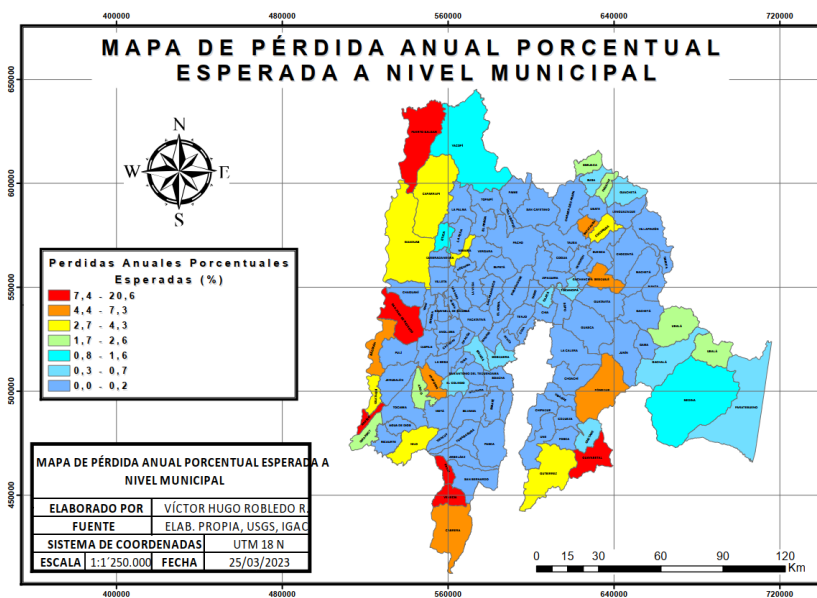
Mapa de Riesgo Físico Relativo (RF) a Nivel Municipal.



Nota: Mapa de riesgo Físico Relativo (RF) a nivel municipal, en función de las pérdidas anuales esperadas por inundaciones, Fuente Propia.

Anexo 2.

Mapa de Pérdida Anual Porcentual Esperada a Nivel Municipal.



Fuente Propia.