

**Modelación Hidrodinámica Bidimensional para la Identificación de Zonas de
Inundación en la Confluencia entre el Río Chicamocha y el Surba**

**Jonathan Stiven Antonio Lemus
Juan Andrés Cuervo Camacho**

**Universidad de Boyacá
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Ingeniería Ambiental
Tunja
2022**

**Modelación Hidrodinámica Bidimensional para la Identificación de Zonas de
Inundación en la Confluencia entre el Río Chicamocha y el Surba**

Jonathan Stiven Antonio Lemus

Juan Andrés Cuervo Camacho

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Ambiental**

Director

Jaime Díaz Gómez

Mg. Ciencias Ambientales y Tecnologías

Codirector

Sergio David Torres Piraquive

Universidad de Boyacá

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Ingeniería Ambiental

Tunja

2022

Nota de Aceptacion

Firma Presidente de Jurados

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Tunja, 23 de junio de 2022

“Únicamente el graduando es responsable de las ideas expuestas en el presente trabajo”.
(Universidad de Boyacá. Acuerdo 958 del 30 de marzo de 2017, Artículo décimo primero).

Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial a nuestro director de tesis el Ing. Jaime Díaz Gómez por su valiosa disposición y conocimientos brindados a lo largo del desarrollo del proyecto.

De manera especial a el Ing. Sergio David Torres Piraquive que tuvo un gran aporte de conocimientos, disposición, paciencia y de interés en cuanto a la realización de nuestro proyecto.

Agradecemos a los docentes de la carrera de Ingeniería Ambiental en especial a la Ing. Olga Usaquén y al Ing. Diego Guio por aportar de sus tiempos y de sus valiosos conocimientos.

Finalmente, a la Universidad de Boyacá por ser la sede de nuestro conocimiento adquirido en estos años

Dedicatoria

El presente trabajo de grado lo dedicamos primeramente a Dios que nos dio la fuerza y conocimiento para obtener uno de nuestros anhelos más deseados.

A nuestras familias, que nos apoyaron pese a los obstáculos que se presentaron en el trayecto del proyecto.

Contenido

	Pág.
Introducción.....	23
Área de estudio.....	29
Paipa.....	29
Río Chicamocha y Río Surba.	30
Cálculo de los Caudales para los Diferentes Eventos Extremos	32
Elaboración de la interfaz gráfica	32
Elaboración del frontend.....	32
Elaboración del backend.....	37
Integración del backend y frontend.	46
Análisis de los resultados generados por la interfaz grafica.....	57
Elaboración del Modelo Hidrodinámico	69
Elaboración de la topografía en ArcGIS.	69
Elaboración del modelo en HEC RAS	72
Crear nuevo proyecto.....	72
Crear un nuevo terreno en la extensión de RAS Mapper.	74
Elaboración del polígono a modelar.....	75
Elaboración del mallado 2D.....	77
Delimitación de las líneas de contorno aguas arriba y aguas abajo.....	78
Cálculo de la tabla hidrodinámica de flujo del área 2D.....	79
Incorporación de los datos del flujo no estacionario.	80
Selección y configuración de los resultados a generar.....	83
Computación.	84
Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning respectivo de las zonas.	85
Aplicación dentro del modelo del coeficiente de rugosidad de manning determinado.	87
Simulación para los Diferentes Eventos Extremos de Caudal	96
Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 5 años	96

Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 10 años	100
Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 25 años	104
Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 50 años	109
Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 100 años	115
Análisis de los Calados y las Zonas de Inundación.....	122
Análisis de las Velocidades	128
Conclusiones.....	130
Recomendaciones	132
Referencias	133
Anexos	139

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización del área de influencia del proyecto	29
Figura 2. Delimitación área de influencia del estudio vista satelital	30
Figura 3. Delimitación área de influencia del estudio	31
Figura 4. Librería tkinter	32
Figura 5. Coordenadas para la elaboración de la interfaz.....	33
Figura 6. Codificación para realizar la ventana	33
Figura 7. Codificación de las etiquetas (Label).....	35
Figura 8. Codificación de los botones (Button).....	35
Figura 9. Codificación de campos de entrada (Entrys)	36
Figura 10. Código de cierre para la interfaz gráfica	36
Figura 11. Pestaña interfaz gráfica	36
Figura 12. Código de ruta de entrada de datos	37
Figura 13. Código de ruta de salida de datos.....	37
Figura 14. Librerías de Python a utilizar	38
Figura 15. Código de ruta y salida de datos	38
Figura 16. Código para procesar e importar datos dentro de la librería Pandas.....	38
Figura 17. Variables de entrada y salida de fechas.....	38
Figura 18. Código de los datos filtrados de caudales mensuales mínimos, medios y máximos	39
Figura 19. Código de parámetros de entrada para la función filtrar mensuales	39
Figura 20. Código en función de los datos filtrados de caudales máximos anuales.....	39
Figura 21. Código de parámetros de entrada para la función filtrar máximos anuales	39
Figura 22. Código para determinar los outliers de los caudales máximos anuales	40
Figura 23. Parámetros de entrada para la determinación de los outliers	40
Figura 24. Código para generar el grafico de caudales mensuales mínimos, medios y máximos	41
Figura 25. Código para generar el grafico de caudales máximos diarios.....	41
Figura 26. Código para generar el grafico de caudales máximos anuales.....	42

Figura 27. Código para generar el grafico de caudales máximos anuales con outliers	42
Figura 28. Código para generar los histogramas de mínimos, medios y máximos	42
Figura 29. Funciones para determinar el ajuste estadístico de los datos de caudales máximos	43
Figura 30. Código para la determinación del análisis de frecuencia	43
Figura 31. Código para realizar la prueba de ajuste de bondad.....	44
Figura 32. Código para graficar las distribuciones.....	44
Figura 33. Código para la determinación de los máximos periodos de retorno	45
Figura 34. Parámetros para determinar el análisis de frecuencias y los caudales máximos ajustados a una distribución de probabilidad en distintos periodos de retorno	46
Figura 35. Código para generar en ruta de salida gráficos	46
Figura 36. Código para generar en ruta de salida caudales máximos	47
Figura 37. Código para generar en ruta de salida los caudales máximos anuales ajustados a una distribución de probabilidad en diferentes periodos de retorno.....	47
Figura 38. Código para generar en ruta de salida estadísticos de caudales mínimos, medios y máximos mensuales.....	47
Figura 39. Asignación de funciones a los botones por comandos.....	48
Figura 40. Interfaz gráfica final.....	48
Figura 41. Extensión para importar archivos tipo csv a la interfaz	49
Figura 42. Selección de archivo a importar en la interfaz	49
Figura 43. Verificación de la ruta del archivo importado.....	50
Figura 44. Extensión para definir la ruta de salida de los archivos	50
Figura 45. Selección de la ruta de salida de los archivos	51
Figura 46. Verificación de la ruta de salida del archivo.....	51
Figura 47. Ingreso de los periodos de tiempo inicial y final	52
Figura 48. Extensión para generar los máximos anuales.....	52
Figura 49. Generación de caudales máximos anuales	53
Figura 50. Extensión para generar estadísticos mensuales.....	53
Figura 51. Generación de estadísticos mensuales	54
Figura 52. extensión para generar gráficos.....	54
Figura 53. Generación de gráficos.....	55

Figura 54. Extensión para generar grafico de distribuciones de probabilidad y caudales máximos en tiempos de retorno ajustados con distribución probabilidad.....	55
Figura 55. Generación de grafico de distribuciones de probabilidad y caudales máximos en tiempos de retorno ajustados con distribución probabilidad	56
Figura 56. Selección de los tiempos de retorno que se utilizaron	56
Figura 57. Selección de la distribución que mejor ajusta	57
Figura 58. Caudales máximos diarios reportados en la estación la Siberia.....	60
Figura 59. Caudales máximos diarios reportados en la estación la Trinidad	60
Figura 60. Caudales mínimos, medios y máximos mensuales reportados en la estación la Siberia.....	61
Figura 61. Caudales mínimos, medios y máximos mensuales reportados en la estación la Trinidad	61
Figura 62. Caudales máximos anuales con outliers reportados en la estación la Siberia.....	62
Figura 63. Caudales máximos anuales con outliers reportados en la estación la Trinidad	62
Figura 64. Caudales máximos anuales reportados en la estación la Siberia.....	63
Figura 65. Caudales máximos anuales reportados en la estación la Trinidad	63
Figura 66. Histograma de caudales mínimos mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad	64
Figura 67. Histograma de caudales medios mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad	65
Figura 68. Histograma de caudales máximos mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad	66
Figura 69. Distribuciones de probabilidad estación la Siberia	67
Figura 70. Distribuciones de probabilidad estación la Trinidad.....	67
Figura 71. Ubicación de la confluencia	70
Figura 72. TIN del terreno	71
Figura 73. Ráster del terreno	71
Figura 74. Ráster con escala de alturas a color de escala de grises	72
Figura 75. Ráster con escala de alturas a color.....	72
Figura 76. Creación de carpeta en HEC RAS	73
Figura 77. Cambio de unidades	73

Figura 78. Herramienta RAS Mapper	74
Figura 79. Importar Ráster en formato tiff	74
Figura 80. Terreno montado en formato tiff.....	75
Figura 81. Conversión del tiff a formato JPG	75
Figura 82. Herramienta para el trazado de geometría	76
Figura 83. Herramienta para el trazado del polígono 2D	76
Figura 84. Polígono del área de flujo 2D	76
Figura 85. Herramienta para elaborar mallado 2D	77
Figura 86. Definición de espaciados DX y DY	77
Figura 87. Mallado	78
Figura 88. Línea de contorno aguas arriba río Chicamocha (entrada)	78
Figura 89. Línea de contorno aguas arriba río Surba (entrada)	79
Figura 90. Líneas de contorno aguas abajo confluencia (salida).....	79
Figura 91. Corrección error de mallado.....	80
Figura 92. Mallado corregido	80
Figura 93. Asignación de pendientes para el cauce (salida).....	81
Figura 94. Asignación de caudales y pendiente del río Chicamocha	82
Figura 95. Asignación de caudales y pendiente del río Surba.....	83
Figura 96. Programas a modelar.....	83
Figura 97. Configuración de valores para ejecutar el modelo	84
Figura 98. Computación completa	84
Figura 99. Modelo en condiciones máximas con caudal 0.5 m ³ /s.....	85
Figura 100. Coeficientes de rugosidad de Manning empleados en el modelo hidrodinámico bidimensional	87
Figura 101. Ráster e imagen satelital en el programa ArcGIS	88
Figura 102. Ruta para la creación del shapefile para designar el coeficiente de Manning	88
Figura 103. Creación de nuevo shapefile	89
Figura 104. Designación de coordenadas	89
Figura 105. Trazado del polígono para el shapefile con los coeficientes de Manning.....	90
Figura 106. Herramienta para recortar el polígono según uso de suelos de la zona de estudio	90
Figura 107. Polígonos según el tipo de uso de suelo presente en la zona de estudio.....	91

Figura 108. Introducción de valores de coeficiente de Manning	91
Figura 109. Exportar datos del shapefile con los polígonos de Manning en formato “.shp” ...	92
Figura 110. Importar cobertura de coeficiente de Manning en RAS Mapper	92
Figura 111. Importar polígonos de Manning en formato shapefile al RAS Mapper.....	93
Figura 112. Asignación de los valores de Manning para los polígonos en el programa RAS Mapper.....	93
Figura 113. Proceso de creación e importación del terreno con los polígonos de coeficiente de Manning.....	94
Figura 114. Polígonos con coeficiente de Manning en el programa RAS Mapper	94
Figura 115. Verificación de la importación de los polígonos de coeficiente de Manning al modelo	95
Figura 116. Caudales en los dos cauces para los diferentes periodos de retorno	95
Figura 117. Modelado para el calado máximo de agua en un periodo de retorno de 5	96
Figura 118. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 5 años (calado máximo aproximado 2.53 metros)	97
Figura 119. Dirección del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba en un periodo de retorno de 5 años.....	98
Figura 120. Datos estadísticos de profundidad o calado en metros para los dos tramos modelados en un periodo de retorno de 5 años	98
Figura 121. Modelado para la máxima de velocidad en un periodo de retorno de 5 años	99
Figura 122. Dirección del flujo de las velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 5 años	99
Figura 123. Modelado e identificación de zonas inundables en el calado máximo de agua en para un periodo de retorno de 10 años.....	100
Figura 124. Dirección del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 10 años.....	101
Figura 125. Datos estadísticos de profundidad o calado en metros en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 10 años	102
Figura 126. Modelado de la velocidad máxima para un periodo de retorno de 10 años.....	102
Figura 127. Dirección del flujo de las velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 10 años	103

Figura 128. Datos estadísticos de velocidad en m/s para los dos tramos modelados en un periodo de retorno de 10 años.....	104
Figura 129. Modelado para el calado máximo de agua en un periodo de retorno de 25 años	105
Figura 130. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 25 años (altura máxima aproximada 2.69 metros de profundidad).....	105
Figura 131. Dirección del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 25 años.....	106
Figura 132. Datos estadísticos de calado o profundidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 25 años.....	107
Figura 133. Modelado de las velocidades para un periodo de retorno de 25 años.....	107
Figura 134. Dirección del flujo con velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 25 años	108
Figura 135. Datos estadísticos de velocidad para los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 25 años	109
Figura 136. Modelado para el calado máximo de agua en un periodo de retorno de 50 años	110
Figura 137. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 50 años (altura máxima aproximada en el cauce es de 5.20 metros) ..	110
Figura 138. Dirección y comportamiento del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 50 años	111
Figura 139. Datos estadísticos de profundidad o calado en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 50 años.....	112
Figura 140. Modelado para el calado máximo de velocidad en un periodo de retorno de 50 años.....	113
Figura 141. Velocidades en la sinuosidad del río Chicamocha y la confluencia con el Surba para un periodo de retorno de 50 años (velocidad máxima aproximada 91.27 m/s y 46.77 m/s)	113
Figura 142. Dirección de las velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 50 años.....	114
Figura 143. Datos estadísticos de velocidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 50 años	114

Figura 144. Modelado en el calado máximo de agua para un periodo de retorno de 100 años	115
Figura 145. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años (altura máxima aproximada en la confluencia es de 5.17 metros).....	116
Figura 146. Dirección del caudal en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años.....	117
Figura 147. Datos estadísticos de calado o profundidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 100 años.....	117
Figura 148. Modelado para el calado máximo de velocidad en un periodo de retorno de 100 años.....	118
Figura 149. Velocidades en la sinuosidad del río Chicamocha y en la confluencia con el río Surba para un periodo de retorno de 100 años (velocidad aproximada en un tramo del río Chicamocha es de 28.57 m/s y para el tramo del río Surba es de 55.83 m/s)	119
Figura 150. Velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años (velocidad máxima aproximada 1.66 m/s).....	120
Figura 151. Dirección y comportamiento del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años	120
Figura 152. Datos estadísticos de velocidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 100 años	121
Figura 153. Mapeo de huellas de inundación para los diferentes periodos de retorno.....	122
Figura 154. Perfiles del terreno para la huella de inundación aledaña a las construcciones ..	123
Figura 155. Perfiles topográficos para la huella de inundación después de la confluencia del río Chicamocha con el río Surba	124
Figura 156. Perfiles topográficos para la sinuosidad donde se presentan inundaciones, tramo del río Chicamocha.....	124
Figura 157. Perfil topográfico transversal del cauce y de la huella de inundación, tramo río Chicamocha	125
Figura 158. Perfiles topográficos para la sinuosidad donde se presentan inundaciones, tramo río Chicamocha.....	125

Figura 159. Perfiles topográficos transversales del tramo de huellas de inundación para un tramo del río Chicamocha.....	126
Figura 160. Perfiles topográficos de la zona donde se presentan mayores velocidades en el tramo del río Chicamocha.....	128
Figura 161. Perfiles topográficos transversales para la zona con presencia de mayores velocidades en un tramo del río Chicamocha.....	129

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Reporte de datos de caudales máximos anuales para un periodo de 20 años en las estaciones la Siberia y la Trinidad.....	58
Tabla 2. Estadísticos de los caudales mínimos, medios y máximos mensuales.....	59
Tabla 3. Estadísticos de los caudales mínimos, medios y máximos mensuales en la estación la Trinidad	59
Tabla 4. Resultados de caudales para los diferentes periodos de retorno para el río Chicamocha - estación la Siberia.....	68
Tabla 5. Resultados de caudales para los diferentes periodos de retorno para el río Surba - estación la Trinidad	68
Tabla 6. Valores recomendados para cauces naturales según tablas de ayuda del programa HEC – RAS	86

Lista de Anexos

	Pág.
Anexo A. Anteproyecto de Grado	140
Anexo B. Interfaz gráfica y modelo hidrodinámico bidimensional (adjunto en CD ROM) ..	199

Glosario

Avenida: es un caudal de alta magnitud, llamado también crecida de un río que se presenta generalmente de manera muy rápida.

Balance hídrico: es el balance de agua elaborado con el principio de que durante un intervalo de tiempo el aporte total a una cuenca o masa de agua debe ser igual a la salida total de agua más la variación neta en el almacenamiento de dicha cuenca o masa de agua.

Calibración: ajuste de los parámetros de un modelo, ya sea con base en consideraciones físicas o mediante optimización matemática, de manera que la concordancia entre los datos observados y los resultados del modelo sea la mejor posible.

Caudal: es el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo (m^3/s).

Cota: es una medida de longitud que alude a la altitud en un plano horizontal teniendo en cuenta el nivel del mar como referencia (msnm) u otro plano de nivel como un río.

Cotas de inundación: son los niveles de los ríos que se tienen de referencia para poder alertar a la población ante la probabilidad de que se presente una inundación y corresponden también con los niveles a partir de los cuales se comienza a presentar las primeras afectaciones en zona urbanas.

Cuenca: red de drenaje de un curso de agua, río o lago.

Hidrograma: gráfico que muestra la variación temporal de variables hidrológicas tales como el nivel de agua, el caudal, la velocidad y la carga de sedimentos.

Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS): es un software gratuito que permite la modelación hidráulica unidimensional, usado principalmente para estudios de inundabilidad y determinar zonas inundables.

Llanuras Aluviales: es la parte orográfica de fondo plano que contiene un cauce y que puede ser inundada ante una eventual crecida de las aguas de este.

Modelo de Elevación Digital (DEM): es una representación en formato raster de una superficie continua, estos permiten trabajar gran cantidad de variables ambientales con las cuales trabajar.

Modelo hidrológico: modelo deducido a partir del análisis de series temporales de datos históricos utilizados para generar secuencias hipotéticas de sucesos a partir de la representación matemática simplificada de alguno o todos los procesos del ciclo hidrológico. Los modelos hidrológicos conceptuales se aplican en la simulación del comportamiento de una cuenca.

Onda de avenida: es el aumento del caudal de una corriente de agua hasta un valor máximo y su posterior recesión, a consecuencia de un período de precipitaciones, rotura de presa o vertidos de centrales hidroeléctricas.

Perfil transversal: hace referencia a la forma del lecho de un curso de agua en un plano vertical puede ser longitudinal o transversal.

Python: es un lenguaje de programación multiparadigma y disponible en varias plataformas.

Profundidad de flujo o calado: es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, es decir la profundidad máxima del agua en el canal.

Resumen

Cuervo Camacho Juan Andrés

Modelación hidrodinámica bidimensional para la identificación de zonas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y el Surba / Jonathan Stiven Antonio Lemus, Juan Andrés Cuervo Camacho. - - Tunja : Universidad de Boyacá, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2022.

200 p. : il. + 1 CD ROM. - - (Trabajos de Grado UB, Ingeniería Ambiental; n°)

Trabajos de Grado (Ingeniero Ambiental). - - Universidad de Boyacá, 2022.

El proyecto presenta la elaboración de una interfaz gráfica con el fin de determinar los caudales máximos en diferentes periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años) para posteriormente incluirlos dentro de la elaboración de un modelo hidrodinámico bidimensional que permita determinar las zonas susceptibles a inundación en el área de estudio la confluencia entre el río Chicamocha y el río Surba.

Se plantea simular por medio del modelo hidrodinámico los caudales de los diferentes eventos extremos para determinar las zonas susceptibles a inundación en la zona de estudio la confluencia entre el río Chicamocha y el río Surba.

Se empleo un tipo de investigación experimental que permitió dar a conocer las diferentes zonas susceptibles de inundación en el área de estudio bajo diferentes eventos extremos de caudal empleando un modelo hidrodinámico bidimensional, cuyas fuentes de información primarias para determinar las zonas fue el modelo y la interfaz gráfica diseñada; fuentes secundarias como manuales de los respectivos programas utilizados, páginas web relacionadas con el tema, libros y estudios de la zona. Se obtuvo de la interfaz gráfica diseñada en python los caudales máximos a modelar, así mismo, se tomó la topología del área de estudio que fue elaborada en la consultoría realizada por CORPOBOYACÁ y el CONSORCIO RÍO CHICAMOCHA IEH GRUCON – H&E, información que posteriormente se utilizaría para diseñar el modelo hidrodinámico y llevar a cabo la determinación de las zonas susceptibles de inundación.

Si bien el modelo hidrodinámico bidimensional arrojó resultados confiables en las simulaciones; cabe resaltar que se trabajó con coeficientes de rugosidad de Manning teóricos, por tanto, para a inclusión de estos resultados dentro de los planes de ordenamiento territorial del municipio Paipa y los planes de gestión del riesgo se recomienda que el modelo hidrodinámico bidimensional sea calibrado y validado por medio de la determinación en campo de los coeficientes de rugosidad de Manning respectivos del terreno siguiendo la metodología que mejor se ajuste.

Palabras clave: Modelo Hidrodinámico Bidimensional, Python, Lenguaje de Programación, Inundaciones, Caudales, Interfaz Gráfica.

Abstract

Cuervo Camacho Juan Andrés

Two-dimensional hydrodynamic modeling for the identification of flood zones at the confluence between the Chicamocha and Surba rivers. / Jonathan Stiven Antonio Lemus, Juan Andrés Cuervo Camacho. - - Tunja : University of Boyaca, College of Science and Engineering, 2022.

200 p. : il. + 1 CD ROM. - - (Degree Work UB, Environmental Engineering; n°)

Degree Work (Environmental Engineer). - - University of Boyaca, 2022.

The project presents the elaboration of a graphical interface in order to determine the maximum flows in different return periods (5, 10, 25, 50 and 100 years) to later include them within the elaboration of a two-dimensional hydrodynamic model that allows determining the areas susceptible to flooding in the study area the confluence between the Chicamocha River and the Surba River.

It is proposed to simulate through the hydrodynamic model the flows of the different extreme events to determine the areas susceptible to flooding in the study area, the confluence between the Chicamocha River and the Surba River.

A type of experimental research was used that allowed to reveal the different areas susceptible to flooding in the study area under different extreme flow events using a two-dimensional hydrodynamic model, whose primary sources of information to determine the areas were the model and the graphic interface designed; secondary sources such as manuals of the respective programs used, web pages related to the subject, books and studies in the area. The maximum flows to be modeled were obtained from the graphical interface designed in python, likewise, the topology of the study area was taken, which was elaborated in the consultancy carried out by CORPOBOYACÁ and the CHICAMOCHA RIVER CONSORTIUM IEH GRUCON – H&E, information that would later be used to design the hydrodynamic model and carry out the determination of the areas susceptible to flooding.

Although the two-dimensional hydrodynamic model yielded reliable results in the simulations; it should be noted that we worked with theoretical Manning roughness coefficients, therefore, for the inclusion of these results within the land use plans of the Paipa municipality and the risk management plans, it is recommended that the two-dimensional hydrodynamic model be calibrated and validated by the means of field determination of the respective Manning roughness coefficients of the terrain following the methodology that best fits.

Keywords: Two-Dimensional Hydrodynamic Model, Python, Programming Language, Floods, Flow Rates, Graphic Interface.

Introducción

En los últimos años la incidencia del cambio climático ha cobrado notoriedad en todos los sistemas sociales, ambientales y naturales del planeta, propiciando afectaciones que incrementan cada día debido a las interacciones antropogénicas de los procesos en el desarrollo de la sociedad. La variabilidad climática y el cambio climático generan entonces fuertes anomalías en las precipitaciones, que, unidas a las intervenciones humanas en los ecosistemas, las obras de infraestructura, los asentamientos de la población en lechos con cuerpos hídricos, configuran así una “construcción social vulnerable”, que frente a amenazas de lluvias intensas impactan fuertemente la sociedad y los sectores productivos del país (Sedano, Carvajal & Ávila, 2012).

A lo largo de los años se han aunado esfuerzos en muchos países e innumerables ciudades para brindar estrategias en materia de gestión integral frente al riesgo por inundaciones con el fin de fomentar y fortalecer la resistencia urbana ante estos sucesos. Durante las últimas dos décadas, la política mundial frente al cambio climático se centró primordialmente en mitigar las catástrofes ocasionadas por las abundantes y repetitivas inundaciones propiciadas por lluvias y tormentas intensas, que debido al cambio climático incrementan inusitadamente su intensidad, acrecentando con ello daños socio-económicos en los países (Molina-Prieto, 2016).

El riesgo a inundaciones y desastres socioeconómicos y ambientales permanece constante debido a la dependencia histórica de nuestra sociedad por la necesidad del recurso hídrico en el desarrollo de actividades y procesos básicos para la subsistencia de la vida, es debido a esto que gran parte de la sociedad se ve obligada a llevar sus asentamientos más próximos a fuentes de agua (ríos, lagos o mares y océanos), acciones que generan una alteración en las diversas dinámicas ambientales relacionadas con estas fuentes (ejemplo de esto es el aumento y variación de caudales debido a la precipitación). A lo largo de la historia se han reportado diversos desastres por inundaciones a nivel mundial que han colapsado a la sociedad en diversos sectores (salud y economía) impidiendo el desarrollo de esta, entre algunos de los más catastróficos se encuentran; la gran inundación del río Mississippi de 1927 (las fuertes lluvias aumentaron los niveles del agua del río Cumberland llegando incluso a los 17 metros), las inundaciones en las Filipinas (a principios de 2012 las inundaciones destruyeron las casas de más de 10.000 personas), el desbordamiento del Amazonas (inundación debida a los diluvios de 1953,

originando un flujo de 370.000 m³/s de agua), entre otras más inundaciones reportadas diaria, mensual y anualmente.

La vulnerabilidad de la población ante estos acontecimientos amplía la capacidad de las comunidades a diseñar sistemas de prevención y resiliencia para la sociedad, creando programas que permiten conocer a una escala semi real las dimensiones catastróficas (socio-ambientales) que tendría un incremento en los niveles de agua en ríos, cuencas, lagos, embalses, entre otros, también se han diseñado planes de control por medio del monitoreo espacio temporal haciendo uso de satélites y de herramientas de información geográfica. Estos instrumentos y programas permiten a la sociedad diseñar planes de resiliencia ante inundaciones, disponiendo al continuo y óptimo desarrollo urbano, aportando concepciones, dimensiones, enfoques y diversas variables que deben tomarse en cuenta para asegurar, mejorar y concebir una capacidad de respuesta temprana y óptima en el ordenamiento urbano, acciones tomadas en diversos países y gobiernos a nivel mundial.

Colombia, es un país con diversidad de recursos hídricos en donde se han presentado grandes impactos a causa de las inundaciones. Según el IDEAM a través del estudio nacional del agua (2018) se identificó que en el país existen 190.935 km² con condiciones favorables a la inundación. es decir, aproximadamente el 17% del área continental del territorio nacional. (Idiger, 2021). Al revisar los últimos 50 años del país, se ha observado que gran diversidad de áreas han sufrido graves consecuencias debido a las inundaciones; todo esto, debido a que el país presenta lluvias que superan los promedios y a que ocurren fenómenos meteorológicos como el de la niña que generan desbordamientos de múltiples ríos. Por ejemplo, en los años 2010 y 2011 el país sufrió la peor catástrofe hidrológica relacionada a la ocurrencia del fenómeno de la niña, donde el 93% de los municipios de Colombia se vio afectado por las inundaciones registrando un total de 3.219.239 personas afectadas, más de 37 mil viviendas comprometidas y un millón de hectáreas cultivables inundadas (Sedano & Carvajal, 2013).

En Colombia la problemática de inundaciones se ha venido presentado debido a la falta de planeación. Por lo tanto, se han propuesto numerosas estrategias en el marco de generar soluciones. Por ejemplo, en el estudio realizado por Mosquera y Ahmad (2005) la amenaza de inundaciones causadas por el río Atrato en Quibdó, se evaluó mediante técnicas de modelado estadístico (Gumbel y GRADEX), modelado hidráulico con HEC-RAS y los sistemas de información Geográfica (GIS) con el fin de obtener resultados que puedan ser útiles para la

planificación de la evacuación, la estimación de daños y los esfuerzos de recuperación después de las inundaciones.

Así mismo y debido al surgimiento de estos modelos, los problemas y/o obstáculos se hicieron presentes en materia de ausencia y veracidad de datos, por tanto Pérez, Escobar y Fragozo (2018) plantearon una metodología que solventa la escasez de datos para la modelación 2D de inundaciones en un tramo del río Ranchería a través de la digitalización de la elevación disponible en Google Earth integrada con secciones levantadas en el río y datos topográficos, logrando obtener una nube de puntos topográfica. Posteriormente, se interpola en una red de triángulos irregulares para generar un nuevo modelo digital del terreno. Como resultado se planteó que la metodología es útil para el cálculo de áreas inundables en zonas deltaicas y apoyo a la toma de decisiones en regiones con escasez de datos.

El Río Chicamocha es un sistema hídrico de bastante importancia para Colombia, es debido a esto, que existen numerosos estudios realizados a este cuerpo hídrico, con el fin de determinar el comportamiento de este ante diferentes escenarios para poder así prevenir o mitigar catástrofes socio ambientales. Por lo anterior, en el estudio llevado a cabo por el CONSORCIO RÍO CHICAMOCHA IEH GRUCON - H&E en el año de 2019, realizaron una consultoría enfocada en estudios técnicos necesarios para definir la ronda de protección ambiental, la cota máxima de inundación y las alternativas de adecuación hidráulica en el cauce principal de la cuenca alta del río Chicamocha, a lo cual es pertinente para la inclusión de este como fuente de información para el presente proyecto.

Por otra parte, el río Surba es una cuenca de gran importancia puesto que este cauce entrega gran cantidad de aguas al río Chicamocha. Según la consultoría realizada por el CONSORCIO RÍO CHICAMOCHA IEH GRUCON - H&E, 2019 se da a conocer que es indispensable que se realicen estudios para determinar la ronda hídrica de este afluente. Por lo tanto, el presente estudio servirá como insumo preliminar para la limitación de la ronda hídrica en el río Surba.

Las inundaciones corresponden a una consecuencia derivada de otros procesos de recurrencia interanual como son las crecidas de los cursos de agua, sumado ello, a condiciones de insuficiencia de los sistemas de evacuación, sean estos cauces naturales, sistemas de drenaje artificializados, colectores urbanos, etc. Se trata del resultado del desequilibrio que se manifiesta en un momento, lugar y situación dada, entre el volumen hídrico a evacuar en una determinada parcela de tiempo, y la capacidad de evacuación de los cauces o sistemas de drenaje o, en otras

palabras, la oferta del cauce se ve superada por la demanda en el cauce. Debe tenerse en cuenta, además, que dicha demanda no está compuesta sólo por agua, sino también por los sedimentos que esta transporta y arrastra, y cuya proporción respecto del volumen hídrico, sumado a las variaciones en la capacidad de carga del curso de agua, va a influir directamente en la ocurrencia de los desbordes (Ferrando, 2006).

Los modelos hidrodinámicos desempeñan un papel clave a la hora de sugerir medidas preventivas para la gestión de inundaciones mediante la identificación de puntos críticos de riesgo de inundaciones. Varios investigadores utilizaron ampliamente un enfoque de modelado hidrodinámico para estudiar las inundaciones en las llanuras aluviales. Los datos de teledetección y las aplicaciones de SIG ayudan a conocer el alcance de las inundaciones, la evaluación de daños por inundaciones, el mapeo de llanuras aluviales, etc. Algunos investigadores utilizaron imágenes de radar de apertura sintética (SAR) para estudiar la dinámica de inundaciones de la llanura aluvial. El procedimiento de modelado de inundaciones comprende principalmente la solución de ecuaciones de Saint-Venant utilizando técnicas numéricas.

La mayoría de los modelos de inundaciones son impulsados principalmente por una condición de límite de flujo aguas arriba para simular la hidrodinámica del río en una o dos dimensiones para obtener la elevación de la superficie del agua (WSE), la velocidad y la extensión de la inundación para un alcance de estudio. Las entradas clave para este enfoque incluyen la topografía para definir la geometría del río, el flujo de la corriente y el coeficiente de rugosidad (n de Manning). Está bien documentado en la literatura que el enfoque actual de modelado de inundaciones se ve afectado por varias incertidumbres que surgen de estimaciones de descarga, datos topográficos, selección de modelos y parametrización, entre otros (Cook y Merwade, 2009; Hall et al., 2005; Legleiter et al., 2011; Merz y Thielen, 2005; Pappenberger et al., 2006; Saksena y Merwade, 2015; Straatsma y Huthoff, 2011).

Una de las limitaciones de la simulación de inundaciones en ríos usando un modelo hidrodinámico es que no puede incorporar la interacción entre el tramo del río y el subsuelo, lo que puede jugar un papel crítico en dictar la duración y extensión de la inundación. Esta interacción se vuelve aún más crítica cuando las inundaciones se simulan en una red de arroyos más grande en lugar de tramos individuales. Por ejemplo, modelos como RAPID (Routing Application for Parallel Computation of Discharge), LISFLOOD-FP y AutoRoute (Bates y De

Roo, 2000; David et al., 2011b; Follum et al., 2016) se han aplicado en la escala de la red fluvial, pero estos modelos solo simulan la hidrodinámica del agua superficial. Una forma en que estos modelos compensan la exclusión de algunos de los procesos físicos relacionados en la hidrodinámica de la inundación es a través de la calibración de la rugosidad de la superficie en la forma del parámetro n de Manning (Mukolwe et al., 2014; Pappenberger et al., 2005).

Diversos estudios defienden que las inundaciones deben simularse utilizando un enfoque de modelado SW (agua superficial) - GW (agua subterránea) integrado que se basa en la solución de la ecuación de balance de masa en cada paso de tiempo y puede proporcionar una representación más física de la hidrodinámica del río - llanura aluvial, y la incorporación simultánea de procesos físicos como precipitación, almacenamiento en zonas vadosas, enrutamiento hidráulico y flujo de GW. Con el creciente acceso a conjuntos de datos de código abierto y capacidades computacionales, más estudios se están enfocando en el uso de procedimientos integrados de modelado SW - GW para simular la hidrología e hidrodinámica de los ríos (Gleeson y Manning, 2008; Kaser et al., 2014; Kollet y Maxwell, 2008; Liu et al., 2015; Saksena y Merwade, 2017a).

El presente proyecto busca determinar las zonas susceptibles a inundaciones en el área de estudio la confluencia entre el río Chicamocha y río Surba para prevenir y alertar de peligros potenciales a la comunidad, para esto se diseñó una metodología que permite dar desarrollo óptimo e íntegro al proyecto, dicha metodología se dividió en 5 etapas complementarias.

En primera instancia (primera fase o capítulo) se describe la zona de estudio y la importancia de la misma, también se describe lacónicamente el problema con respecto a la no presencia de estudios de determinación de zonas susceptibles a inundación en el área de interés, luego de esto (en la segunda fase o capítulo) se describe en detalle el diseño de una interfaz gráfica por medio del lenguaje de programación de python y el análisis de los resultados arrojados que permiten obtener los datos de caudales máximos para los diferentes periodos de retorno, sin embargo la descripción de las distribuciones de probabilidad usadas dentro de la interfaz para el procesamiento de datos se describe en el numeral 7.1.7 del marco teórico de los anexos del presente documento, por consiguiente (en la tercer fase o capítulo del documento) se describe detalladamente el paso a paso para la elaboración del modelo hidrodinámico bidimensional y sus respectivos ajustes, no obstante las ecuaciones que emplea el modelo son desarrolladas y descritas en el numeral 7.1.6 del marco teórico de los anexos del presente documento,

finalmente y recopilando los datos y las herramientas elaboradas en las diferentes partes o etapas del presente documento se determina en la simulación las zonas susceptibles a inundación y se presenta una descripción de los resultados de calado y velocidad arrojados para cada periodo de retorno, luego de esto se analiza los resultados obtenidos para cada simulación y se presentan los perfiles topográficos de las zonas críticas.

Seguido de los pasos para la elaboración de la interfaz, el modelo, la simulación y en respectivo análisis, se presentan las respectivas conclusiones y unas posibles recomendaciones que se deberán tener en cuenta al momento de utilizar la información contenida en el presente documento.

En este proyecto se presenta entonces, el procedimiento y los resultados del proceso en el cálculo de los caudales de creciente en la confluencia entre el Río Chicamocha y el Río Surba, donde se extrapola la información base de estaciones operadas por el IDEAM para ser tratadas de acuerdo a procedimientos definidos, aunado a esto, la determinación de los caudales máximos según diversos periodos de retorno por medio de la interfaz gráfica diseñada, obteniendo los resultados necesarios para llevar a cabo la modelación hidrológica en la zona de estudio y de esta forma determinar los valores de caudales de crecientes para así llevar a cabo el análisis hidrodinámico correspondiente.

Área de estudio

Paipa

El municipio de Paipa es una ciudad de estirpe indígena e hispánica que se encuentra ubicada en el departamento de Boyacá, administrativamente forma parte de la provincia del Tundama y del Corredor Industrial de Boyacá. Geográficamente, su cabecera municipal se encuentra a los 5°47' de latitud norte y 73° 06' de longitud oeste. Territorialmente Paipa limita por el norte del departamento de Santander por el oriente con Tibasosa y Duitama, por el sur con Firavitoba y por el occidente con Sotaquirá y Tuta. Agregando a lo anterior, Paipa se encuentra a 184 km de la capital de Colombia (Bogotá) y a 40 km de la capital de Boyacá (Tunja); Posee una extensión de 306 km², su altitud es de 2.525 m.s.n.m. y su temperatura promedio es de 13 °C. (Herrera, 2008).

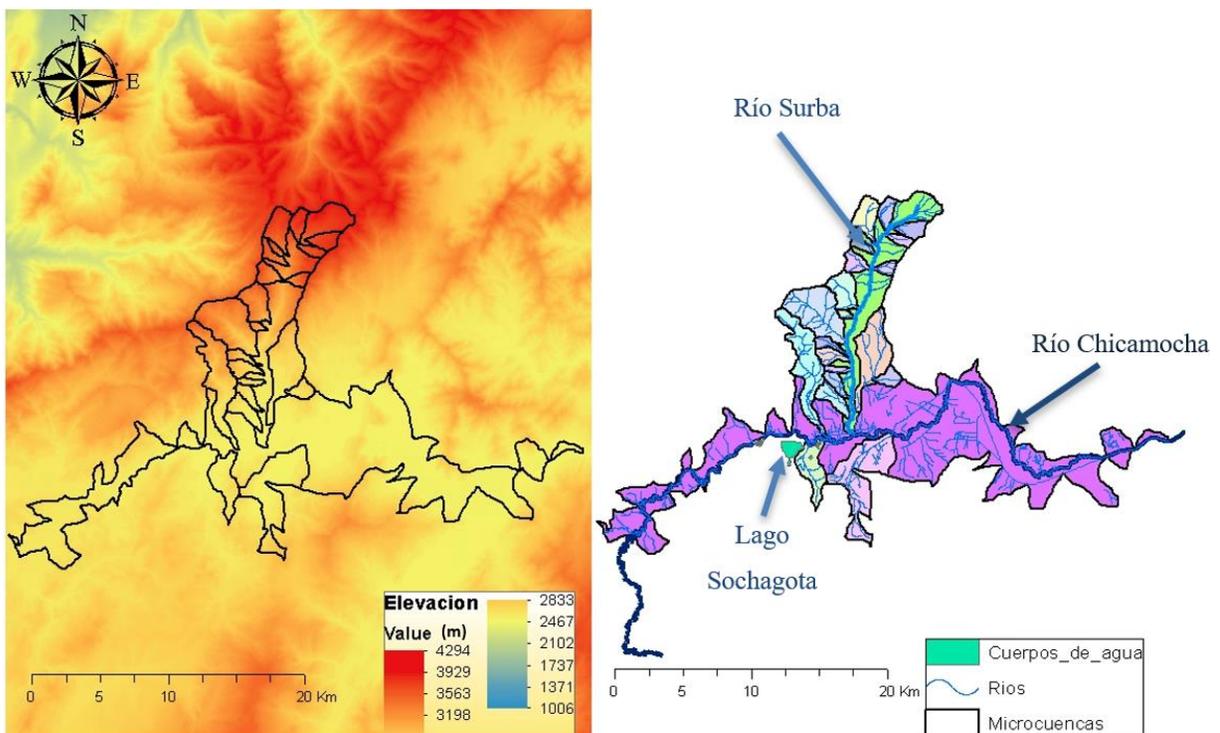


Figura 1. Localización del área de influencia del proyecto, fuente: Autores

Río Chicamocha y Río Surba.

El área de estudio que se tendrá en cuenta para el presente proyecto, está ubicada en la cuenca alta del río Chicamocha, la cual está localizada en la zona suroccidental del Departamento de Boyacá. La delimitación física del área de estudio está comprendida por el río Surba y el río Chicamocha; el río Surba se extiende desde la estación la Trinidad hasta la confluencia con el río Chicamocha. Así mismo, el río Chicamocha se extiende desde la estación la Siberia hasta la confluencia entre los dos cauces. Las siguientes figuras 2 y 3 muestran más detalladamente el área de estudio a partir de un polígono y la ubicación de las estaciones hidrológicas y meteorológicas.

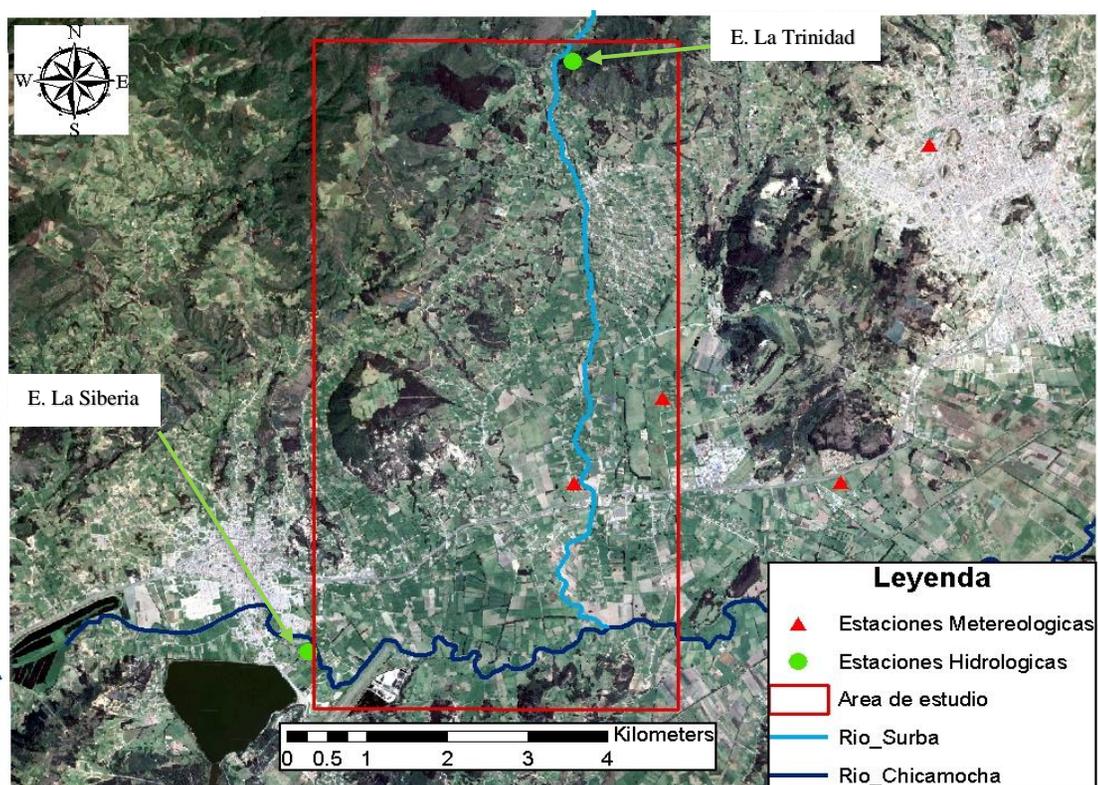


Figura 2. Delimitación área de influencia del estudio vista satelital, fuente: Autores

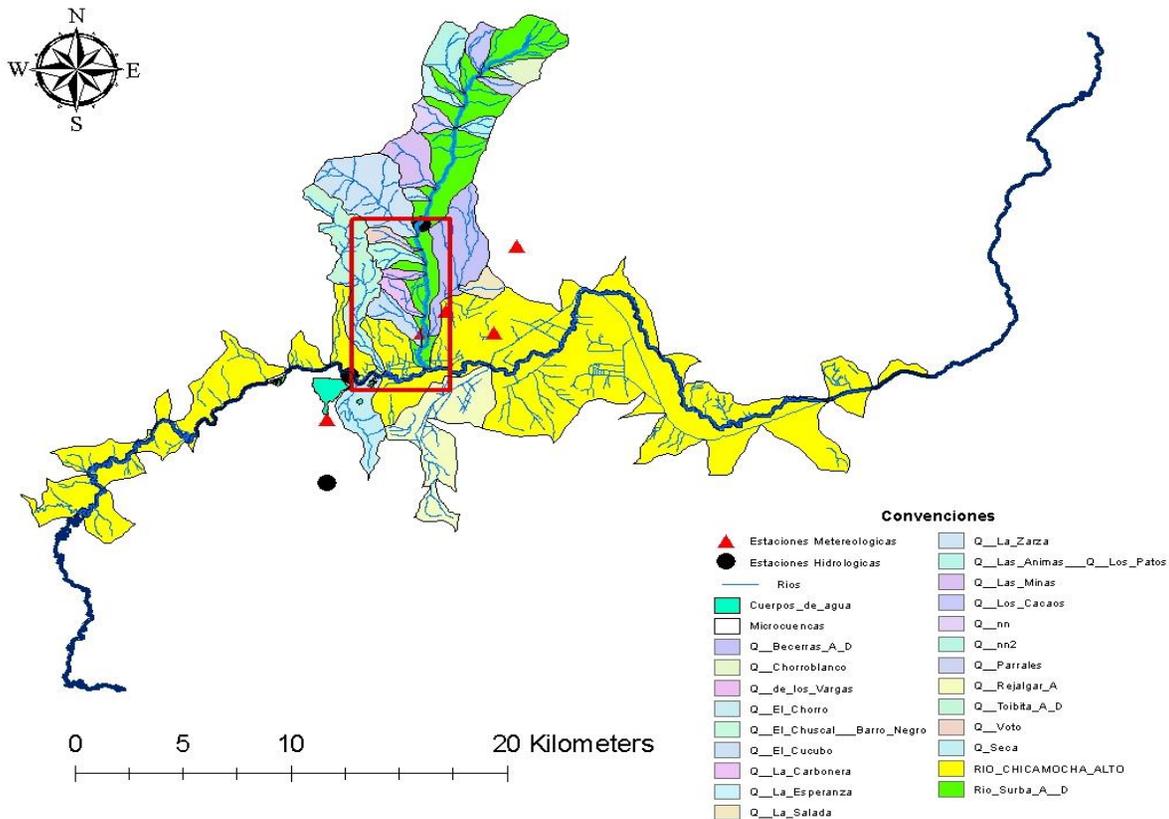


Figura 3. Delimitación área de influencia del estudio, fuente: Autores

Se realizó una búsqueda de registros históricos donde se reportarán huellas de inundación en el área de estudio, no obstante, no se encontró información relevante y se determinó que la presente zona representaba un peligro potencial debido a la ausencia de dicha información, por tanto, se buscó en otros documentos una topología detallada que permitiera servir como base en la elaboración del modelo, lo cual la información geográfica y el tipo de suelo, así como el uso del mismo, se obtuvo de imágenes satelitales obtenidas en Google Earth y SAS planet e incluso de las imágenes LIDAR incluidas en un estudio de la Corporación Autónoma Regional – CORPOBOYACA, así mismo la información cartográfica se descargó de la base de datos abiertos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC, también, se obtuvo información hidrometeorológica del banco de datos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM presentes en la plataforma de descarga de Datos Hidrometeorológicos – DHIME con un rango de periodo de tiempo de 20 años (desde el año 2000 al año 2020).

Cálculo de los Caudales para los Diferentes Eventos Extremos

Se realizó una interfaz gráfica con el objetivo de analizar los datos de caudales medios diarios descargados en las estaciones de la plataforma DHIME del IDEAM y ajustarlos a una distribución de probabilidad apropiada, dándonos como resultados caudales máximos anuales confiables en distintos periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años). A continuación, se presenta como el paso a paso para la elaboración de la interfaz, previo al cálculo de los caudales.

Elaboración de la interfaz gráfica

Para la elaboración de la interfaz gráfica se utilizó PyCharm el cual es una herramienta que permite el desarrollo del lenguaje de programación de Python, adicionalmente se empleó la librería panda de Python que proporciona estructuras de forma Dataframe que son unas estructuras de datos con dos dimensiones en el cual se puede guardar datos de distintos tipos en columnas. Para su elaboración se dividen tres fases:

Elaboración del frontend.

El frontend hace referencia a la interfaz gráfica de usuario (GUI), esta interfaz es de mucha importancia puesto que va a ser la ventana o programa donde el usuario podrá descargar y analizar los datos de caudales de la zona o estación de interés.

Para la realización del frontend se creó principalmente un boceto donde se define el diseño de la ventana. Seguido a lo anterior, en Pycharm se importó una librería llamada tkinter que proporciona un conjunto de herramientas robusto e independiente de la plataforma para administrar ventanas. (Python, S.F). con el fin de construir a partir de la codificación una interfaz que sea funcional para determinar los caudales en diferentes periodos de retorno.

```
1  
2 from tkinter import TK, Label, Button, Entry, filedialog  
3
```

Figura 4. Librería tkinter, fuente: Autores

Ahora bien, importada la librería se procedió a plantear unas coordenadas en los ejes x, y por los cuales serían la guía en ubicación espacial para la construcción de la interfaz gráfica.

```
#-----Cordenadas-----
cordenadainicial=35,30 #x,y
```

Figura 5. Coordenadas para la elaboración de la interfaz, fuente: Autores

Por consiguiente, se realizó la codificación de la imagen de ventana especificando el título, el largo por ancho, el color de la ventana y adicional un código para no permitir redimensionar la ventana.

```
#-----Imagen de ventana-----
vent = Tk()
vent.title("Ajustador de Caudales J&J")
vent.geometry("700x410")
vent.resizable(width=False, height=False)
vent.configure(bg="#C3C9D5")
```

Figura 6. Codificación para realizar la ventana, fuente: Autores

Generada la imagen de la ventana, se realizaron las etiquetas (Label) que sirven para mostrar datos dentro de la interfaz (Progra, S.F). Dentro de estas se especifica la posición espacial, el color, y el nombre el cual van a tener.

```
#-----LABELS-----
lblestacionDHIME=Label(vent,text="Estación DHIME:")
lblestacionDHIME.configure(bg="#C3C9D5")
lblestacionDHIME.place(x=cordenadainicial[0], y=cordenadainicial[1], width=85, height=20)

lblEntradadatos1 =Entry(vent)
lblEntradadatos1.place(x=cordenadainicial[0]+100, y=cordenadainicial[1], width=350, height=20)
lblEntradadatos1.config(bg="white", fg="black")

lblcarrpetasalida=Label(vent,text="Carpeta de Salida:")
lblcarrpetasalida.configure(bg="#C3C9D5")
lblcarrpetasalida.place(x=cordenadainicial[0], y=cordenadainicial[1]+40, width=92, height=20)

lblSalidadatos2 =Entry(vent)
lblSalidadatos2.place(x=cordenadainicial[0]+100, y=cordenadainicial[1]+40, width=350, height=20)
lblSalidadatos2.config(bg="white", fg="black")

lblsubirarchivo =Label(vent,text="Subir Archivo(.csv)")
lblsubirarchivo.configure(bg="#C3C9D5")
lblsubirarchivo.place(x=cordenadainicial[0]+482, y=cordenadainicial[1], width=120, height=20)

lblguardararchivo =Label(vent,text="Generar ruta")
lblguardararchivo.configure(bg="#C3C9D5")
lblguardararchivo.place(x=cordenadainicial[0]+475, y=cordenadainicial[1]+40, width=100, height=20)
```

```
lblfecha =Label(vent,text="Establezca rango de fechas:")
lblfecha.configure(bg="#C3C9D5")
lblfecha.place(x=cordenadainicial[0]-42, y=cordenadainicial[1]+80, width=230, height=20)

lblrangofecha =Label(vent,text="a")
lblrangofecha.configure(bg="#C3C9D5")
lblrangofecha.place(x=cordenadainicial[0]+215, y=cordenadainicial[1]+80, width=20, height=20)

lblperiodosderetorno =Label(vent,text="Periodos de retorno a utilizar")
lblperiodosderetorno.configure(bg="#C3C9D5")
lblperiodosderetorno.place(x=cordenadainicial[0], y=cordenadainicial[1]+120, width=155, height=20)

lbl2 =Label(vent,text="5")
lbl2.configure(bg="#C3C9D5")
lbl2.place(x=cordenadainicial[0]+190, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

lbl5 =Label(vent,text="10")
lbl5.configure(bg="#C3C9D5")
lbl5.place(x=cordenadainicial[0]+240, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

lbl10 =Label(vent,text="25")
lbl10.configure(bg="#C3C9D5")
lbl10.place(x=cordenadainicial[0]+290, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

lbl25 =Label(vent,text="50")
lbl25.configure(bg="#C3C9D5")
lbl25.place(x=cordenadainicial[0]+340, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

lbl50 =Label(vent,text="100")
lbl50.configure(bg="#C3C9D5")
lbl50.place(x=cordenadainicial[0]+390, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

lbl100 =Label(vent,text="250")
lbl100.configure(bg="#C3C9D5")
lbl100.place(x=cordenadainicial[0]+440, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

labelperiodosderetorno5 =Label(vent)
labelperiodosderetorno5.configure(bg="white", fg="black")
labelperiodosderetorno5.place(x=cordenadainicial[0]+170, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

labelperiodosderetorno10 =Label(vent)
labelperiodosderetorno10.configure(bg="white", fg="black")
labelperiodosderetorno10.place(x=cordenadainicial[0]+220, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

labelperiodosderetorno25 =Label(vent)
labelperiodosderetorno25.configure(bg="white", fg="black")
labelperiodosderetorno25.place(x=cordenadainicial[0]+270, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)
```

```

labelperiodosderetorno50 =Label(vent)
labelperiodosderetorno50.configure(bg="white", fg="black")
labelperiodosderetorno50.place(x=cordenadainicial[0]+320, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

labelperiodosderetorno100 =Label(vent)
labelperiodosderetorno100.configure(bg="white", fg="black")
labelperiodosderetorno100.place(x=cordenadainicial[0]+370, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

labelperiodosderetorno250 =Label(vent)
labelperiodosderetorno250.configure(bg="white", fg="black")
labelperiodosderetorno250.place(x=cordenadainicial[0]+420, y=cordenadainicial[1]+120, width=20, height=20)

lbltextodistribucion =Label(vent,text="Observaciones: ")
lbltextodistribucion.configure(bg="#C3C9D5")
lbltextodistribucion.place(x=cordenadainicial[0]+1, y=cordenadainicial[1]+160, width=86, height=20)

lblcuadroipodistribucion =Label(vent)
lblcuadroipodistribucion.place(x=cordenadainicial[0], y=cordenadainicial[1]+180, width=640, height=60)
lblcuadroipodistribucion.config(bg="white", fg="red")

lbltiqueta1 =Label(vent,text="J.Antonio & J.Camacho (2022)")
lbltiqueta1.configure(bg="#C3C9D5")
lbltiqueta1.place(x=cordenadainicial[0]-32, y=cordenadainicial[1]+360, width=180, height=20)

lbltiqueta2 =Label(vent,text="Version 1.0")
lbltiqueta2.configure(bg="#C3C9D5")
lbltiqueta2.place(x=cordenadainicial[0]+530, y=cordenadainicial[1]+360, width=180, height=20)

```

Figura 7. Codificación de las etiquetas (Label), fuente: Autores

Seguidamente, se realizaron los botones (Button) que sirven para hacer que algo ocurra en el programa (Progra, S.F). De la misma manera especificando la posición espacial, el color, y el nombre el cual van a tener.

```

#-----BUTTON-----

btntentrada =Button(vent,text="...")
btntentrada.place(x=cordenadainicial[0]+465, y=cordenadainicial[1], width=20, height=20)

btntsalida =Button(vent,text="...")
btntsalida.place(x=cordenadainicial[0]+465, y=cordenadainicial[1]+40, width=20, height=20)

btngenerarmaximoanual =Button(vent,text="Generar maximo anual",bg="#898D95")
btngenerarmaximoanual.place(x=cordenadainicial[0], y=cordenadainicial[1]+270, width=130, height=50)

btngenerarestadisticos =Button(vent,text="Generar estadisticas",bg="#898D95")
btngenerarestadisticos.place(x=cordenadainicial[0]+160, y=cordenadainicial[1]+270, width=130, height=50)

btngenerargraficos =Button(vent,text="Generar graficos",bg="#898D95")
btngenerargraficos.place(x=cordenadainicial[0]+320, y=cordenadainicial[1]+270, width=130, height=50)

btntcaudalexremo =Button(vent,text="Calcular caudales extremos",bg="#898D95")
btntcaudalexremo.place(x=cordenadainicial[0]+480, y=cordenadainicial[1]+270, width=160, height=50)

```

Figura 8. Codificación de los botones (Button), fuente: Autores

Continuamente, se realizaron los campos de entrada (Entry) que sirve para ingresar datos al programa (Progra, S.F). De la misma forma especificando el nombre, el color y la ubicación espacial.

```
#-----ENTRYS-----
Entryfecha1 =Entry(vent)
Entryfecha1.place(x=cordenadainicial[0]+155, y=cordenadainicial[1]+80, width=50, height=20)
Entryfecha1.config(bg="white", fg="black")

Entryfecha2 =Entry(vent)
Entryfecha2.place(x=cordenadainicial[0]+240, y=cordenadainicial[1]+80, width=50, height=20)
Entryfecha2.config(bg="white", fg="black")
```

Figura 9. Codificación de campos de entrada (Entrys), fuente: Autores

Por último, se realiza el código mainloop () que da la terminación a la codificación de la interfaz gráfica.

```
vent.mainloop()
```

Figura 10. Código de cierre para la interfaz gráfica, fuente: Autores

Al realizar todo lo anterior, se corre la interfaz en el programa dando como resultado lo siguiente, lo cual se asimila al boceto idealizado:

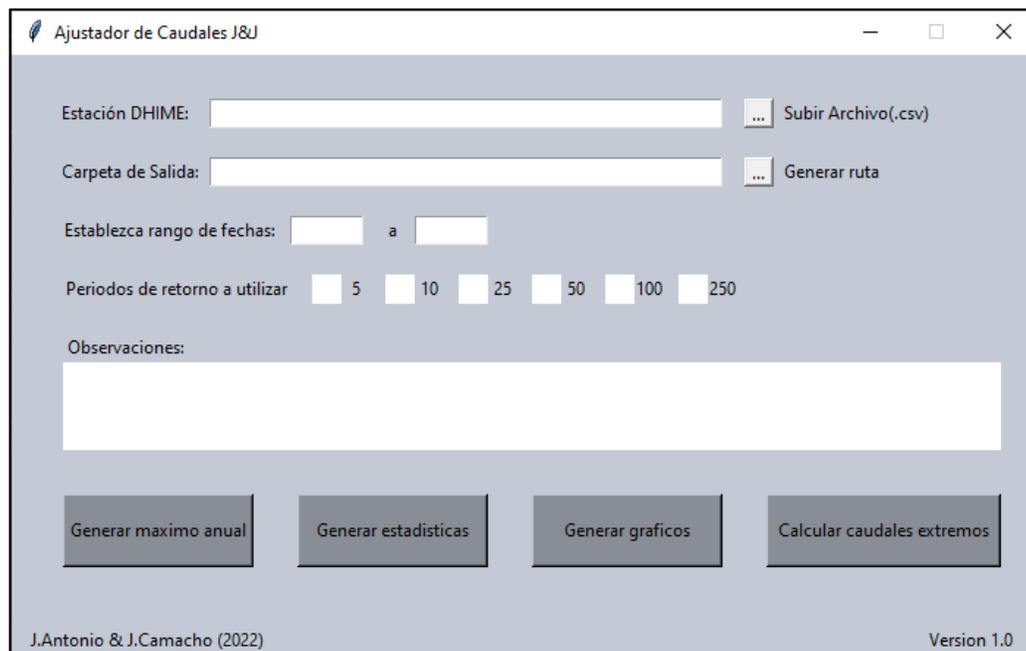


Figura 11. Pestaña interfaz gráfica, fuente: Autores

Adicional a lo anterior, se creó un código que va a ser parte de la funcionalidad de la interfaz gráfica. Entre ella se tiene:

- **Función Abrir**

La función abrir que a partir de una serie de comandos crea la ruta de entrada de datos de caudal en tipo csv, que añadiéndola como comando a un botón determinado abre la carpeta del usuario.

```
#-----Comandos-----  
def abrir1():  
    lblEntradadatos1.delete(0,tkinter.END)  
  
    archivo = filedialog.askopenfilename(filetypes=(("csv files","*.csv"),("todos los archivos","*.*")))  
    lblEntradadatos1.insert(tkinter.END,archivo)
```

Figura 12. Código de ruta de entrada de datos, fuente: Autores

- **Función guardar**

La función guardar que por medio de codificación que, añadiéndola como comando a un botón determinado, genera una ruta de salida en donde se guardan los archivos de tipo xlsx.

```
def guardar1():  
    filename = filedialog.askdirectory()  
    lblSalidadatos2.delete(0,tkinter.END)  
  
    lblSalidadatos2.insert(tkinter.END,filename)
```

Figura 13. Código de ruta de salida de datos, fuente: Autores

Elaboración del backend.

El backend es la codificación interna donde se realiza todo lo involucrado con el funcionamiento de la interfaz. Para la realización del backend se propuso una metodología a seguir, donde cada codificación va a tener una funcionalidad en la interfaz.

- **Obtención de datos crudos**

Principalmente se debe descargar en la plataforma del DHIME los datos de caudal medio diario de departamento y ciudad que se desea analizar, el cual contenga un rango de fechas de preferiblemente de 20 años para poder ingresarlos dentro de la interfaz gráfica.

Para dar comienzo a la programación, se importa una serie de librerías de Python las cuales van a ser parte fundamental para que se ejecuten los códigos posteriormente realizados.

```
import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as sp
from scipy import stats
import matplotlib
```

Figura 14. Librerías de Python a utilizar, fuente: Autores

Cargadas las librerías, se realizó una codificación temporal en donde se especifica la ruta de entrada tipo csv y la ruta de guardado tipo xlsx.

```
#_Generar variable con url donde esta ubicada el archivo de excel
ruta=r"C:\Users\jonat\Downloads\tesis\siberia.csv"
ruta_guardado=r"C:\Users\jonat\Downloads\tesis"
```

Figura 15. Código de ruta y salida de datos, fuente: Autores

Posteriormente, se realizó un programable que cargue los datos provenientes de la plataforma DHIME y la interfaz los procese e importe dentro de la librería de pandas para realizar el tratamiento posterior.

```
estacion=pd.read_csv(ruta,header=0,index_col='Fecha',parse_dates=True)
```

Figura 16. Código para procesar e importar datos dentro de la librería Pandas, fuente: Autores

Aunado a lo anterior, se crean unos códigos en donde se definen las fechas iniciales y finales que se van a tomar para la realización del backend y se crea un codificable que va a tomar de los datos cargados de ruta de entrada las variables de valor y fecha.

```
fecha_inicial='2001'
fecha_final='2020'
estacion=estacion[['Valor']].loc[fecha_inicial:fecha_final]
```

Figura 17. Variables de entrada y salida de fechas, fuente: Autores

- **Organización de datos**

Para la organización de los datos se implementó la codificación de funciones en Python. Las funciones son bloques de código que se pueden reutilizar simplemente llamando a la función,

se crean usando la palabra clave def, seguido del nombre de la función y los parámetros entre paréntesis (Freecodecamp, 2021).

De lo anterior, se realizó una función con parámetros de entrada en el que se filtraron los datos de caudales mensuales mínimos, medios y máximos.

```
def filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico):
    """
    :param ruta:
    :param fecha_inicial:
    :param fecha_final:
    :param estadistico: Hace referencia al tipo de filtro: Max, Min, Mean
    :return:
    """
    DatosCrudos = pd.read_csv(ruta, header=0, index_col='Fecha', parse_dates=True)
    DatosCaudal = DatosCrudos[['Valor']].loc[fecha_inicial:fecha_final]
    meses = ['Jan', 'Feb', 'Mar', 'Apr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Oct', 'Nov', 'Dec']
    if estadistico == 'Max':
        df = DatosCaudal.groupby(lambda m:m.month).max()
    elif estadistico == 'Min':
        df = DatosCaudal.groupby(lambda m:m.month).min()
    elif estadistico == 'Mean':
        df = DatosCaudal.groupby(lambda m:m.month).mean()
    df.index = meses
    ResultadosMensuales = df
    return ResultadosMensuales
```

Figura 18. Código de los datos filtrados de caudales mensuales mínimos, medios y máximos, fuente: Autores

```
#Se filtra a nivel mensual los datos
CaudalMaxMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico = 'Max')
CaudalMinMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico = 'Min')
CaudalMedMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico = 'Mean')
```

Figura 19. Código de parámetros de entrada para la función filtrar mensuales, fuente: Autores

De la misma forma, se realizó una función para determinar y filtrar los datos de caudales máximos anuales.

```
def filtrar_maximos_anuales(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado):
    DatosCrudos = pd.read_csv(ruta, header=0, index_col='Fecha', parse_dates=True)
    DatosCaudal = DatosCrudos[['Valor']].loc[fecha_inicial:fecha_final]
    ResultadosAnuales = DatosCaudal.resample('Y').max()
    ResultadosAnuales.index = ResultadosAnuales.index.year
    ResultadosAnuales.to_excel(ruta_guardado+'Maximum annual flow.xlsx')
    return ResultadosAnuales
```

Figura 20. Código en función de los datos filtrados de caudales máximos anuales, fuente: Autores

```
CaudalMaxAnual = filtrar_maximos_anuales(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado)
```

Figura 21. Código de parámetros de entrada para la función filtrar máximos anuales, fuente: Autores

- **Calcular Outliers**

Los outliers se definen como una observación anormal y extrema en una muestra estadística o serie temporal de datos que pueden afectar potencialmente a la estimación de parámetros del mismo. Para determinar los outliers se tuvo en cuenta la metodología de U.S Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (2007) la cual describe el cálculo de los outliers por fórmula teniendo en cuenta el tamaño de muestra, descarga máxima anual y desviación estándar de una serie de datos (p.19). De lo anterior, se creó una función que codificara la metodología ya mencionada, con el fin de observar y descartar los datos anormales que se pueden presentar en los datos máximos anuales de las estaciones a analizar, permitiendo así, tener unos datos confiables.

```
def FiltrarOutliers(MaximosAnuales):
    def FuncionOutliers(N):
        Ko = 1.5522 * pow(N, 0.1444)
        return Ko

    df = MaximosAnuales
    LogCauMax = np.log(MaximosAnuales[MaximosAnuales.columns[0]])
    df['LogMax'] = LogCauMax
    promedioLog = np.mean(LogCauMax)
    desv=np.std(LogCauMax)
    Ko = FuncionOutliers(MaximosAnuales.shape[0])

    xh=promedioLog+(Ko*desv)
    xl=promedioLog-(Ko*desv)

    df['xh']=xh
    df['xl']=xl

    df = df.loc[(df['LogMax'] > xl) & (df['LogMax'] < xh)][['Valor']]
    df = pd.DataFrame(df)
    QMaxAcep, QMinAcep = round(np.exp(xl), 2), round(np.exp(xh), 2)
    return df,QMaxAcep,QMinAcep
```

Figura 22. Código para determinar los outliers de los caudales máximos anuales, fuente: Autores

```
CaudalMaxAnual = filtrar_maximos_anuales(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado)
CaudalMaxAnualFiltrado = FiltrarOutliers(CaudalMaxAnual)[0]
```

Figura 23. Parámetros de entrada para la determinación de los outliers, fuente: Autores

- **Generación de gráficos**

Ya realizada la metodología para la organización de los datos y de calcular los outliers. Se procedió a realizar mediante la librería Matplotlib (librería que permite realizar gráficos en Python) la codificación dentro de las diferentes funciones con el fin de obtener gráficos como caudales mínimos, medios y máximos mensuales, caudales máximos diarios, caudales máximos

anuales, outliers y como ultimo el respectivo histograma para los caudales mínimos, medios y máximos mensuales:

✓ Caudales mínimos, medios y máximos, mensuales

```
def graficar_mensuales(CaudalMinMensual, CaudalMedMensual, CaudalMaxMensual, ruta_guardado):
    meses = ['Jan', 'Feb', 'Mar', 'Apr', 'May', 'Jun', 'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Oct', 'Nov', 'Dec']

    X = list(CaudalMinMensual[CaudalMinMensual.columns[0]])
    Y = list(CaudalMedMensual[CaudalMedMensual.columns[0]])
    Z = list(CaudalMaxMensual[CaudalMaxMensual.columns[0]])
    N = 12
    ind = np.arange(N)
    width = 0.25

    plt.figure(figsize=(15, 6))
    bar1 = plt.bar(ind, X, width, color='#02B1FF', ecolor='black', capsize=7, zorder=2)
    bar2 = plt.bar(ind + width, Y, width, color='#0369FF', ecolor='black', capsize=7, zorder=2)
    bar3 = plt.bar(ind + width * 2, Z, width, color='#03348C', ecolor='black', capsize=7, zorder=2)

    plt.ylabel('Flow [m3/s]', fontsize=14, fontweight='bold', **{'fontname': 'calibri'})
    plt.minorticks_on()
    plt.grid(which='major', linestyle='-', linewidth='0.5', zorder=1)
    plt.grid(which='minor', linestyle=':', linewidth='0.5', zorder=1)
    plt.xticks(ind + width, meses, size='large', rotation=45, **{'fontname': 'calibri'})
    plt.legend((bar1, bar2, bar3), ('Min Flow', 'Mean Flow', 'Max Flow'))
    plt.savefig(ruta_guardado + '\Monthly flows.png')
```

Figura 24. Código para generar el grafico de caudales mensuales mínimos, medios y máximos, fuente: Autores

✓ Caudales máximos diarios

```
def graficar_diarios(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado):
    DatosCrudos = pd.read_csv(ruta, header=0, index_col='Fecha', parse_dates=True)
    DatosCaudal = DatosCrudos[['Valor']].loc[fecha_inicial:fecha_final]

    plt.figure(figsize=[15, 5])
    plt.plot(DatosCaudal.index, DatosCaudal['Valor'], color='black')
    plt.xlim(DatosCaudal.index[0], DatosCaudal.index[len(DatosCaudal.index) - 1])
    plt.ylim(0)
    plt.xticks(rotation=45, size='medium')
    plt.ylabel('Flow [m3/s]', fontsize=10, **{'fontname': 'italic', 'fontweight': 'bold'})
    plt.minorticks_on()
    plt.grid(which='major', linestyle='-', linewidth='0.5')
    plt.grid(which='minor', linestyle=':', linewidth='0.5')
    plt.legend()
    plt.savefig(ruta_guardado + '\Daily flow.png')
```

Figura 25. Código para generar el grafico de caudales máximos diarios, fuente: Autores

✓ Caudales máximos anuales

```
def graficar_precipitaciones(CaudalMaxAnual,ruta_guardado):
    plt.figure(figsize=(15, 6))
    x = np.array(CaudalMaxAnual.index)
    plt.bar(x, CaudalMaxAnual[CaudalMaxAnual.columns[0]], color='#120E8B', zorder=2)

    plt.ylabel('Maximum annual flow [m3/s]', fontsize=14, fontweight='bold', **{'fontname': 'calibri'})
    plt.xlim(x[0] - 1, x[len(x) - 1] + 1)
    plt.yticks(size='large', color='k', rotation=0, **{'fontname': 'calibri'})
    plt.xticks(x, size='large', rotation=90, **{'fontname': 'calibri'})

    plt.minorticks_on()
    plt.grid(which='major', linestyle='-', linewidth='0.5', axis='y', zorder=0)
    plt.savefig(ruta_guardado + '\Annual flow.png')
```

Figura 26. Código para generar el grafico de caudales máximos anuales, fuente: Autores

✓ Outliers

```
def graficar_outliers(CaudalMaxAnual,ruta_guardado):
    x = CaudalMaxAnual.index
    xl = FiltrarOutliers(CaudalMaxAnual)[2]
    xh = FiltrarOutliers(CaudalMaxAnual)[1]

    plt.figure(figsize=[15, 6])
    plt.scatter(CaudalMaxAnual.index, CaudalMaxAnual[CaudalMaxAnual.columns[0]], c='black', s=20, zorder=2)
    plt.plot(CaudalMaxAnual.index, [xl for i in range(0, CaudalMaxAnual.shape[0])])
    plt.plot(CaudalMaxAnual.index, [xh for i in range(0, CaudalMaxAnual.shape[0])])

    plt.ylabel('Maximum annual flow [m3/s]', fontsize=14, fontweight='bold', **{'fontname': 'calibri'})
    plt.xlim(x[0], x[len(x) - 1])
    plt.yticks(size='large', color='k', rotation=0, **{'fontname': 'calibri'})
    plt.xticks(x, size='large', rotation=90, **{'fontname': 'calibri'})
    plt.minorticks_on()
    plt.grid(which='major', linestyle='-', linewidth='0.5', zorder=1)
    plt.grid(which='minor', linestyle=':', linewidth='0.5', zorder=1)
    plt.savefig(ruta_guardado + '\Annual flow with outliers.png')
```

Figura 27. Código para generar el grafico de caudales máximos anuales con outliers, fuente: Autores

✓ Histograma de caudales mínimos, medio y máximos

```
def histograma(serie,ruta_guardado,tipo):
    if tipo == 'Mean':
        label = ['Mean flow']
    elif tipo == 'Min':
        label = ['Min flow']
    elif tipo == 'Max':
        label = ['Max flow']
    fig, ax = plt.subplots(figsize=(15,6))
    serie.plot.kde(ax=ax,legend = True)
    serie.plot.hist(density=True, ax=ax, color='#0504aa',alpha=0.7, rwidth=0.85,zorder = 2)
    ax.set_ylabel('Probability')
    ax.grid(axis='y')
    ax.legend(labels=label)
    plt.savefig(ruta_guardado + '\Monthly' + tipo + ' histogram.png')
```

Figura 28. Código para generar los histogramas de mínimos, medios y máximos, fuente: Autores

- **Ajustar Caudales**

Ahora bien, tomando datos de caudales máximos anuales filtrados y depurados, se aplicaron 5 pruebas estadísticas de distribución más empleadas en los modelos hidrodinámicos (Normal, Log,-normal, Gumbel, Pearson III, Log-Pearson III), para posteriormente aplicar la prueba de ajuste de bondad kolmogorov- smirnov la cual compara la función de distribución acumulada observada de una variable con una distribución teórica determinada (IBM, 2022) y dar como resultado que la interfaz exporte en formato xlsx los caudales para los diferentes periodos de retorno ajustados a una distribución estadística.

```
def analisis_de_frecuencia(MaxAnual):...
def prueba_de_ajuste_bondad(MaxAnual, AnalisisFreq, significancia=0.05):...
def graficar_distribuciones(AnalisisFreq, ruta_guardado):...
def maximos_periodos_de_retorno(AnalisisFreq, distr_ajustada, periodos_de_retorno):...
```

Figura 29. Funciones para determinar el ajuste estadístico de los datos de caudales máximos, fuente: Autores

```
def analisis_de_frecuencia(MaxAnual):
    df_3 = pd.DataFrame()
    df_3['N'] = [i for i in range(1, MaxAnual.shape[0] + 1)]
    df_3['P (X>=Xt)'] = [list(df_3['N'])[i] / (df_3.shape[0] + 1) for i in range(0, df_3.shape[0])]
    df_3['T'] = [round(1 / list(df_3['P (X>=Xt)'])[i], 2) for i in range(0, df_3.shape[0])]
    df_3['V0 P24'] = sorted(list(MaxAnual[MaxAnual.columns[0]]), reverse=True)
    df_3['V0 Log(P24)'] = [np.log(list(df_3['V0 P24'])[i]) for i in range(0, df_3.shape[0])]
    df_3['Dist Normal [Kt]'] = [stats.norm.ppf(1 - list(df_3['P (X>=Xt)'])[i]) for i in range(0, df_3.shape[0])]
    med_Log, desvest_Log, coef_asi_Log = ...
    med, desvest, coef_asi = ...
    df_3['Dist Normal [Esperado]'] = [...]
    df_3['Dist LogNormal [Kt]'] = [stats.norm.ppf(1 - list(df_3['P (X>=Xt)'])[i]) for i in range(0, df_3.shape[0])]
    df_3['Dist LogNormal [Esperado]'] = [...]
    df_3['Dist EV1 Gumbel Kt'] = [...]
    df_3['Dist EV1 Gumbel [Esperado]'] = [...]

    if coef_asi >= 0:...
    else:...

    df_3['Dist Pearson III [Esperado]'] = [...]

    if coef_asi_Log >= 0:...
    else:...

    df_3['Dist LogPearson III [Esperado]'] = [...]

    return df_3
```

Figura 30. Código para la determinación del análisis de frecuencia, fuente: Autores

```

def prueba_de_ajuste_bondad(MaxAnual, AnalisisFreq, significancia=0.05):
    df_4 = pd.DataFrame()
    df_4['N'] = [i for i in range(1, MaxAnual.shape[0] + 1)]
    df_4['V0 P24'] = sorted(List(MaxAnual[MaxAnual.columns[0]]), reverse=True)
    df_4['V0 Log(P24)'] = [np.log(List(AnalisisFreq['V0 P24'])[i]) for i in range(0, df_4.shape[0])]
    df_4['Acumulada de Weibull (Xm)'] = [1-(List(df_4['N'])[i]/(len(List(df_4['N']))+1)) for i in range(0, df_4.shape[0])]

    med_Log, desvest_Log, coef_asi_Log = ...
    med, desvest, coef_asi = ...

    df_4['F (Xm) Distr Normal'] = [stats.norm(med,desvest).cdf(List(df_4['V0 P24'])[i]) for i in range(0, df_4.shape[0])]
    df_4['F (Xm) Distr LogNormal'] = [stats.norm(med_Log,desvest_Log).cdf(List(df_4['V0 Log(P24)'])[i]) for i in range(0, df_4.shape[0])]

    alfa=(6**0.5)*desvest/np.pi
    mu=med-(0.57721567**alfa)
    df_4['F (Xm) Distr EV1 Gumbel'] = [np.exp(-np.exp(-(List(df_4['V0 P24'])[i]-mu)/alfa)) for i in range(0, df_4.shape[0])]
    df_4['F (Xm) Distr Pearson III'] = [stats.pearson3.cdf(List(df_4['V0 P24'])[i], abs(coef_asi), loc=med, scale=desvest) for i in range(0, df_4.shape[0])]
    df_4['F (Xm) Distr LogPearson III'] = [stats.pearson3.cdf(List(df_4['V0 Log(P24)'])[i], abs(coef_asi_Log), loc=med_Log, scale=desvest_Log) for i in range(0, df_4.shape[0])]

    distribuciones = ['Normal', 'Log-Normal', 'EV1-Gumbel', 'Pearson III', 'Log-Pearson III']

    n = len(List(df_4[df_4.columns[0]]))

    if n <= 35:
        Dmax = (((-0.5*np.log(significancia/2))**0.5)/(n**0.5))-1/(6*n)
    else:
        Dmax = (((-0.5*np.log(significancia/2))**0.5)/(n**0.5))

    a=list(df_4[df_4.columns[3]])
    delta_max=[]
    for i in range(4,df_4.shape[1]):...

    min_prueba= min(delta_max)
    distr_elegida= distribuciones[delta_max.index(min_prueba)]

    #Se valida con el delta critico
    if min_prueba < Dmax:
        res= 'Los datos se ajustan a la distribución ' + str(distr_elegida)
    else:
        res= 'Los datos no se ajustan a ninguna distribución '

    return res, distr_elegida

```

Figura 31. Código para realizar la prueba de ajuste de bondad, fuente: Autores

```

def graficar_distribuciones(AnalisisFreq, ruta_guardado):
    df_graf = pd.DataFrame()
    df_graf[AnalisisFreq.columns[2]] = list(AnalisisFreq[AnalisisFreq.columns[2]])
    df_graf[AnalisisFreq.columns[3]] = list(AnalisisFreq[AnalisisFreq.columns[3]])
    i = 4
    while i < AnalisisFreq.shape[1] - 2:
        df_graf[AnalisisFreq.columns[i + 2]] = list(AnalisisFreq[AnalisisFreq.columns[i + 2]])
        i += 2

    fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(15, 6))

    labels = ['Weibull plot of gage data', 'Normal distribution', 'Log-normal distribution', 'EV1 Gumbel distribution',
             'Pearson III distribution', 'Log-pearson III distribution']

    for i in range(0, df_graf.shape[1] - 1):
        a = list(df_graf[df_graf.columns[0]])
        b = list(df_graf[df_graf.columns[i + 1]])
        if i == 0:
            ax1.scatter(a, b, color='#120E8B', marker='^', label=labels[i], zorder=3)
        else:
            ax1.plot(a, b, '-.', linewidth=1, label=labels[i], zorder=2)
            ax1.set_xlabel('Return period [Yn]', fontweight='bold', fontsize=15, rotation=0, **{'fontname': 'calibri'})
            ax1.set_ylabel('Max Annual Flow [m3]', fontweight='bold', fontsize=15, rotation=90, **{'fontname': 'calibri'})
            ax1.set_ylim(0)
            ax1.set_xscale('log')
            ax1.set_xticks([1, 2, 5, 10, 25, 50, 100])
            ax1.get_xaxis().set_major_formatter(matplotlib.ticker.ScalarFormatter())
            ax1.minorticks_on()
            ax1.grid(which='major', linestyle='-', linewidth='1', color='black', zorder=1)
            ax1.grid(which='minor', linestyle=':', linewidth='0.5', zorder=1)
            ax1.legend(facecolor='white', framealpha=1)

    plt.savefig(ruta_guardado + '\\Distribuciones de probabilidad.png')

```

Figura 32. Código para graficar las distribuciones, fuente: Autores

```

def maximos_periodos_de_retorno(AnalisisFreg,distr_ajustada,periodos_de_retorno):
    distribuciones = ['Normal', 'Log-Normal', 'EV1-Gumbel', 'Pearson III', 'Log-Pearson III']
    df_5 = pd.DataFrame()
    df_5['T'] = list(periodos_de_retorno)
    df_5['P (X>=Xt)'] = [1 - (1 / list(df_5['T']))[i]] for i in range(0, df_5.shape[0])

    med_Log, desvest_Log, coef_asi_Log = np.mean(list(AnalisisFreg['V0 Log(P24)']), np.std(
        list(AnalisisFreg['V0 Log(P24)'])), stats.skew(list(AnalisisFreg['V0 Log(P24)'])))
    med, desvest, coef_asi = np.mean(list(AnalisisFreg['V0 P24']), np.std(list(AnalisisFreg['V0 P24'])), stats.skew(
        list(AnalisisFreg['V0 P24'])))

    if distr_ajustada == distribuciones[0]:
        df_5['Dist Normal [Kt]'] = [stats.norm.ppf(list(df_5['P (X>=Xt)'])[i]) for i in range(0, df_5.shape[0])]
        df_5['Dist Normal [Esperado]'] = [med + (desvest * list(df_5['Dist Normal [Kt]'])[i]) for i in
            range(0, df_5.shape[0])]
    elif distr_ajustada == distribuciones[1]:
        df_5['Dist LogNormal [Kt]'] = [stats.norm.ppf(list(df_5['P (X>=Xt)'])[i]) for i in range(0, df_5.shape[0])]
        df_5['Dist LogNormal [Esperado]'] = [np.exp(med_Log + (desvest_Log * list(df_5['Dist LogNormal [Kt]'])[i])) for i
            in
            range(0, df_5.shape[0])]
    elif distr_ajustada == distribuciones[2]:
        df_5['Dist EV1 Gumbel Kt'] = [
            -(6 ** 0.5) / np.pi * (0.5772 + (np.log(np.log(list(df_5['T'])[i] / (list(df_5['T'])[i] - 1)))) for i in
            range(0, df_5.shape[0])]
        df_5['Dist EV1 Gumbel [Esperado]'] = [med + (desvest * list(df_5['Dist EV1 Gumbel Kt'])[i]) for i in
            range(0, df_5.shape[0])]
    elif distr_ajustada == distribuciones[3]:
        if coef_asi >= 0:
            df_5['Dist Pearson III [Kt]'] = [stats.pearson3.ppf(list(df_5['P (X>=Xt)'])[i], coef_asi) for i in
                range(0, df_5.shape[0])]
        else:
            df_5['Dist Pearson III [Kt]'] = [stats.pearson3.ppf(1-list(df_5['P (X>=Xt)'])[i], coef_asi) for i in
                range(0, df_5.shape[0])]

    elif distr_ajustada == distribuciones[4]:
        if coef_asi_Log >= 0:
            df_5['Dist LogPearson III [Kt]'] = [stats.pearson3.ppf(list(df_5['P (X>=Xt)'])[i], coef_asi_Log) for i
                in
                range(0, df_5.shape[0])]
        else:
            df_5['Dist LogPearson III [Kt]'] = [stats.pearson3.ppf(1-list(df_5['P (X>=Xt)'])[i], coef_asi_Log) for i in
                range(0, df_5.shape[0])]

        df_5['Dist LogPearson III [Esperado]'] = [
            np.exp(med_Log + (desvest_Log * list(df_5['Dist LogPearson III [Kt]'])[i]))
            for i in
            range(0, df_5.shape[0])]

    df_5= df_5[[df_5.columns[0], df_5.columns[3]]]

    return df_5

```

Figura 33. Código para la determinación de los máximos periodos de retorno, fuente: Autores

```

#Se realiza el análisis de frecuencias
AnálisisFreq=análisis_de_frecuencia(CaudalMaxAnualFiltrado)
res,distr_ajustada=prueba_de_ajuste_bondad(CaudalMaxAnualFiltrado,AnálisisFreq)
graficar_distribuciones(AnálisisFreq,ruta_guardado)
plt.show()
periodos_de_retorno = [10,25,50,100,250,500]
CauMaxTR= maximos_periodos_de_retorno(AnálisisFreq,distr_ajustada,periodos_de_retorno)
|

```

Figura 34. Parámetros para determinar el análisis de frecuencias y los caudales máximos ajustados a una distribución de probabilidad en distintos periodos de retorno, fuente: Autores

Integración del backend y frontend.

Para la integración del backend y frontend a fin de elaborar la interfaz gráfica final, se creó un nuevo proyecto en donde se anexaron las codificaciones existentes y con anterioridad mencionadas.

Así mismo, se elaboraron unas funciones con su respectivo código, con el objetivo de tomar los parámetros de la ruta de entrada, ruta de guardado, fecha inicial y final que se ingresen en la interfaz y a partir de asignación de comandos darle funcionalidad a los botones, etiquetas y cajas de texto.

```

def generargraficos():
    ruta = lblEntradadatos1.get()
    ruta_guardado = lblSalidadatos2.get()
    fecha_inicial = Entryfecha1.get()
    fecha_final = Entryfecha2.get()
    CaudalMaxMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico='Max')
    CaudalMinMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico='Min')
    CaudalMedMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico='Mean')
    CaudalMaxAnual = filtrar_maximos_anuales(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado)
    CaudalMaxAnualFiltrado = FiltrarOutliers(CaudalMaxAnual)[0]
    def graficar_mensuales(CaudalMinMensual, CaudalMedMensual, CaudalMaxMensual, ruta_guardado):...
    def graficar_dianios(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado):...
    def graficar_precipitaciones(CaudalMaxAnual, ruta_guardado):...
    def graficar_outliers(CaudalMaxAnual, ruta_guardado):...
    def histograma(serie, ruta_guardado, tipo):...
    graficar_mensuales(CaudalMinMensual, CaudalMedMensual, CaudalMaxMensual, ruta_guardado)
    graficar_dianios(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado)
    graficar_precipitaciones(CaudalMaxAnualFiltrado, ruta_guardado)
    graficar_outliers(CaudalMaxAnual, ruta_guardado)
    histograma(CaudalMaxMensual, ruta_guardado, tipo='Max', )
    histograma(CaudalMinMensual, ruta_guardado, tipo='Min')
    histograma(CaudalMedMensual, ruta_guardado, tipo='Mean')

```

Figura 35. Código para generar en ruta de salida gráficos, fuente: Autores

```

def calcularmaximos():
    ruta= lblEntradadatos1.get()

    ruta_guardado= lblSalidadatos2.get()

    fecha_inicial=Entryfecha1.get()
    fecha_final= Entryfecha2.get()

    CaudalMaxAnual = filtrar_maximos_anuales(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado)
    CaudalMaxAnualFiltrado = FiltrarOutliers(CaudalMaxAnual)[0]
    CaudalMaxAnualFiltrado.to_excel(ruta_guardado + '\CaudalesMaximosAnuales.xlsx')

```

Figura 36. Código para generar en ruta de salida caudales máximos, fuente: Autores

```

def caumaxTr():
    ruta = lblEntradadatos1.get()
    ruta_guardado = lblSalidadatos2.get()
    fecha_inicial = Entryfecha1.get()
    fecha_final = Entryfecha2.get()
    # Se calcula el caudal máximo anual con sus respectivo filtro por outliers
    CaudalMaxAnual = filtrar_maximos_anuales(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado)
    CaudalMaxAnualFiltrado = FiltrarOutliers(CaudalMaxAnual)[0]
    AnalisisFreq = analisis_de_frecuencia(CaudalMaxAnualFiltrado)
    graficar_distribuciones(AnalisisFreq, ruta_guardado)
    res, distr_ajustada = prueba_de_ajuste_bondad(CaudalMaxAnualFiltrado, AnalisisFreq)
    print(distr_ajustada)
    periodos_de_retorno = [5, 10, 25, 50, 100, 250]
    CauMaxTR = maximos_periodos_de_retorno(AnalisisFreq, distr_ajustada, periodos_de_retorno)
    CauMaxTR.to_excel(ruta_guardado + '\CauMaxTR.xlsx')
    lblcuadroipodistribucion.configure(text="La distribución que mejor se ajusto fue: " + distr_ajustada, fg="blue")
    labelperiodosderetorno5.configure(text="X", fg="blue")
    labelperiodosderetorno10.configure(text="X", fg="blue")
    labelperiodosderetorno25.configure(text="X", fg="blue")
    labelperiodosderetorno50.configure(text="X", fg="blue")
    labelperiodosderetorno100.configure(text="X", fg="blue")
    labelperiodosderetorno250.configure(text="X", fg="blue")

```

Figura 37. Código para generar en ruta de salida los caudales máximos anuales ajustados a una distribución de probabilidad en diferentes periodos de retorno, fuente: Autores

```

def generarestadisticos():
    ruta = lblEntradadatos1.get()
    ruta_guardado = lblSalidadatos2.get()
    fecha_inicial = Entryfecha1.get()
    fecha_final = Entryfecha2.get()
    CaudalMaxMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico='Max')
    CaudalMinMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico='Min')
    CaudalMedMensual = filtrar_mensual(ruta, fecha_inicial, fecha_final, estadistico='Mean')
    # Se calcula el caudal máximo anual con sus respectivo filtro por outliers
    CaudalMaxAnual = filtrar_maximos_anuales(ruta, fecha_inicial, fecha_final, ruta_guardado)
    CaudalMaxAnualFiltrado = FiltrarOutliers(CaudalMaxAnual)[0]
    # Se calculan los estadisticos
    EstMax = calcularestadisticos(CaudalMaxMensual)
    EstMin = calcularestadisticos(CaudalMinMensual)
    EstMean = calcularestadisticos(CaudalMedMensual)
    df = pd.DataFrame()
    df.index = ['Media', 'Mediana', 'Desviacion estandar', 'Valor Máximo', 'Valor Mínimo', 'Curtosis', 'Varianza',
               'Coeficiente de Variación']
    df['Máximos mensuales'] = [EstMax[i] for i in range(0, len(EstMax))]
    df['Medios mensuales'] = [EstMean[i] for i in range(0, len(EstMean))]
    df['Mínimos mensuales'] = [EstMin[i] for i in range(0, len(EstMin))]
    df.to_excel(ruta_guardado + '\Estadisticos mensuales.xlsx')

```

Figura 38. Código para generar en ruta de salida estadísticos de caudales mínimos, medios y máximos mensuales, fuente: Autores

La asignación de las funciones mencionadas a los botones por medio de comandos se realiza de la siguiente forma:

```
#-----BUTTON-----
btnentrada =Button(vent,text="...",command=abrir1)
btnentrada.place(x=cordenadainicial[0]+465, y=cordenadainicial[1], width=20, height=20)

btnsalida =Button(vent,text="...",command=guardar1)
btnsalida.place(x=cordenadainicial[0]+465, y=cordenadainicial[1]+40, width=20, height=20)

btngenerarmaximoanual =Button(vent,text="Generar maximo anual",bg="#898D95",command=calcularmaximos)
btngenerarmaximoanual.place(x=cordenadainicial[0], y=cordenadainicial[1]+270, width=130, height=50)

btngenerarestadisticos =Button(vent,text="Generar estadisticas",bg="#898D95",command=generarestadisticos)
btngenerarestadisticos.place(x=cordenadainicial[0]+160, y=cordenadainicial[1]+270, width=130, height=50)

btngenerargraficos =Button(vent,text="Generar graficos",bg="#898D95",command=generargraficos)
btngenerargraficos.place(x=cordenadainicial[0]+320, y=cordenadainicial[1]+270, width=130, height=50)

btncaudalextrmo =Button(vent,text="Calcular caudales extremos",bg="#898D95",command=caumaxTr)
btncaudalextrmo.place(x=cordenadainicial[0]+480, y=cordenadainicial[1]+270, width=160, height=50)
```

Figura 39. Asignación de funciones a los botones por comandos, fuente: Autores

Realizado todo lo anterior mencionado, se tiene como interfaz gráfica funcional la siguiente:

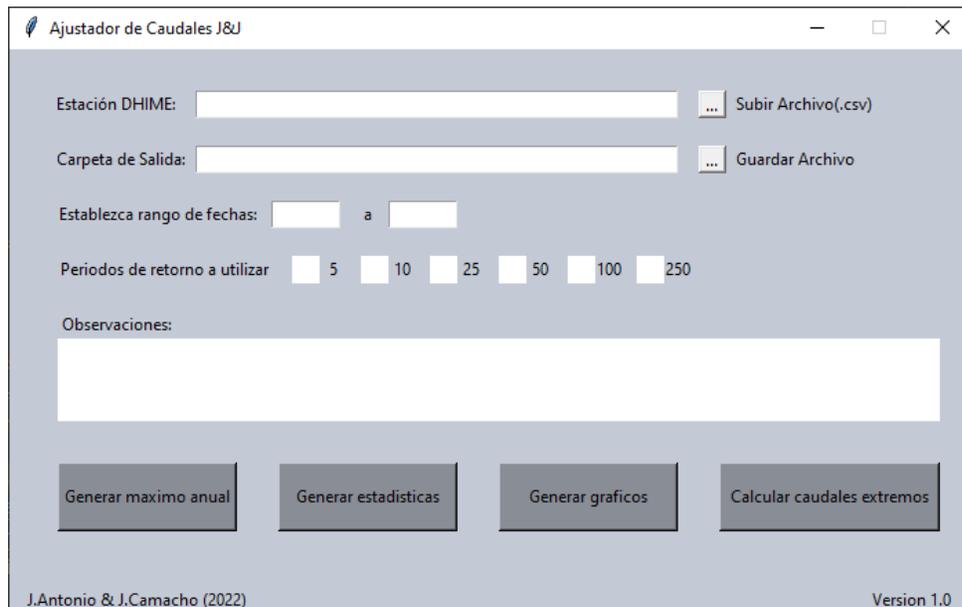


Figura 40. Interfaz gráfica final, fuente: Autores

En la cual, para obtener los respectivos resultados se deben de realizar los siguientes pasos:

- **Subir archivo**

Al darle clic en el botón de subir archivo se abrirá una carpeta con la finalidad de añadir un archivo tipo csv para posteriormente realizar el análisis pertinente.

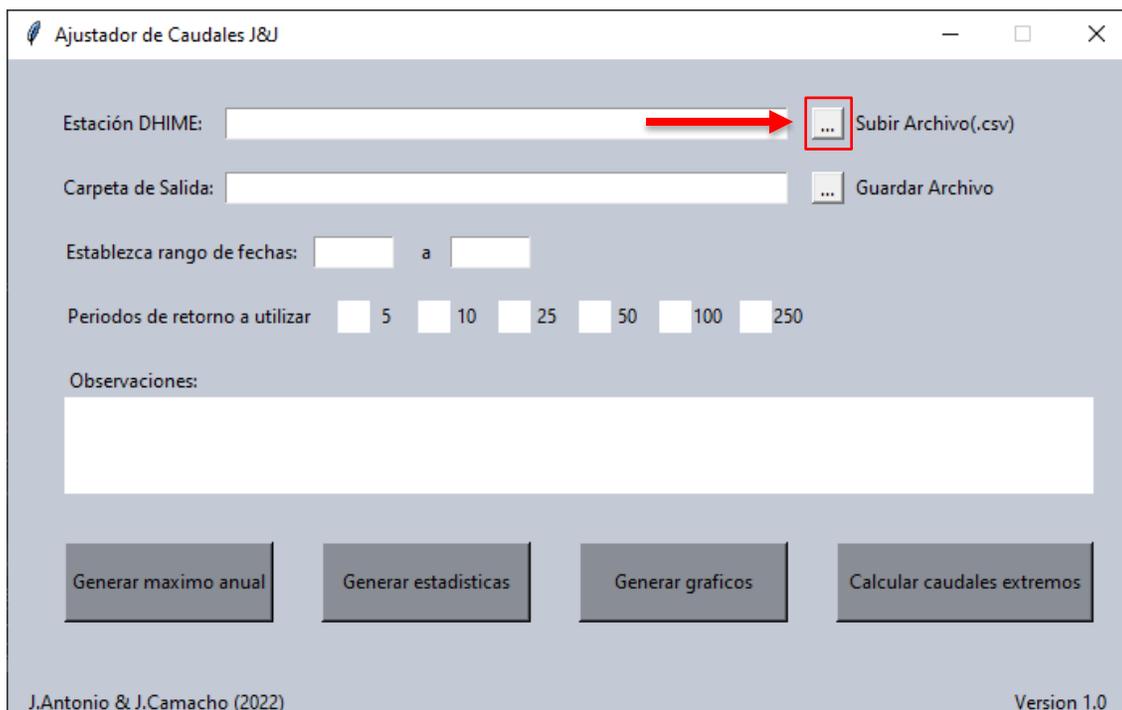


Figura 41. Extensión para importar archivos tipo csv a la interfaz, fuente: Autores

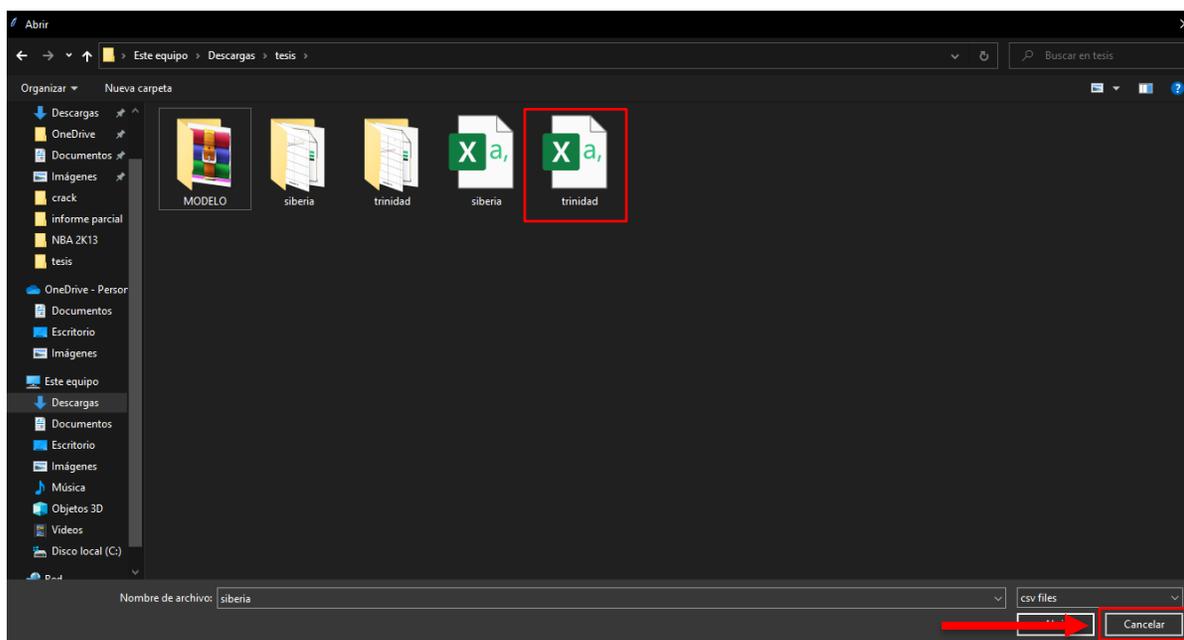


Figura 42. Selección de archivo a importar en la interfaz, fuente: Autores

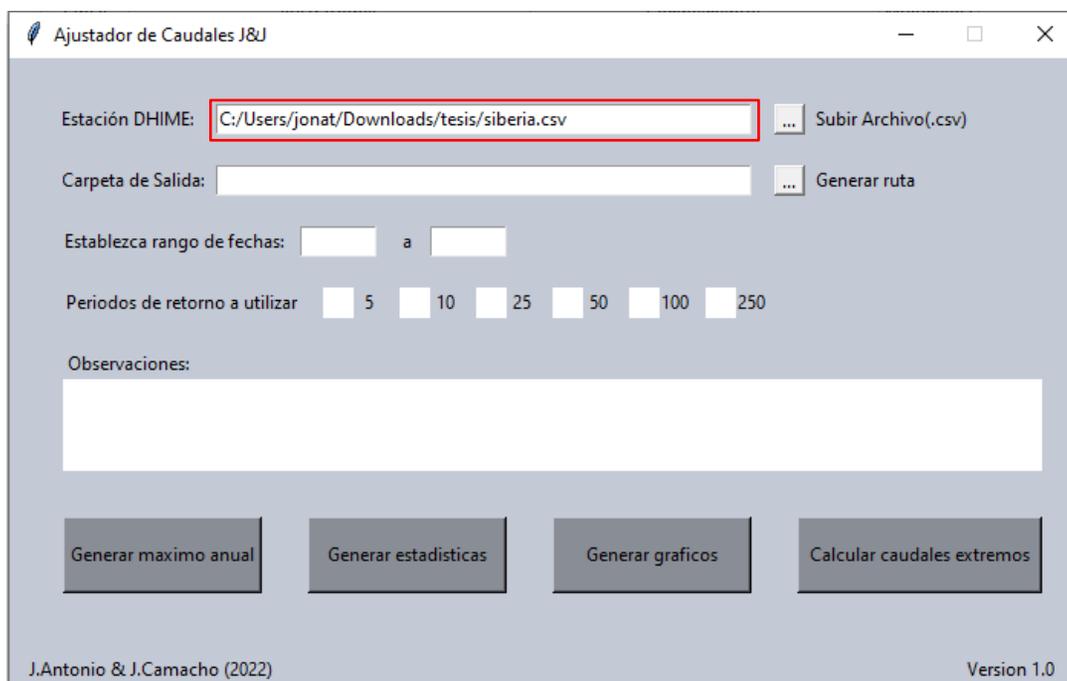


Figura 43. Verificación de la ruta del archivo importado, fuente: Autores

- **Carpeta de Salida**

Al darle clic en el botón de generar ruta se abrirá una carpeta donde se destinarán los datos de salida que se calcularán posteriormente:

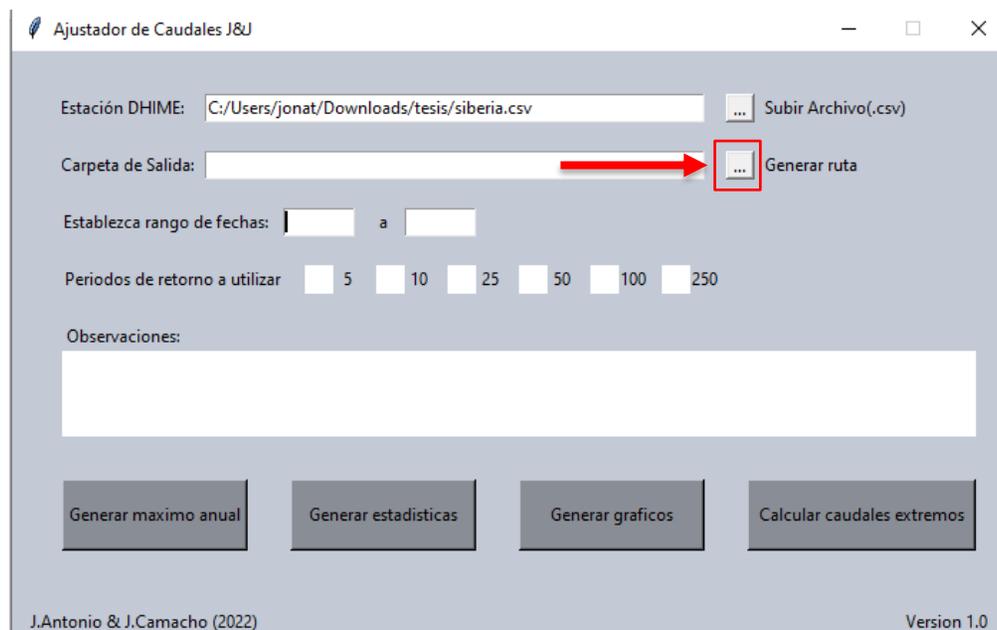


Figura 44. Extensión para definir la ruta de salida de los archivos, fuente: Autores

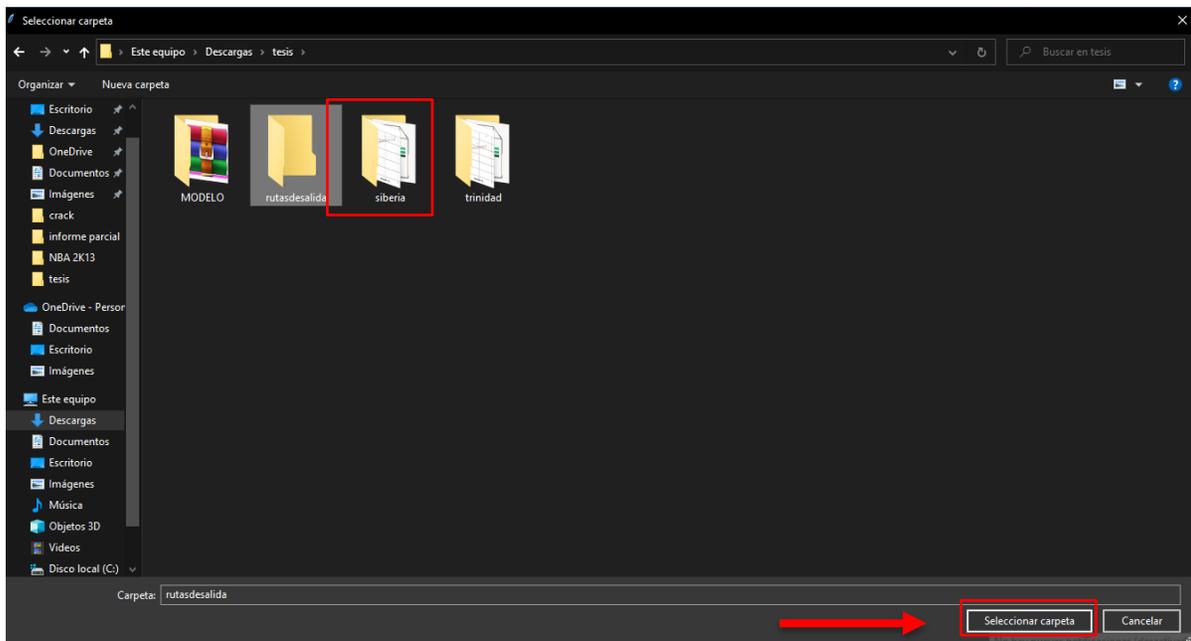


Figura 45. Selección de la ruta de salida de los archivos, fuente: Autores

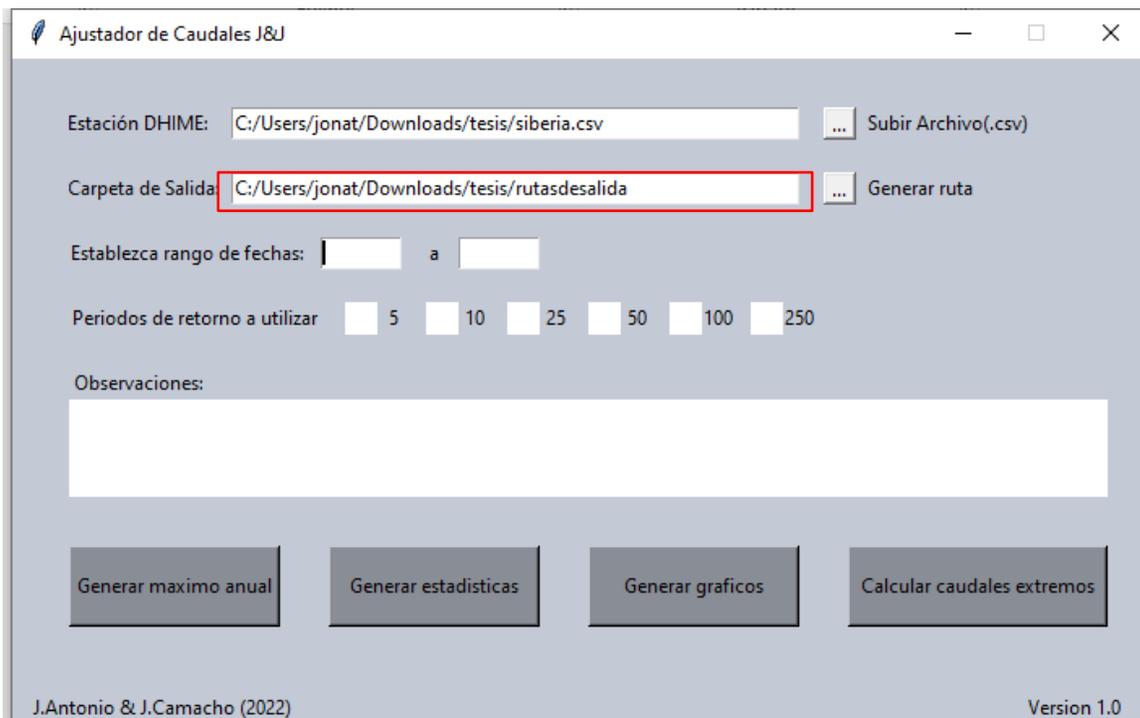


Figura 46. Verificación de la ruta de salida del archivo, fuente: Autores

- **Establecer Rango de fechas**

En los campos establecidos se ingresa el periodo de tiempo inicial y final en el que se quiere analizar la información posteriormente a calcular:

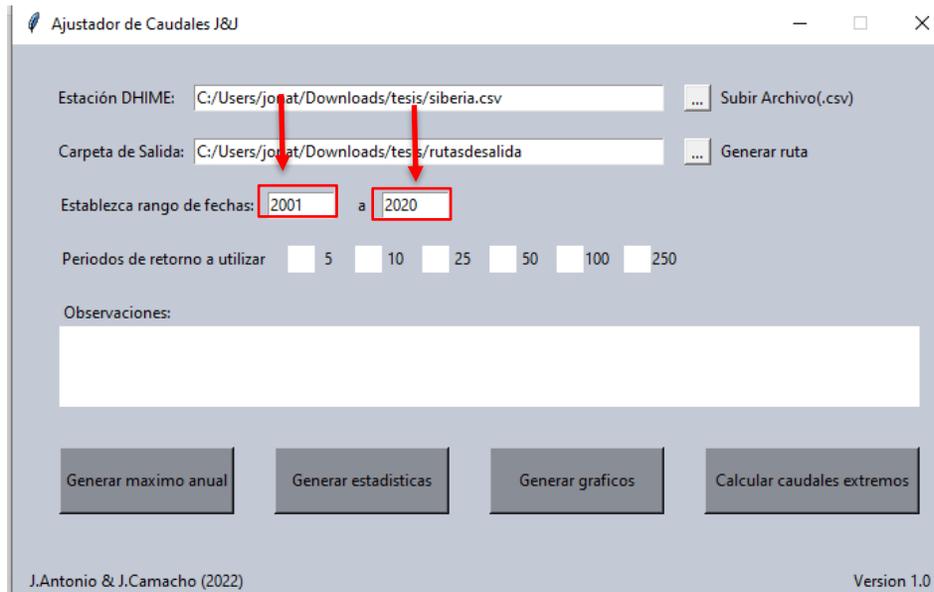


Figura 47. Ingreso de los periodos de tiempo inicial y final, fuente: Autores

- **Generar máximo anual**

Establecida la ruta de entrada, de salida y rango de fechas, al darle clic en generar máximo anual se exportará en formato xlsx los caudales máximos anuales para cada año filtrados y depurados:

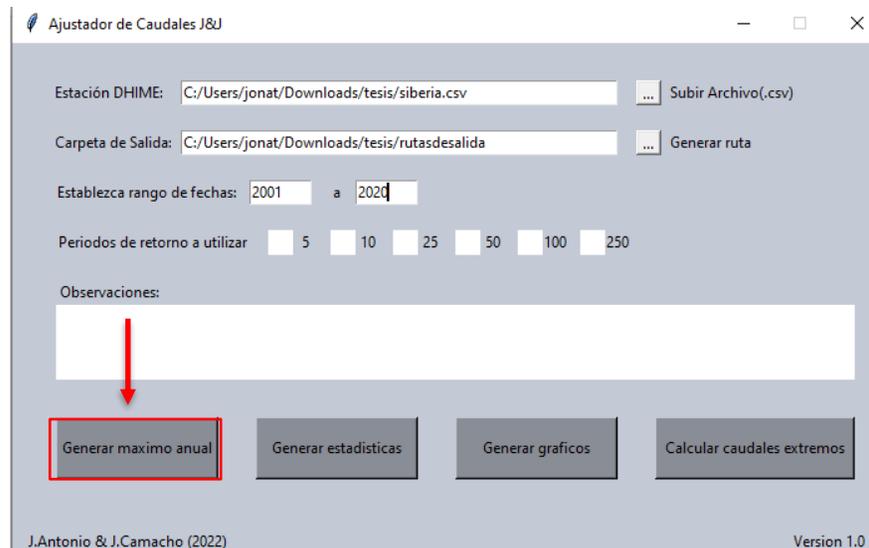


Figura 48. Extensión para generar los máximos anuales, fuente: Autores

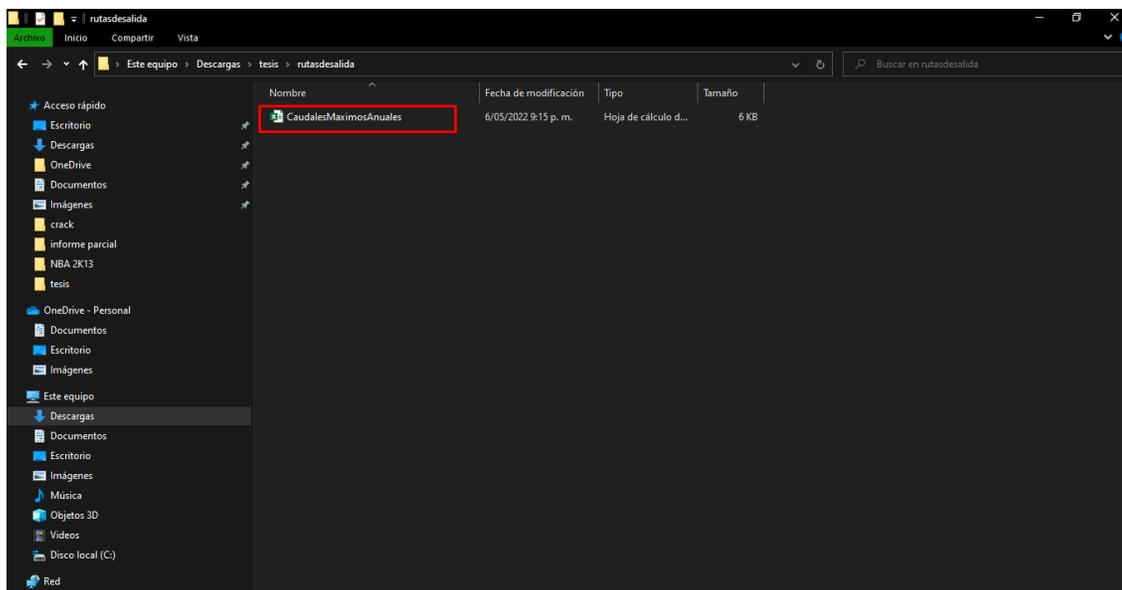


Figura 49. Generación de caudales máximos anuales, fuente: Autores

- **Generar estadísticas**

De la misma manera, tomando las variables de ruta de entrada y salida, se exportará en formato xlsx las estadísticas de los caudales mínimos, medios y máximos mensuales.

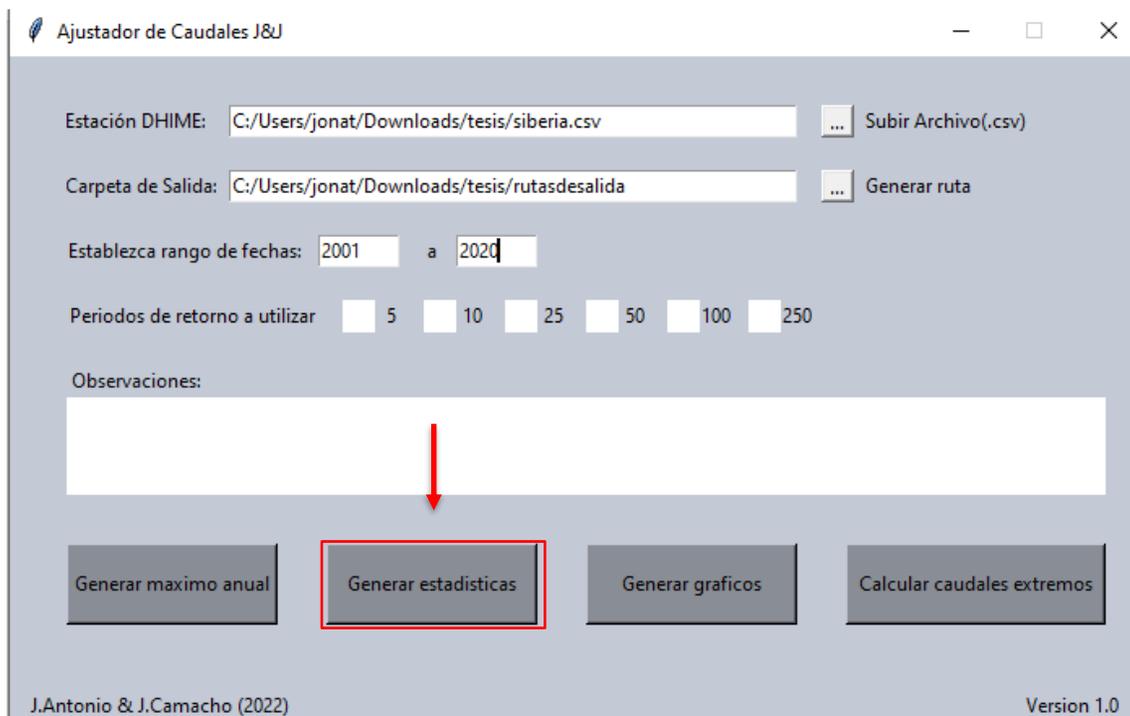


Figura 50. Extensión para generar estadísticos mensuales, fuente: Autores

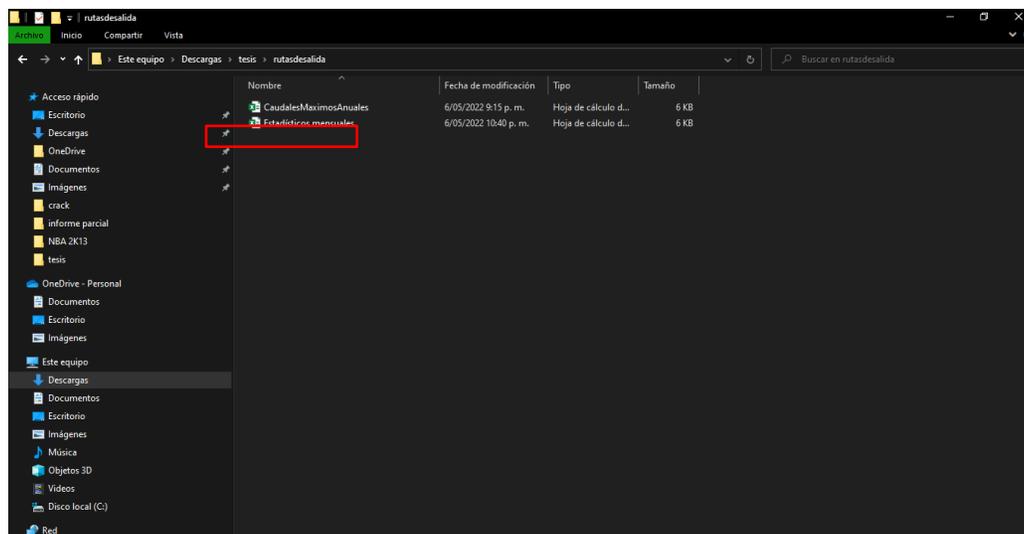


Figura 51. Generación de estadísticas mensuales, fuente: Autores

- **Generar gráficos**

Seguidamente, al darle clic en el botón de generar gráficos, se exportarán en formato PNG los gráficos correspondientes a caudales mínimos, medios, máximos mensuales, máximos anuales, máximos con outliers, máximos diarios e histogramas de caudales mínimos, medios y máximos:

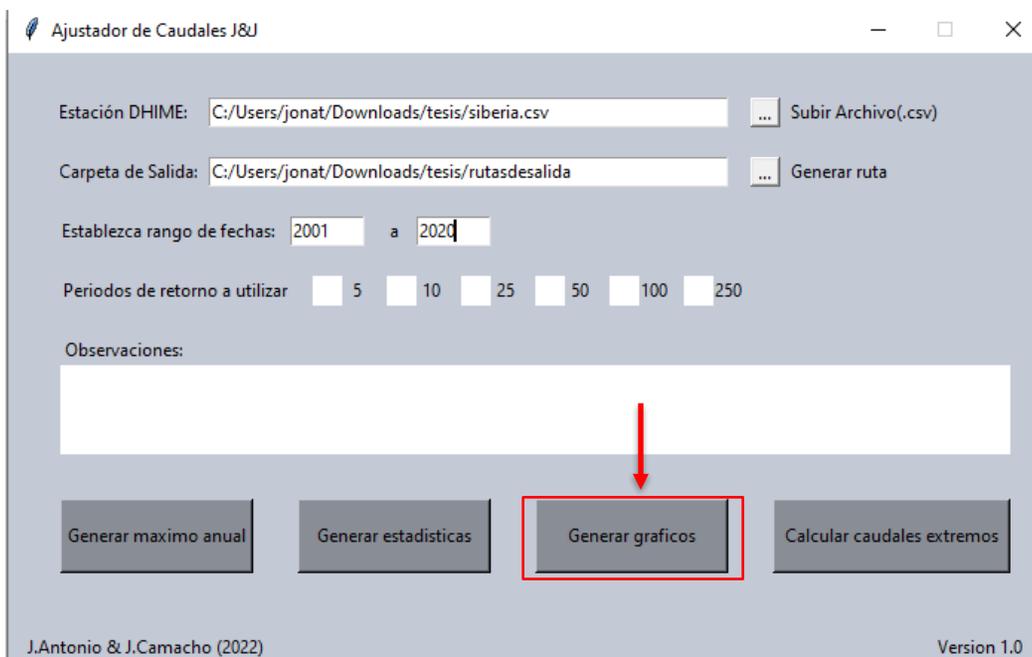


Figura 52. Extensión para generar gráficos, fuente: Autores

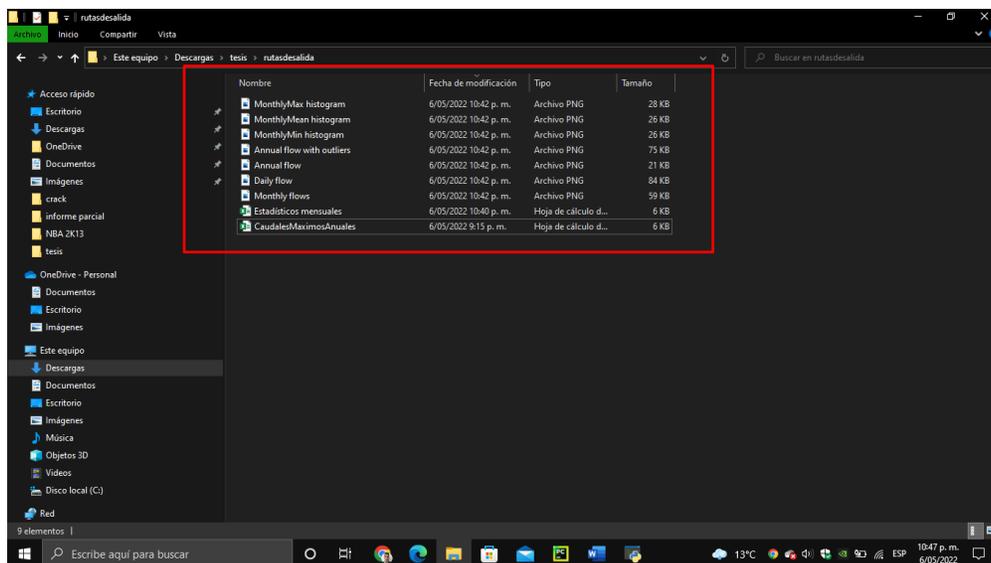


Figura 53. Generación de gráficos, fuente: Autores

- **Calcular máximos extremos**

El botón de calcular máximos extremos tiene como función generar en archivo tipo xlsx los caudales máximos ajustados a una prueba de distribución en diferentes periodos de retorno y generar un gráfico mostrando las distribuciones de probabilidad que se utilizaron. así mismo, al ejecutar este botón se evidenciará las observaciones y los periodos de retorno a utilizar:

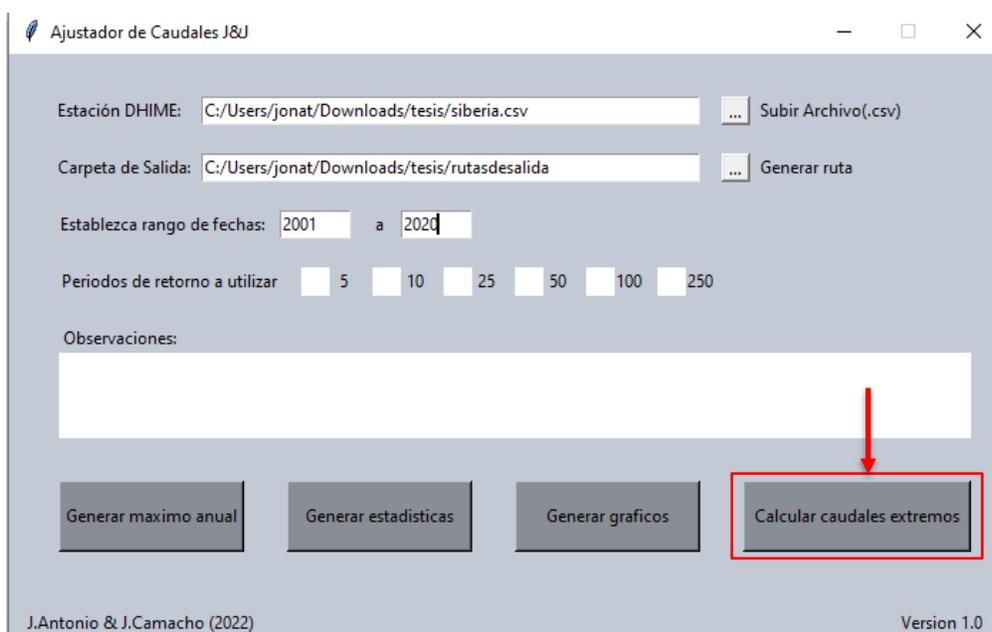


Figura 54. Extensión para generar gráfico de distribuciones de probabilidad y caudales máximos en tiempos de retorno ajustados con distribución probabilidad, fuente: Autores

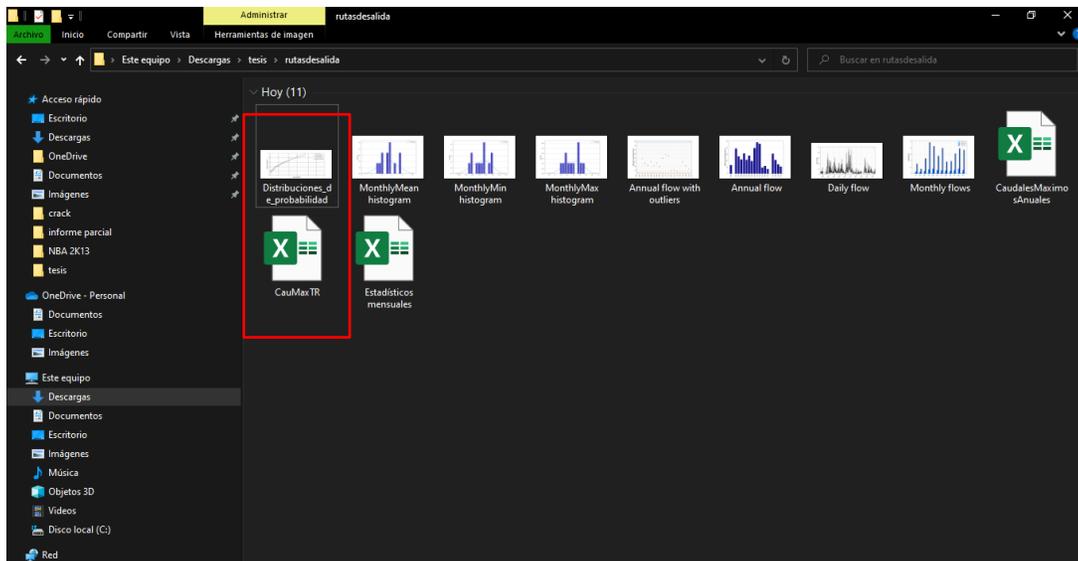


Figura 55. Generación de gráfico de distribuciones de probabilidad y caudales máximos en tiempos de retorno ajustados con distribución probabilidad, fuente: Autores

- **Periodos de retorno a utilizar**

Mencionado lo anterior, al darle en el botón Calcular caudales extremos, en los campos establecidos se marcarán con una X los periodos de tiempo que se utilizaron.

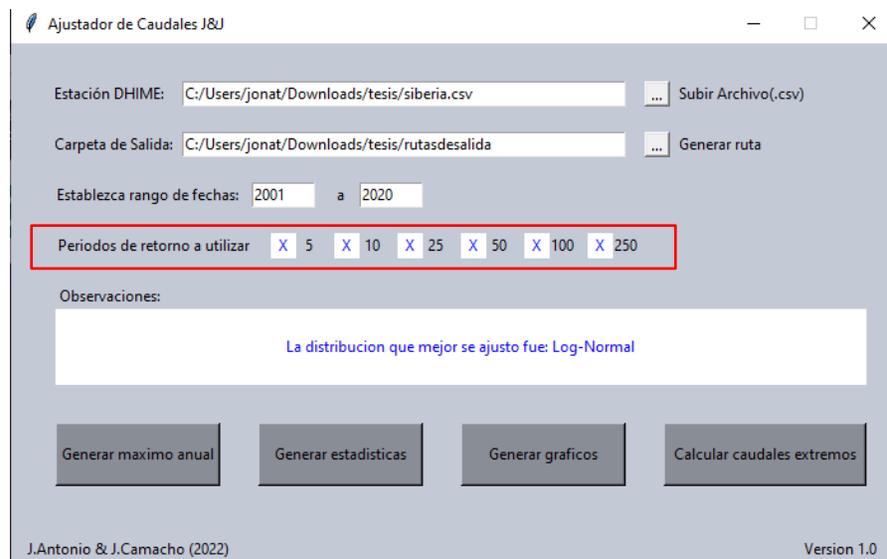


Figura 56. Selección de los tiempos de retorno que se utilizaron, fuente: Autores

- **Observaciones**

Como finalización, se ejecutará una observación cuando se dé clic en calcular máximos anuales extremos donde se argumentará cual fue la distribución que mejor se ajustó para la determinación de los caudales máximos anuales para los diferentes periodos de retorno.

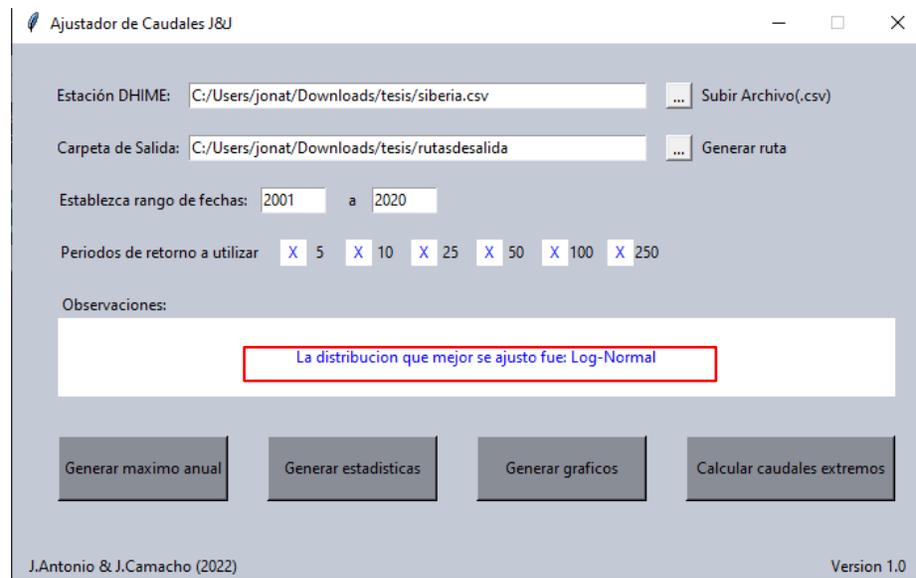


Figura 57. Selección de la distribución que mejor ajusta, fuente: Autores

Elaborada la interfaz gráfica totalmente funcional y explicada la metodología de utilización de esta misma, se procedió a analizar los resultados obtenidos para el proyecto:

Análisis de los resultados generados por la interfaz grafica

Teniendo en cuenta la metodología de aplicación de la interfaz gráfica, se estableció un rango de 20 años (periodo del 2000 al 2020) en el cual se emplearon los periodos de retorno mencionados anteriormente (5, 10, 25, 50 y 100 años), donde se generaron para las dos estaciones de estudio (estación la Siberia y estación la Trinidad) los siguientes resultados:

- **Caudales máximos anuales reportados.**

Tabla 1

Reporte de datos de caudales máximos anuales para un periodo de 20 años en las estaciones la Siberia y la Trinidad

Estación la Siberia		Estación la Trinidad	
Fecha	Valor	Fecha	Valor
2000	28,98	2000	2,824
2001	13,22	2001	2,894
2003	38,61	2003	8,817
2004	26,74	2004	5,879
2005	21,74	2005	3,305
2006	31,07	2006	4,907
2007	21,14	2007	4,316
2008	27,67	2008	5,056
2009	19,41	2009	5,349
2010	39,37	2010	11,53
2011	47,99	2013	3,395
2012	45,65	2014	5,509
2013	9,519	2015	2,925
2014	11,87	2017	5,25825
2015	7,4	2018	5,2093
2017	30,61194	2019	3,602488
2018	21,00141		
2019	14,26136		
2020	10,93541		

Fuente: Autores

La tabla 1 muestra datos de caudales máximos anuales en un periodo de 20 años correspondientes a las estaciones la Siberia y la Trinidad.

- **Estadísticos de los caudales mínimos, medios y máximos mensuales estación la Siberia**

Tabla 2

Estadísticos de los caudales mínimos, medios y máximos mensuales

	Máximos mensuales	Medios mensuales	Mínimos mensuales
Media	28,89291667	0,833583333	5,3475617
Mediana	29,035	0,884	5,460763488
Desviación estándar	11,86977507	0,282129243	1,442919946

Valor Máximo	47,99	1,259	7,792244712
Valor Mínimo	7,565	0,32	2,943960358
Curtosis	-1,090528774	-0,987393801	-0,777796075
Varianza	140,8915602	0,07959691	2,082017971
Coefficiente de Variación	0,410819552	0,338453555	0,269827639

Fuente: Autores

Tabla 3

Estadísticos de los caudales mínimos, medios y máximos mensuales en la estación la Trinidad

	Máximos mensuales	Medios mensuales	Mínimos mensuales
Media	5,889821354	0,023175	0,656342088
Mediana	5,429	0,029	0,634396197
Desviación estándar	2,966741876	0,009839408	0,272057436
Valor Máximo	11,53	0,0305	1,11925527
Valor Mínimo	1,2536625	0,004	0,252114521
Curtosis	-0,565942345	-0,40838694	-1,073884147
Varianza	8,801557361	9,6814E-05	0,074015249
Coefficiente de Variación	0,503706598	0,424569943	0,414505547

Fuente: Autores

La tabla 2 y tabla 3 muestra los estadísticos de los caudales mínimos, medios y máximos mensuales, los cuales dan a conocer el comportamiento de los datos para las estaciones la Siberia y Trinidad.

- Gráficos de caudales máximos diarios reportados en las estaciones

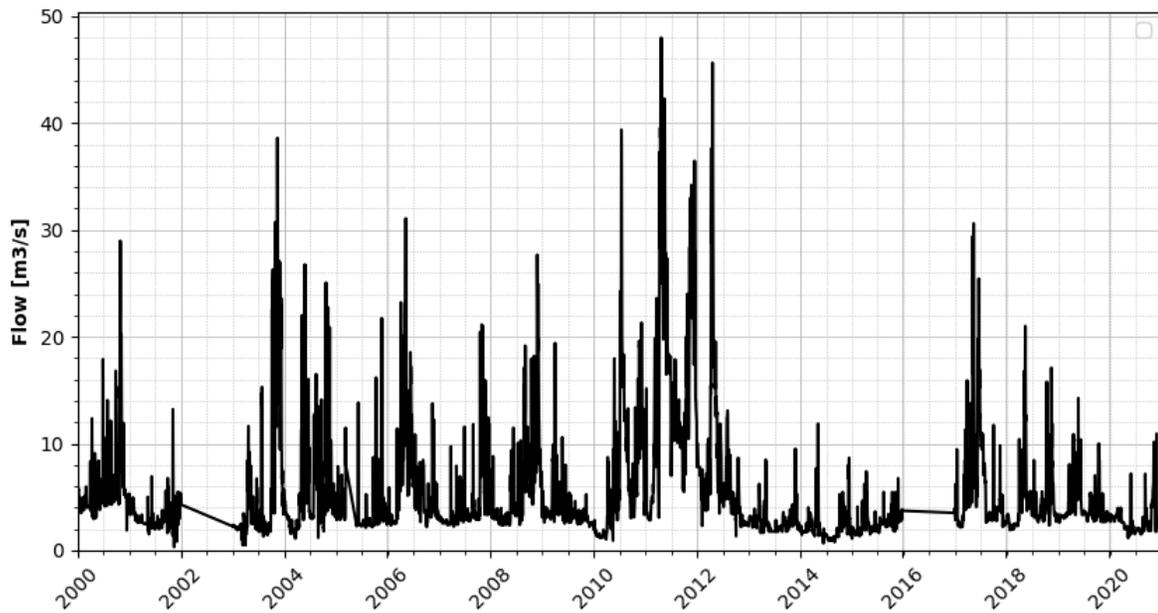


Figura 58. Caudales máximos diarios reportados en la estación la Siberia, fuente: Autores

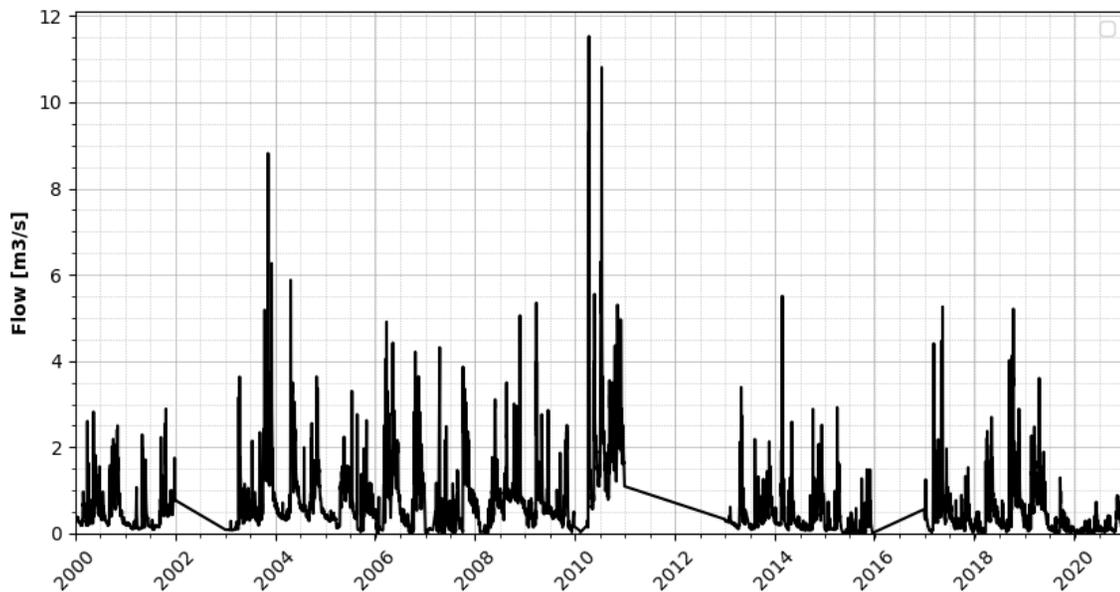


Figura 59. Caudales máximos diarios reportados en la estación la Trinidad, fuente: Autores

La figura 58 y figura 59 expone los caudales máximos diarios reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad, sin embargo, se evidencian líneas horizontales correspondientes a no registros de las estaciones.

- Caudales mínimos, medios y máximos mensuales reportados

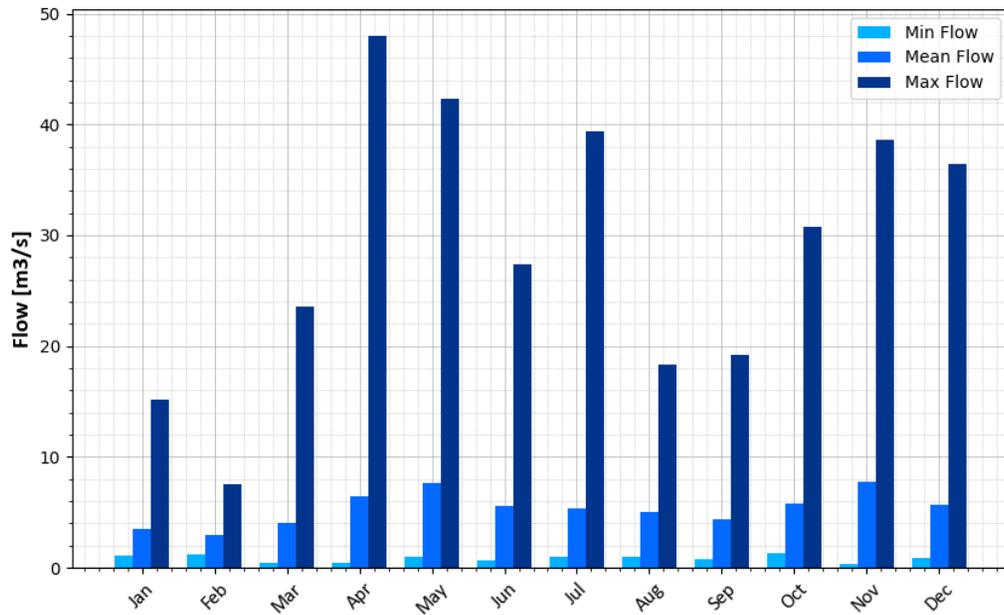


Figura 60. Caudales mínimos, medios y máximos mensuales reportados en la estación la Siberia, fuente: Autores

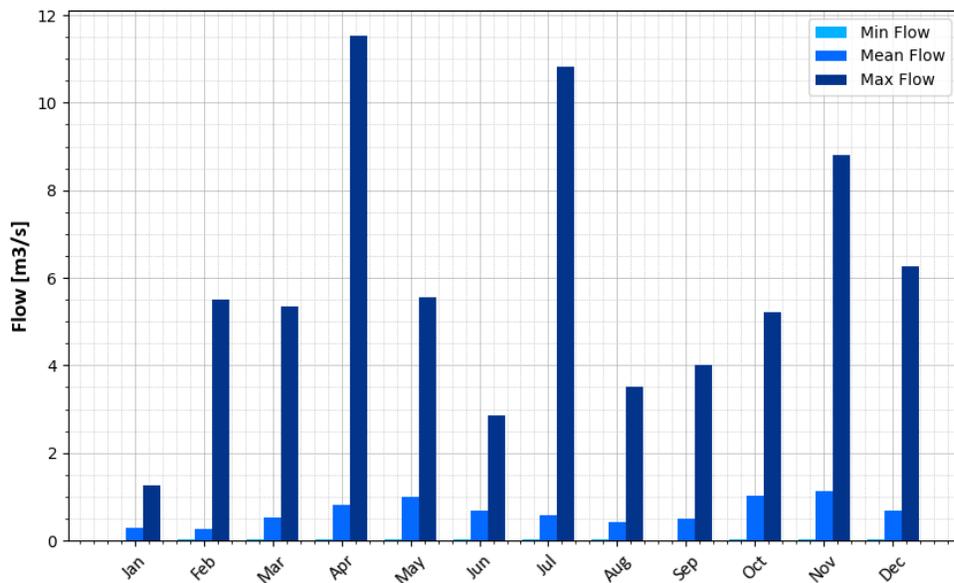


Figura 61. Caudales mínimos, medios y máximos mensuales reportados en la estación la Trinidad, fuente: Autores

La figura 60 y figura 61 da a conocer los caudales mínimos, medios y máximos mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad durante los periodos de años del 2000 al

2020, es decir, y según lo evidenciado que para el mes de abril en las dos estaciones fue donde se reportó un valor máximo de caudal para los años estudiados.

- **Valores atípicos (Outliers)**

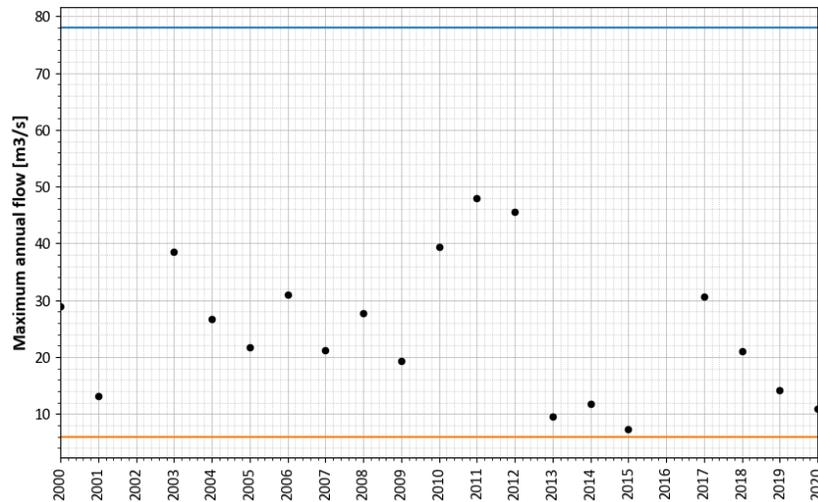


Figura 62. Caudales máximos anuales con outliers reportados en la estación la Siberia, fuente: Autores

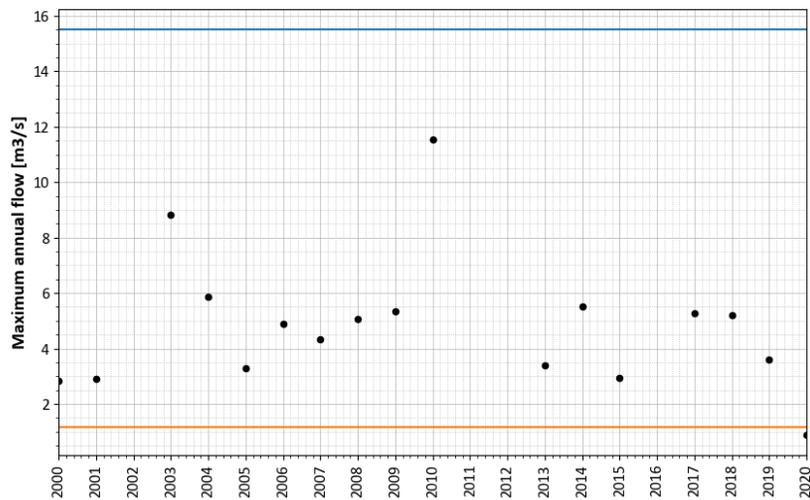


Figura 63. Caudales máximos anuales con outliers reportados en la estación la Trinidad, fuente: Autores

En la figura 62 y figura 63 se dan a conocer los datos atípicos o outliers presentes en los caudales máximos anuales de las estaciones la Siberia y la Trinidad. Los datos atípicos en el caso de caudales máximos se deben a errores de tipo humano y a la existencia en un valor

anómalo en el cual hay un evento de grandes magnitudes que no se vuelve a reportar y que sale de la media y de la desviación estándar. De lo anterior, Para el caso de la estación la Siberia en el periodo del 2000 al 2020 no se presentan datos atípicos, pero en la estación la Trinidad en el año 2020 si hay presencia de un dato atípico.

- **Caudales máximos anuales**

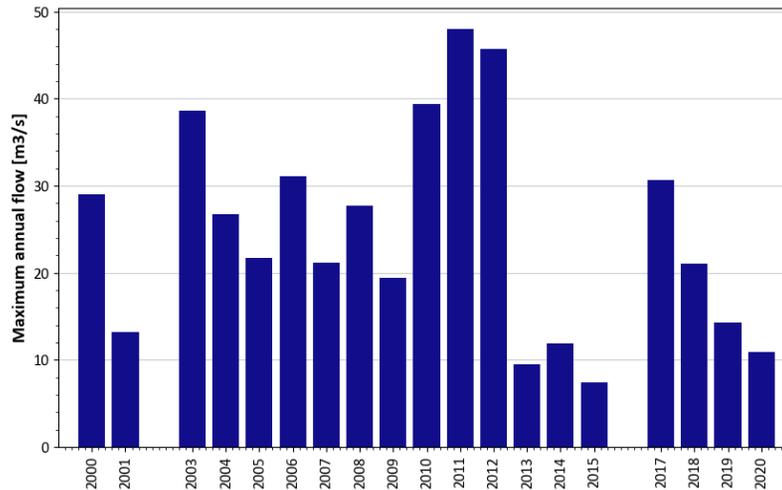


Figura 64. Caudales máximos anuales reportados en la estación la Siberia, fuente: Autores

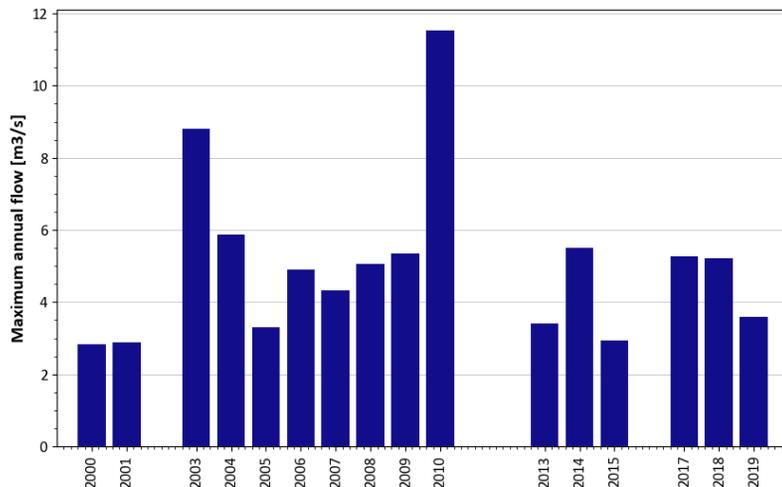


Figura 65. Caudales máximos anuales reportados en la estación la Trinidad, fuente: Autores

La figura 64 y figura 65 presenta los caudales máximos anuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad, las cuales evidencian un alto pico de caudales productos de lluvias torrenciales durante el año 2011 para la estación la Siberia y 2010 para la estación la Trinidad,

sin embargo, en las dos estaciones no se reportaron valores de caudales máximos en distintos años, esto pudo deberse a que en esos periodos se presentaba el fenómeno meteorológico de la niña y la estación estaba en mantenimiento o fuera de operación.

- **Histograma de Caudales mínimos mensuales**

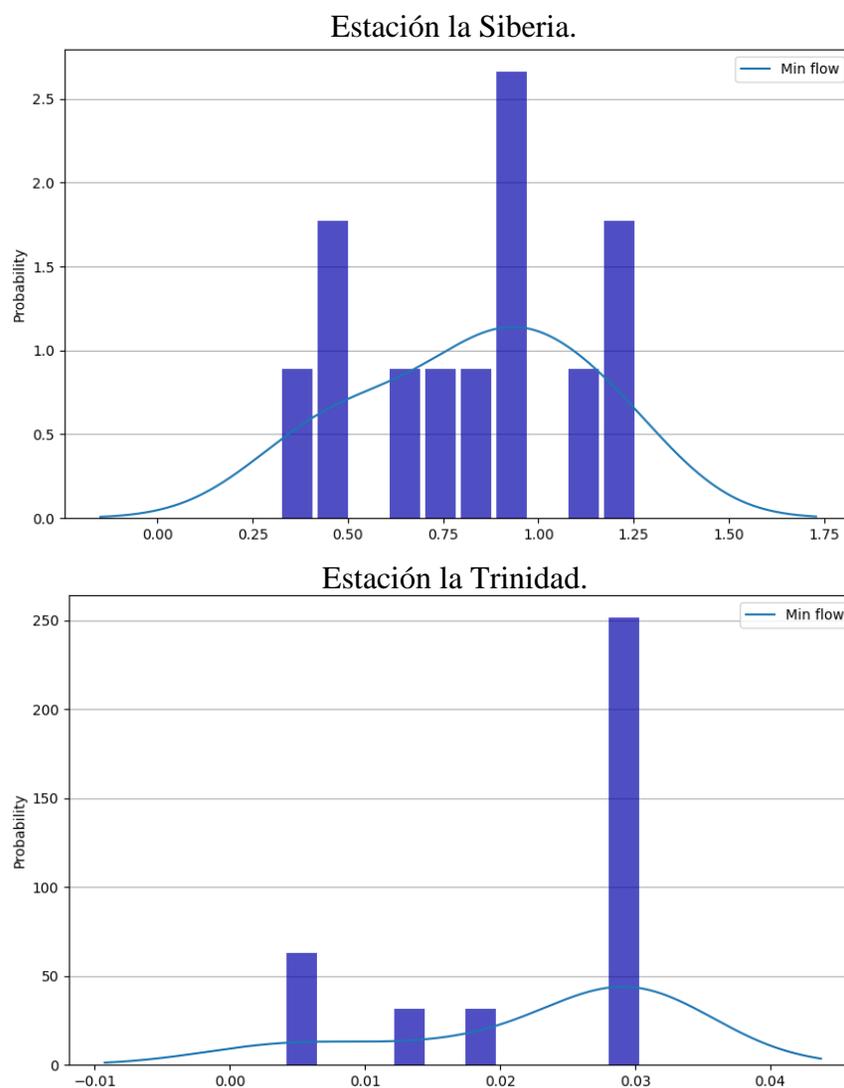


Figura 66. Histograma de caudales mínimos mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad, fuente: Autores

La figura 66 presenta la frecuencia de los caudales mínimos mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad.

- **Histograma de Caudales medios mensuales**

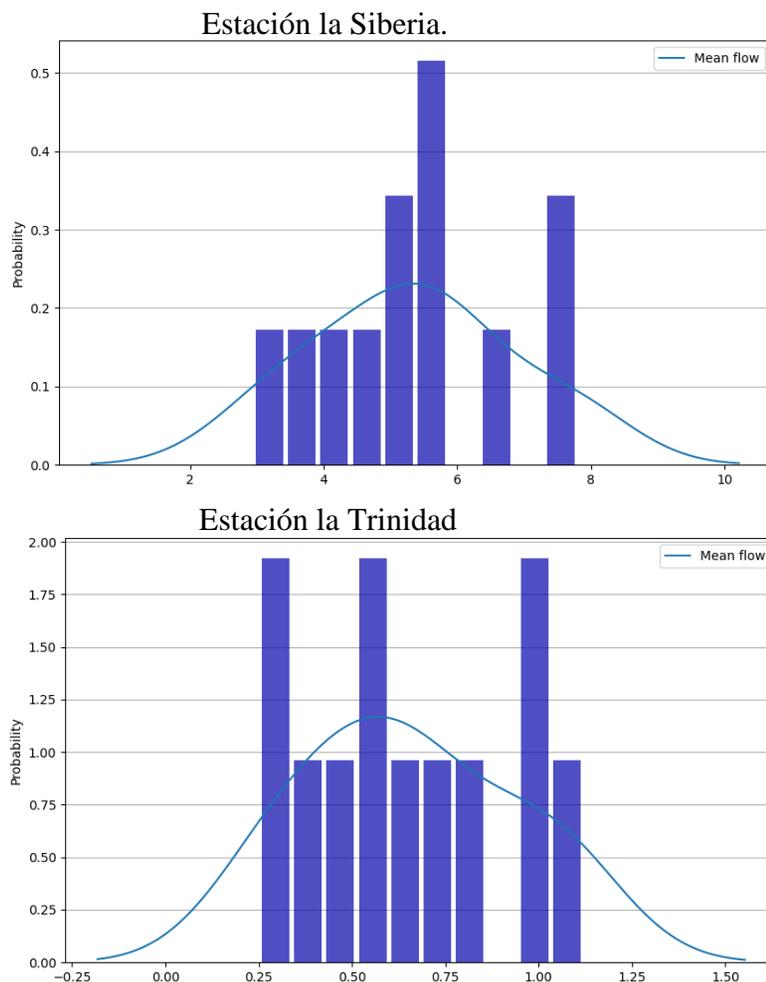


Figura 67. Histograma de caudales medios mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad, fuente: Autores

La figura 67 presenta la frecuencia de los caudales medios mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad.

- **Histograma de Caudales máximos mensuales**

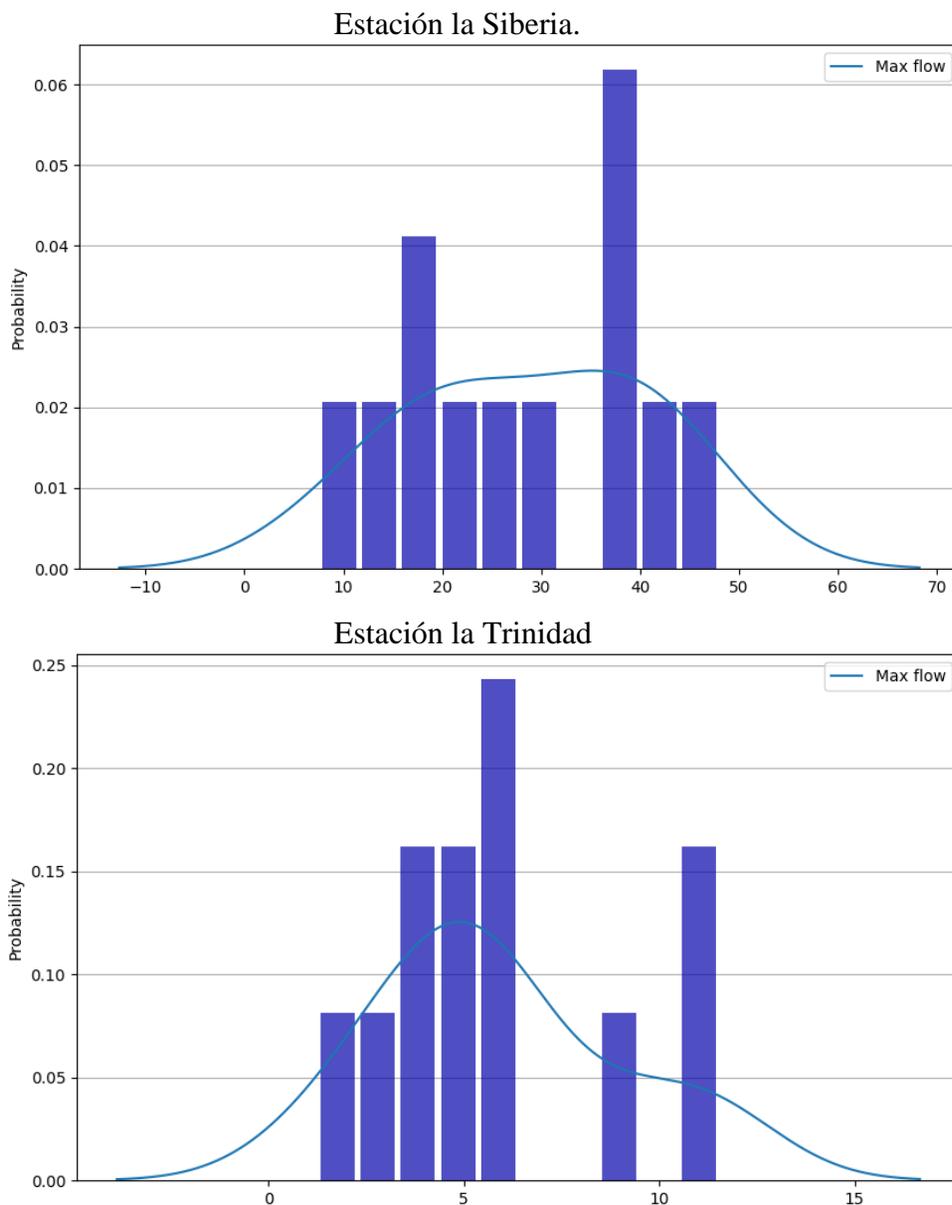


Figura 68. Histograma de caudales máximos mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad, fuente: Autores

La figura 68 presenta la frecuencia de los caudales medios mensuales reportados en las estaciones la Siberia y la Trinidad.

- **Distribuciones de probabilidad**

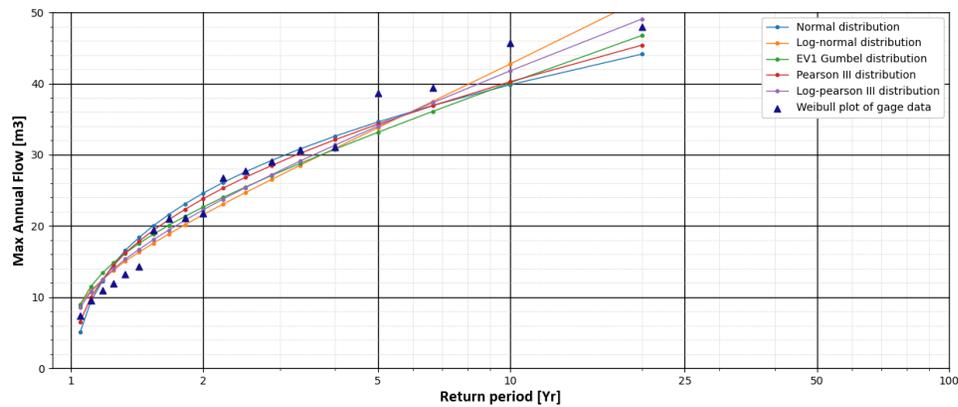


Figura 69. Distribuciones de probabilidad estación la Siberia, fuente: Autores

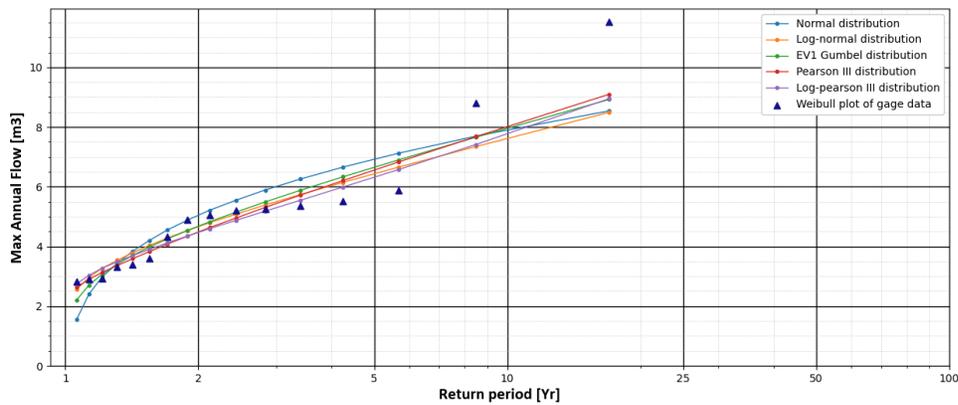


Figura 70. Distribuciones de probabilidad estación la Trinidad, fuente: Autores

La figura 69 y figura 70 muestra las distintas distribuciones de probabilidad que se emplean a los datos de caudal máximo de las estaciones la Siberia y la Trinidad. Dependiendo del comportamiento de los valores de caudal máximo reportados en las estaciones se ajusta a una de las distribuciones de probabilidad. De lo anterior, para el caso de la estación la Siberia se ajustó a la distribución Pearson III y para la estación la Trinidad se ajustó a la distribución Log-Normal.

- **Resultados de caudales para diferentes periodos de retorno.**

Tabla 4

Resultados de caudales para los diferentes periodos de retorno para el río Chicamocha - estación la Siberia

	T	Dist Pearson III [Esperado]
0	5	34,29040751
1	10	40,24125397
2	25	46,94733632
3	50	51,48039589
4	100	55,69430644
5	250	60,90079814

Fuente: Autores

Tabla 5

Resultados de caudales para los diferentes periodos de retorno para el río Surba - estación la Trinidad

	T	Dist LogNormal [Esperado]
0	5	6,437460192
1	10	7,619639692
2	25	9,120421633
3	50	10,24366178
4	100	11,37169715
5	250	12,88358925

Fuente: Autores

La tabla 4 y tabla 5 presentan los resultados de los caudales máximos anuales ajustados a una distribución de probabilidad para diferentes periodos de retorno (5, 10, 25, 50, 100, 250 años) de las estaciones la Siberia y la Trinidad. Estos datos son base importante para el desarrollo del modelo hidrodinámico bidimensional.

Elaboración del Modelo Hidrodinámico

Continuando con la metodología y una vez realizados las etapas uno y dos, se procede a elaborar el modelo hidrodinámico bidimensional, que será empleado en el proyecto, para la determinación de las huellas de inundación en los diferentes periodos de retorno. Para esto, se diseñó una topografía, por medio de la elaboración del mallado el cual permite ser empleado para el desarrollo del modelo, determinando el tamaño de malla más apropiado mediante interacciones sucesivas de ensayo y error y que consigo se cumplan en cuanto a tiempo requerido y resultados simulados. De igual forma, se elaboró un polígono de coeficientes de Manning y se establecieron las condiciones de frontera permitiendo simular en el modelo hidrodinámico requerido unos escenarios muy semejantes a las condiciones reales de la zona.

Para elaborar por completo el modelo hidrodinámico se deben seguir determinados pasos, primero es necesario construir la topología del terreno y para el caso del proyecto se utilizó el programa ArcGIS en el cual se empleó el ráster que fue producto de la consultoría que realizó CORPOBOYACA y el CONSORCIO RÍO CHICAMOCHA IEH GRUCON – H&E, seguido a esta elaboración, se procede a utilizar el programa HEC RAS con la herramienta RAS – Mapper para toda la elaboración y ajuste del modelo final con el que se trabajaran los diferentes periodos de retorno, a continuación se describe en detalle los pasos mencionados:

Elaboración de la topografía en ArcGIS.

Para la elaboración del terreno, se tomó la información limnimétrica sobre la batimetría diseñada en la consultoría realizada por CORPOBOYACÁ y CONSORCIO RÍO CHICAMOCHA IEH GRUCON – H&E, la cual, detalla por medio de imágenes LIDAR los cauces de las cuencas. sin embargo, la cobertura de estos datos no abarca lo establecido para la zona de estudio sino, únicamente la confluencia de los dos ríos, pero teniendo en cuenta la magnitud que conlleva la realización de estos mapas con información tan precisa y minuciosa, se optó por reducir la zona de modelación a la abarcada por la topografía, con el objetivo de que los resultados obtenidos estén más allegados a las condiciones reales (debido a que no se cuenta con información tan detallada y precisa fuera de la modelada en el presente proyecto).

Por tanto, se tuvo que realizar primeramente un TIN por medio del programa ArcGIS, luego se elaboró un ráster que consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.

Para el respectivo modelo, es necesario apreciar un mapa que contenga las respectivas características y condiciones limnimétricas del terreno perteneciente a la zona de estudio, de tal forma que al momento de montar este mapa en el programa HEC RAS 2D y ejecutar la modelación del caudal, se obtengan resultados representativos de las condiciones reales del terreno, evaluando su comportamiento, su velocidad, su desplazamiento e incluso su carga.

Para esto, y por medio de la consultoría que realizó CORPOBOYACÁ y CONSORCIO RÍO CHICAMOCHA IEH GRUCON – H&E (para la definición de ronda de protección ambiental, cota máxima de inundación y alternativas de adecuación hidráulica) se toma la información de batimetría para elaborar un TIN y se convierte en un RASTER, luego de este proceso de construcción de topografía, se procede entonces a realizar el siguiente procedimiento en el programa HEC RAS 2D con motivo de analizar el comportamiento de los flujos:

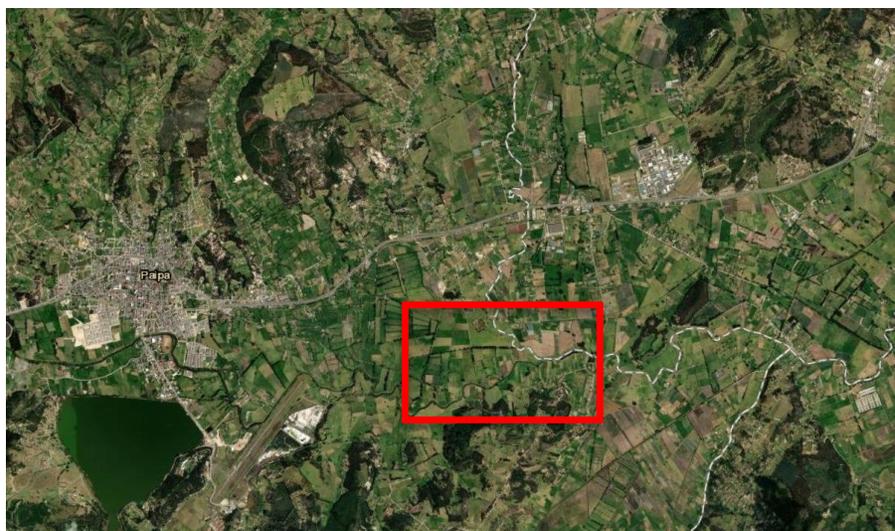


Figura 71. Ubicación de la confluencia, fuente: Autores



Figura 72. TIN del terreno, fuente: Autores

Luego de la elaboración del TIN se procede a elaborar el RASTER que será utilizado en el programa HEC RAS 2D por medio de la herramienta de RAS Mapper:



Figura 73. Ráster del terreno, fuente: Autores

Para visualizar mejor el ráster elaborado, cambiamos los colores respectivos de la escala de alturas, así se logra diferenciar aún mejor las zonas más bajas y las zonas más altas, logrando consigo interpretar a primera vista el sentido del flujo del canal:

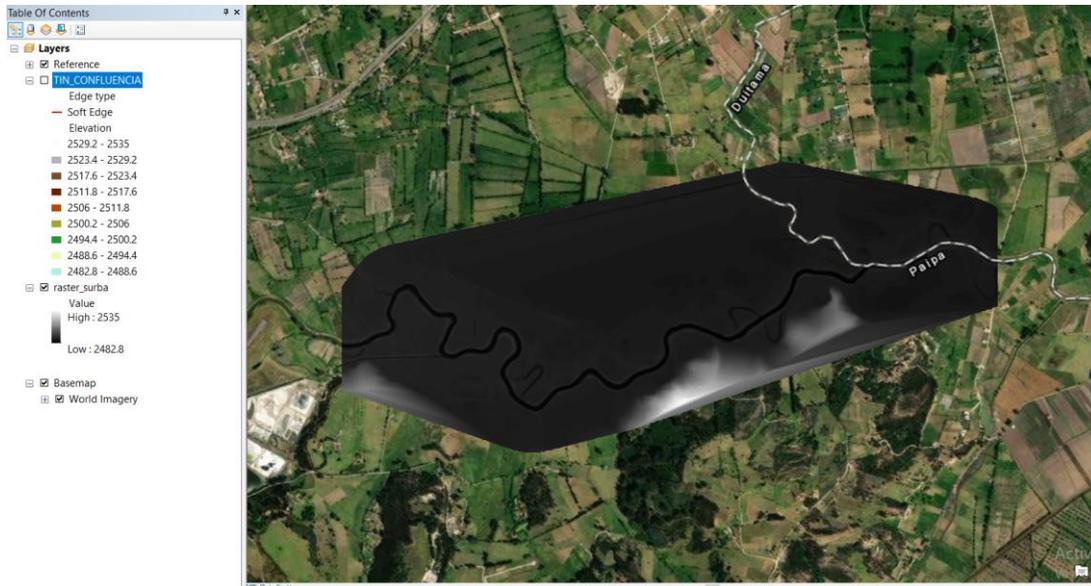


Figura 74. Ráster con escala de alturas a color de escala de grises, fuente: Autores

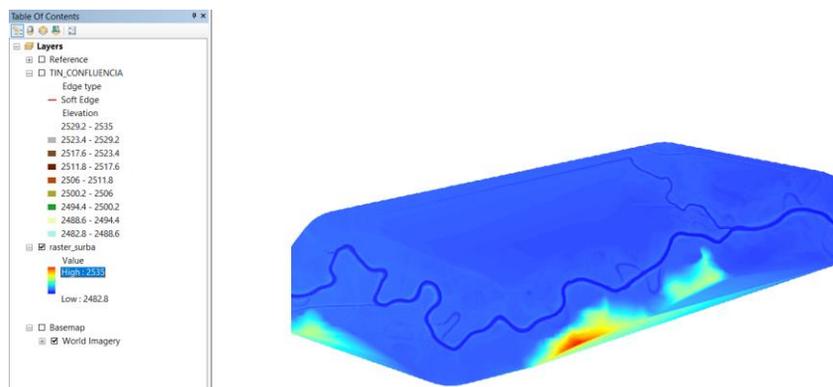


Figura 75. Ráster con escala de alturas a color, fuente: Autores

Elaboración del modelo en HEC RAS

Crear nuevo proyecto.

Para el caso del proyecto, se emplea la modelación por medio del programa HEC RAS en su versión 5.0.7. Se arranca el programa y en la interfaz del mismo se crea un nuevo proyecto el cual será guardado en la carpeta a elección con su respectivo nombre.

Para esto procedemos a ir a “File” lo cual desplegará una pestaña que permitirá crear tanto la carpeta donde quedara el proyecto, como el nombre del mismo, así que se creó una carpeta asignando un nombre al modelo, para posteriormente guardar en “OK”:

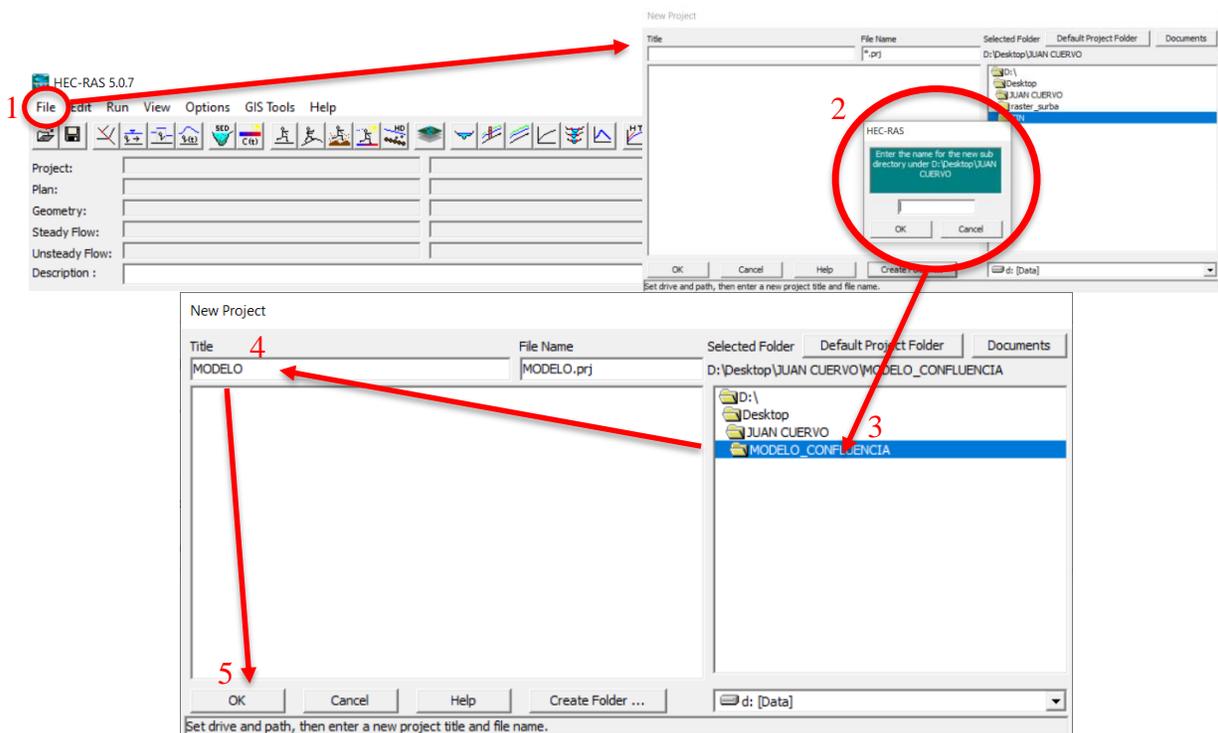


Figura 76. Creación de carpeta en HEC RAS, fuente: Autores

- Cambio de unidades en las que trabajara el programa

Para el caso del estudio se definió que la elaboración del modelo será llevada a cabo en unidades del Sistema Internacional - SI, es por lo anterior, que se procede a cambiar las coordenadas antes de elaborar algún otro componente del modelo:

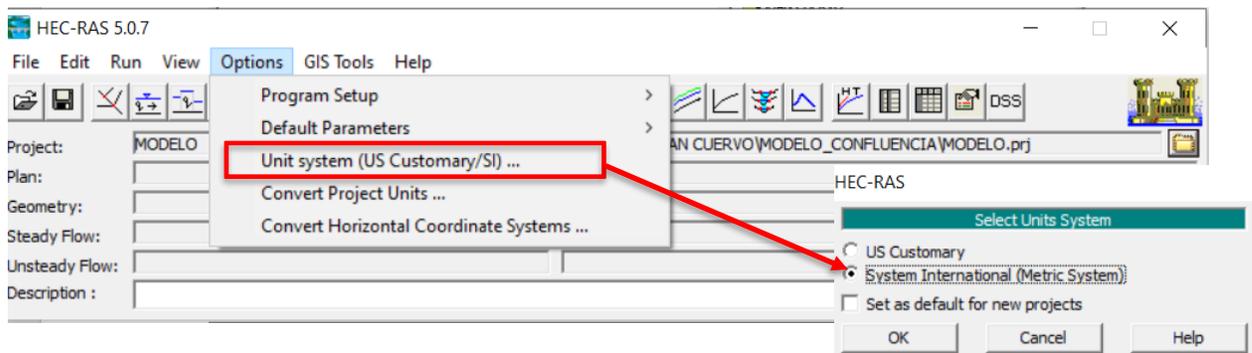


Figura 77. Cambio de unidades, fuente: Autores

Crear un nuevo terreno en la extensión de RAS Mapper.

Para ello se procedió a abrir la herramienta de RAS Mapper desde el menú de GIS Tool y se creó un nuevo terreno, sin embargo, cabe resaltar que si el archivo DEM (Raster “.tiff”) tiene alguna proyección asociada, es necesario elegir la opción de “NO”, de lo contrario, si se elige la opción de “SI” se debe escoger el sistema de proyección adecuado, luego de esto se guarda y exporta el terreno subido en formato JPG:

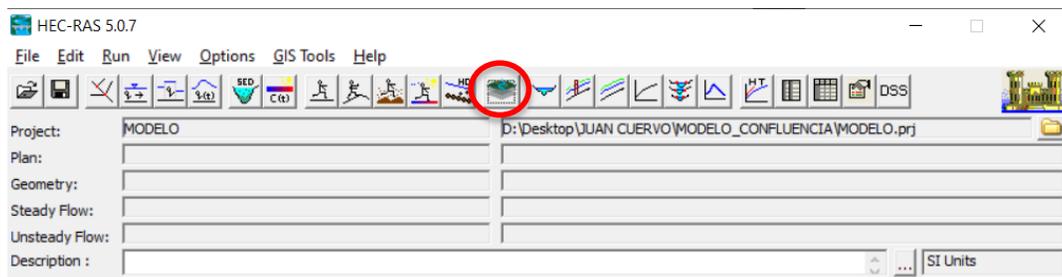


Figura 78. Herramienta RAS Mapper, fuente: Autores

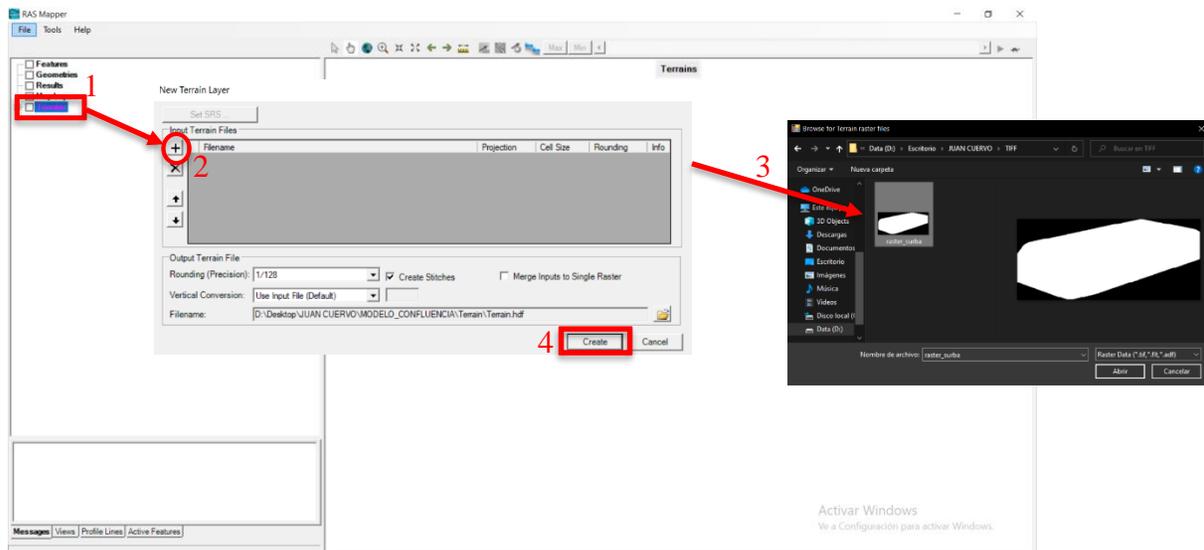


Figura 79. Importar Ráster en formato tiff, fuente: Autores

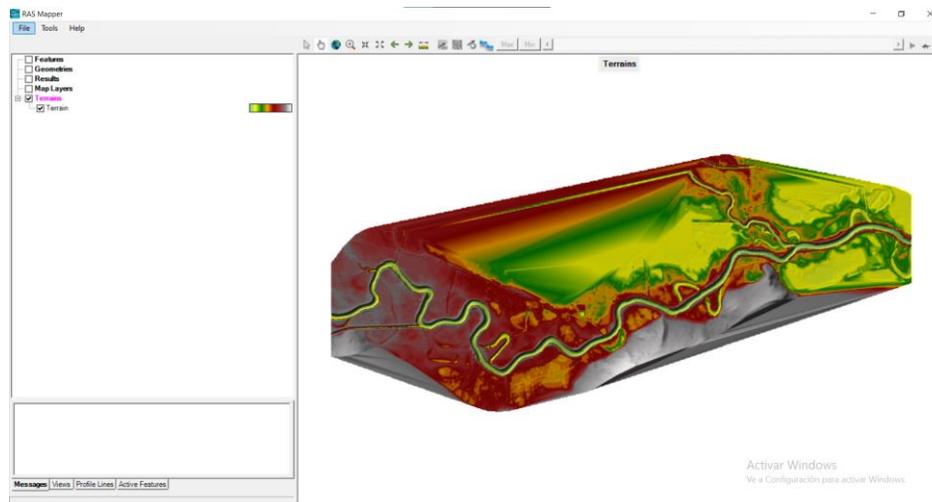


Figura 80. Terreno montado en formato tiff, fuente: Autores

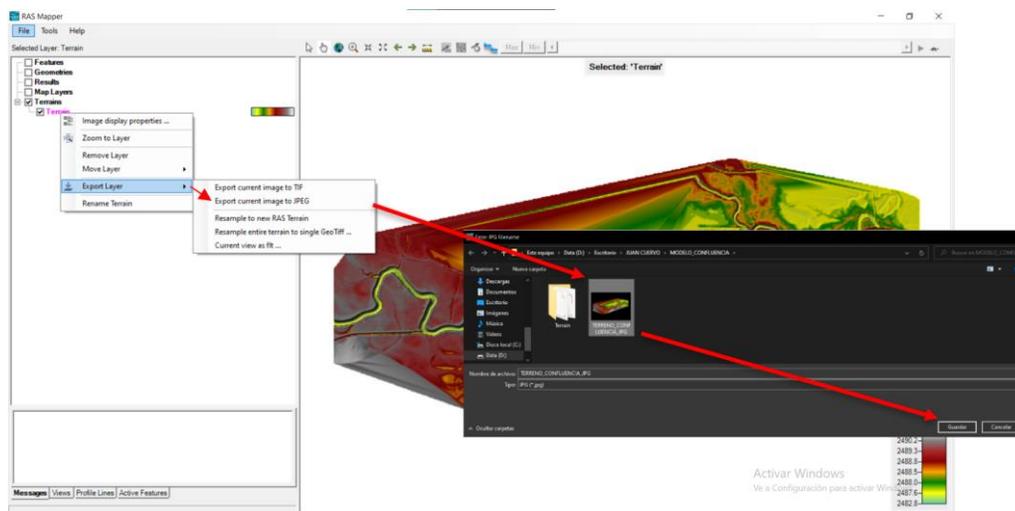


Figura 81. Conversión del tiff a formato JPG, fuente: Autores

Elaboración del polígono a modelar.

Luego de montado el terreno en la herramienta de RAS Mapper, se procede a dibujar minuciosa y detalladamente el respectivo polígono 2D:

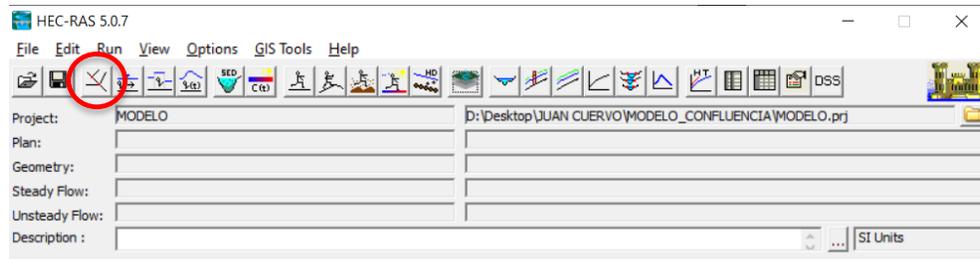


Figura 82. Herramienta para el trazado de geometría, fuente: Autores

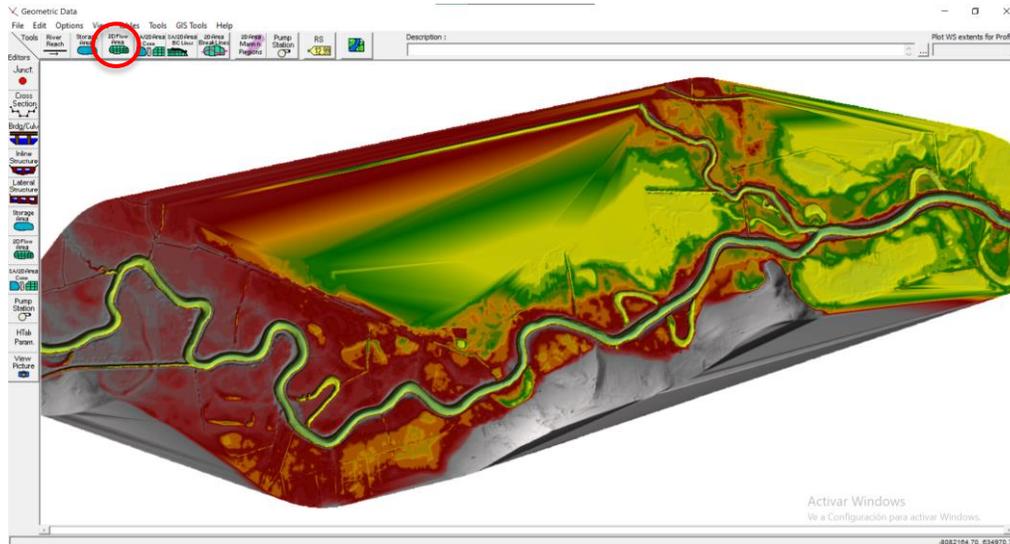


Figura 83. Herramienta para el trazado del polígono 2D, fuente: Autores

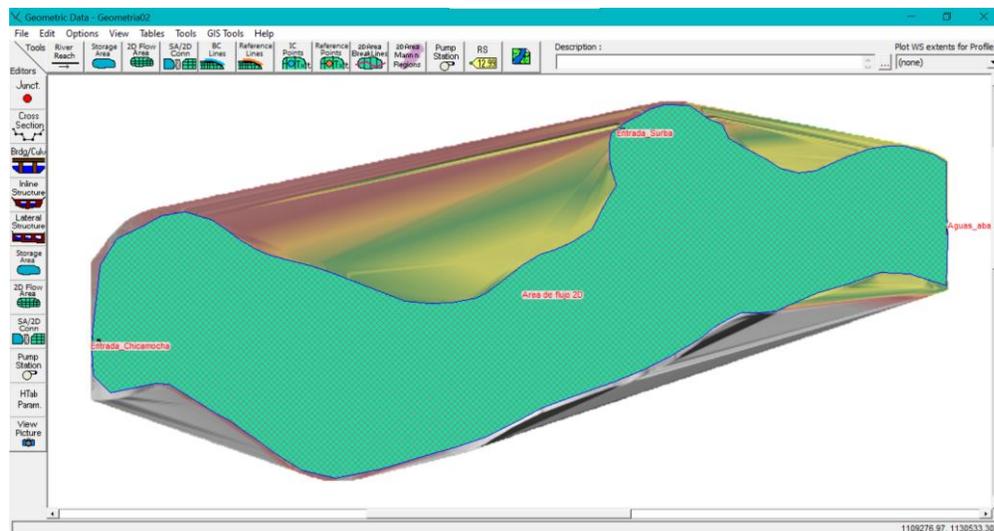


Figura 84. Polígono del área de flujo 2D, fuente: Autores

Elaboración del mallado 2D.

Se crean puntos computacionales para el área de flujo en 2D, definiendo los espaciados DX y DY, dependiendo de los puntos establecidos, el modelo tendrá más detalle, sin embargo, se presentan algunos puntos rojos lo cual representa un error a causa de la superposición de los centros de las celdas o algunas líneas, las cuales pueden estar fuera del área de flujo 2D.

Para dar solución a ello, en el editor de geometría se seleccionan los submenús apropiados como mover punto u objetos o agregar puntos o eliminar puntos, consiguiendo que se suavice los límites de las celdas (eliminando los puntos rojos del error):

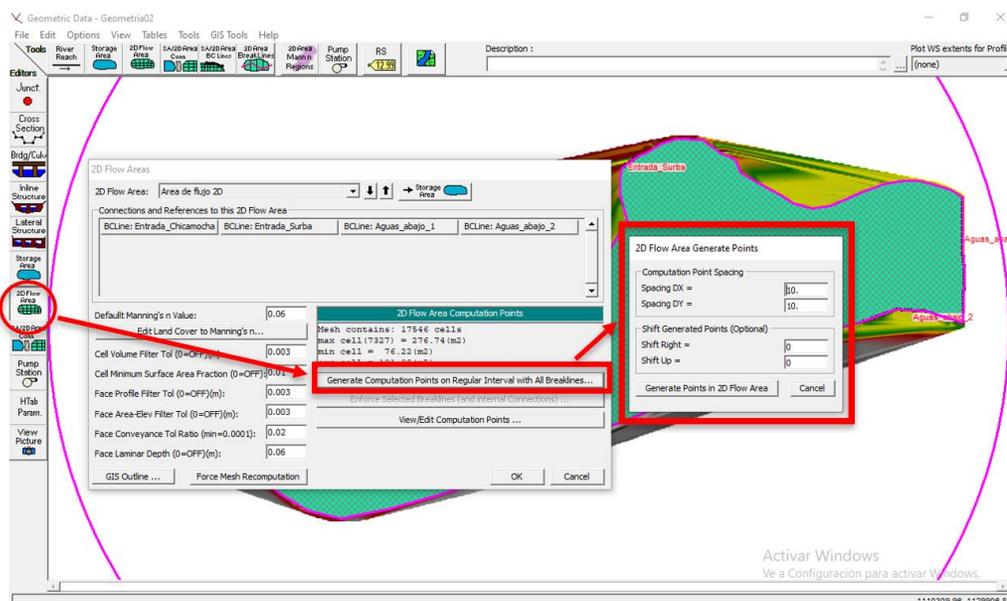


Figura 85. Herramienta para elaborar mallado 2D, fuente: Autores

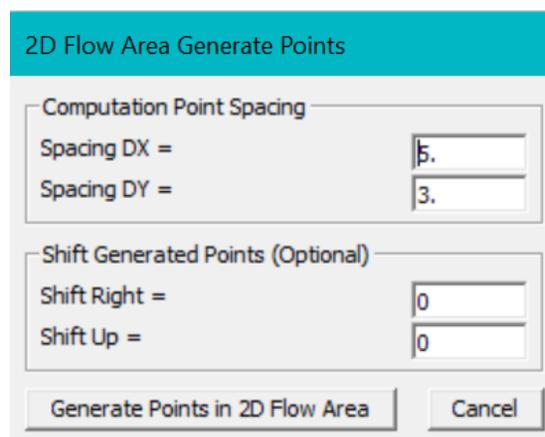


Figura 86. Definición de espaciados DX y DY, fuente: Autores

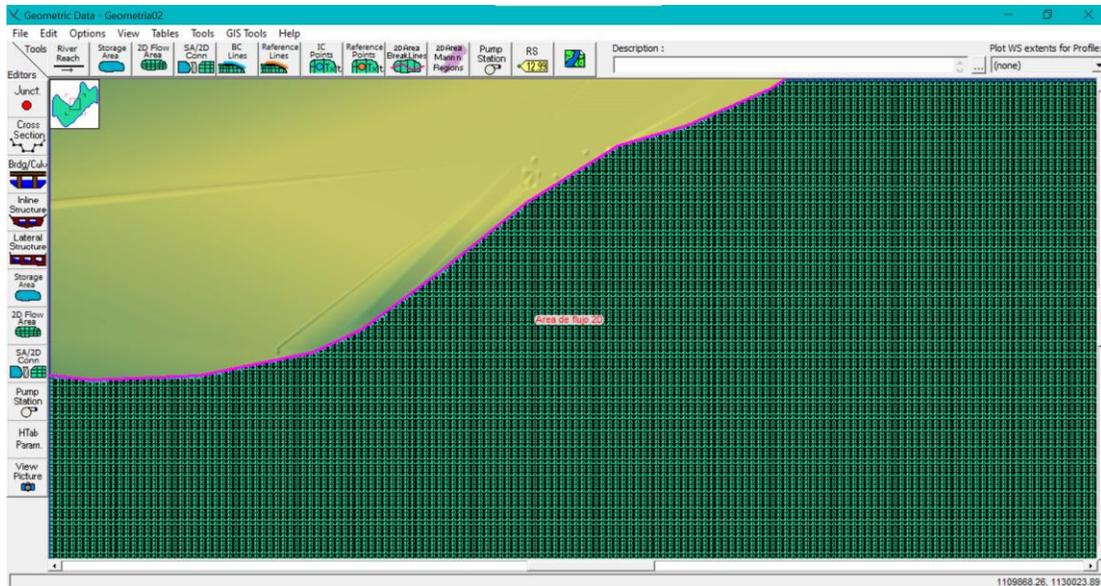


Figura 87. Mallado, fuente: Autores

Delimitación de las líneas de contorno aguas arriba y aguas abajo.

Las líneas de BC de área SA/2D son dibujadas al comienzo del flujo y a la salida de este, cabe resaltar que, para evitar los errores, es recomendable dibujar estas líneas de contorno fuera del polígono de flujo.

Finalmente se procede a guardar la geometría diseñada:

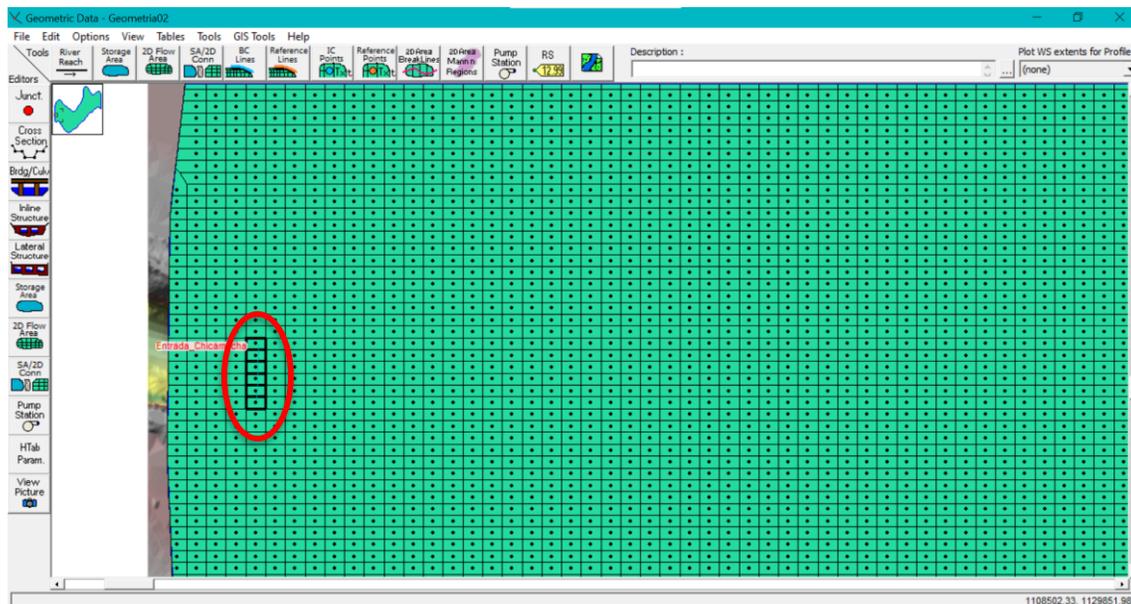


Figura 88. Línea de contorno aguas arriba río Chicamocha (entrada), fuente: Autores

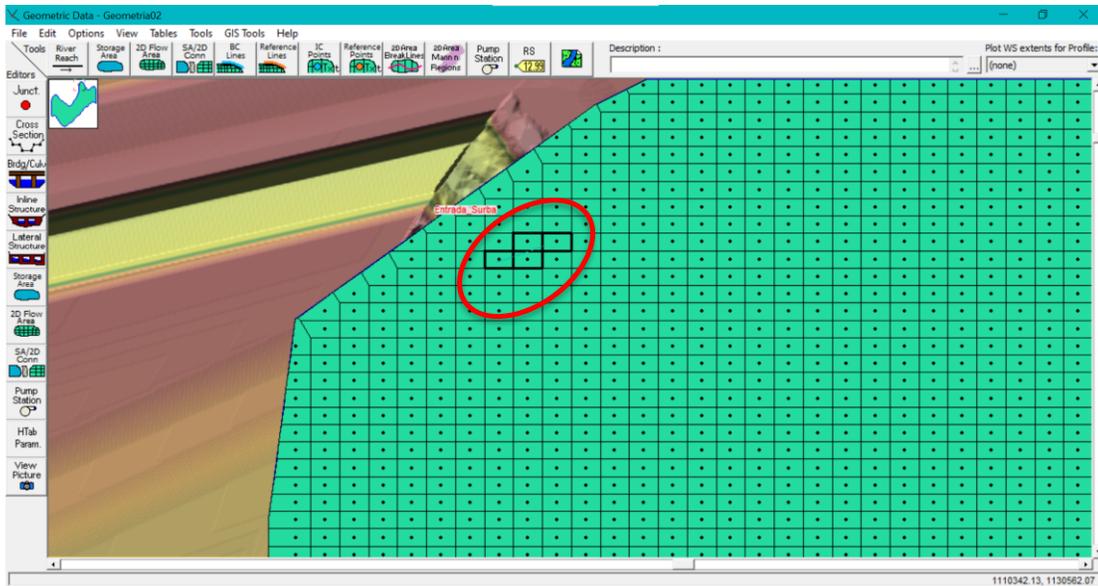


Figura 89. Línea de contorno aguas arriba río Surba (entrada), fuente: Autores

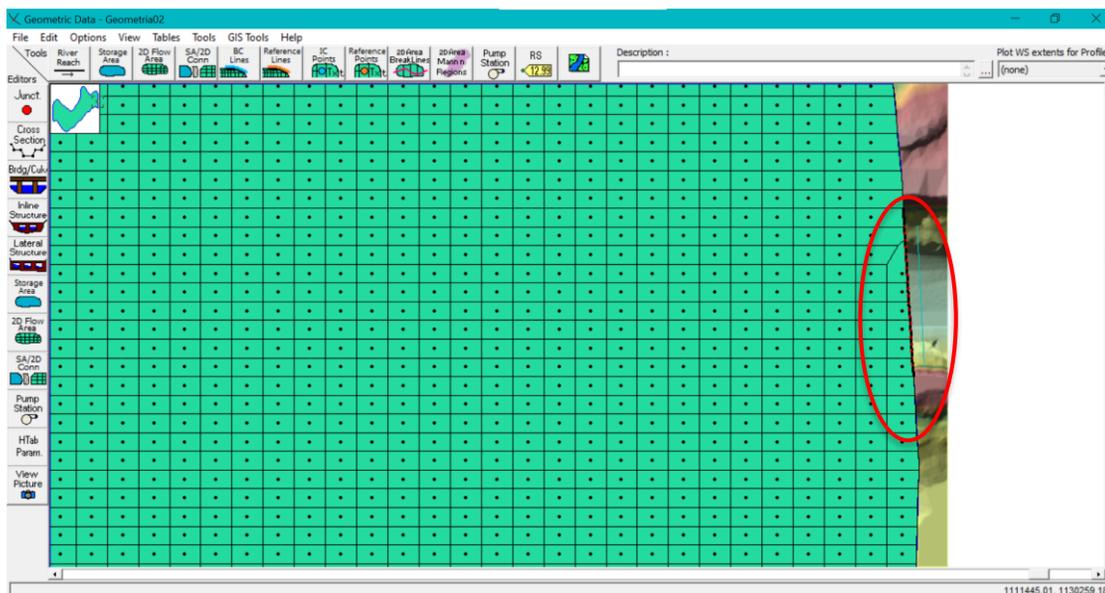


Figura 90. Líneas de contorno aguas abajo confluencia (salida), fuente: Autores

Cálculo de la tabla hidrodinámica de flujo del área 2D.

Esta tabla define la cantidad de celdas a procesar dentro del polígono, para conocer la tabla hidrodinámica del flujo, es necesario activar la capa de "2D Flow Áreas", sin embargo, la malla no se generó con éxito y por tanto es necesario volver a calcular la malla en 2D (reemplazar la malla anterior), finalmente se realiza el mismo procedimiento para elaborar la tabla hidráulica:

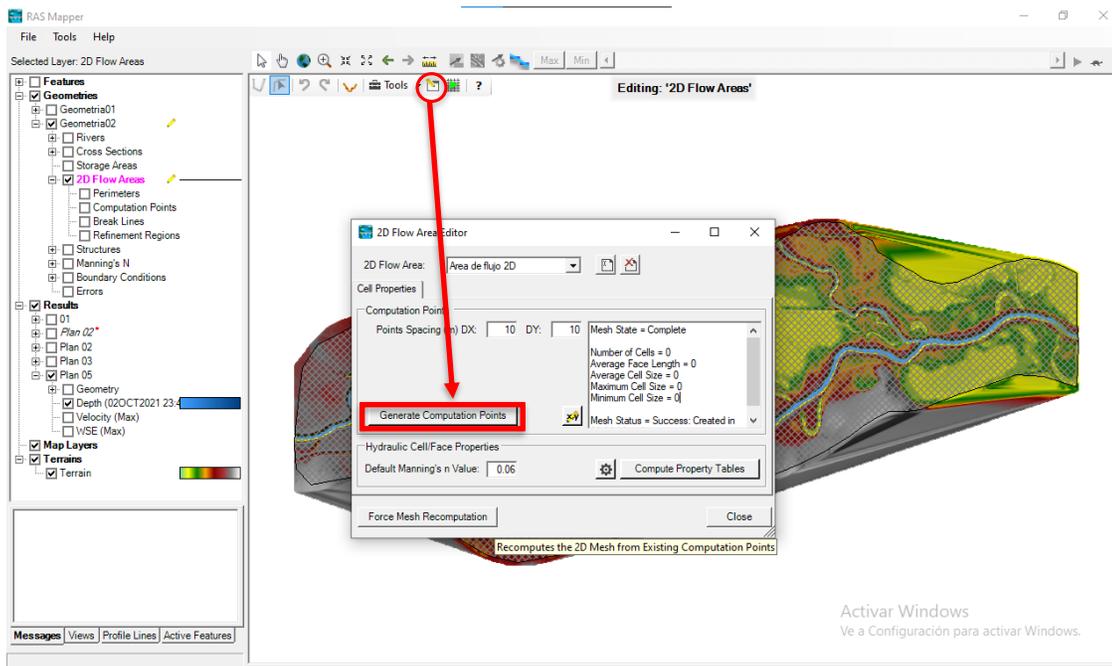


Figura 91. Corrección error de mallado, fuente: Autores

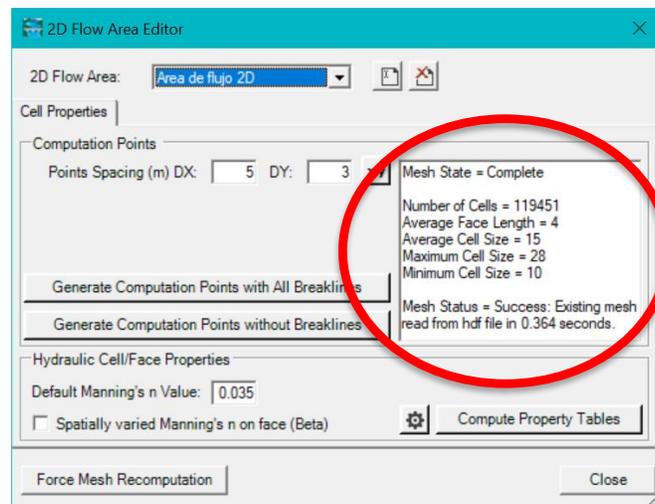


Figura 92. Mallado corregido, fuente: Autores

Incorporación de los datos del flujo no estacionario.

Por medio de la interfaz del HEC RAS se establecen los caudales o flujos para cada una de las líneas de contorno previamente dibujadas (aguas arriba y aguas abajo).

Para la incorporación de un flujo al modelo, es necesario conocer la pendiente del cauce, es por esto que desde el programa ArcGIS Desktop se extrae la pendiente promedio, pero dado que la pendiente real no es uniforme, existe un error asociado con estas condiciones de contorno. Por tanto, se procede a medir por medio de las dos últimas secciones transversales en el límite aguas abajo y aguas arriba:

$$\eta = \frac{\text{Desnivel } A - B}{\text{Distancia horizontal entre } A - B}$$

Para la pendiente del canal Chicamocho:

$$\eta = \frac{2484.203 - 2483.116}{4349.95} = 0.00025$$

Para la pendiente del canal Surba:

$$\eta = \frac{2485.793 - 2483.116}{1449.95} = 0.00184$$

Para la pendiente aguas abajo, se realiza un promedio en el último tramo del cauce luego de la confluencia, obteniendo consigo un valor de 0.0028 que se les asigna a las dos áreas de flujo aguas abajo:

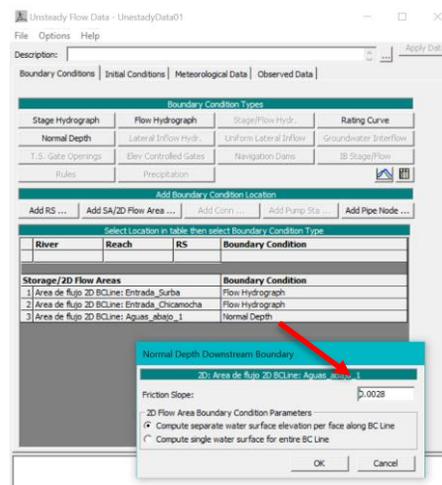


Figura 93. Asignación de pendientes para el cauce (salida), fuente: Autores

Luego de asignar las pendientes aguas abajo, se procede a asignar los respectivos caudales y las respectivas pendientes aguas arriba (entrada de los cauces), para esto y debido a que se van a emplear caudales estacionarios que son el producto de la programación estadística en la interfaz gráfica, se les asigna a todos los periodos de tiempo el mismo caudal, sin embargo, para el caso del presente proyecto, se evidenció que el tramo del río Chicamocha es más largo y por tanto este tarda más que el río Surba en llegar desde el punto de partida hasta la confluencia, es así que los valores iniciales de caudal establecidos para el río Surba son de $0 \text{ m}^3/\text{s}$ en el tiempo 24:00 p.m. del 31 de Septiembre del 2021 y se estableció que desde el tiempo 05:45 a.m. del 2 de octubre del 2021 (fechas propuestas para el presente proyecto) se inicia el corrido del modelo con un caudal de prueba de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (el mismo caudal constante de prueba que el del río Chicamocha):

The screenshot displays the 'Unsteady Flow Data - UnestadyData01' software interface. The 'Boundary Condition Types' section includes options like 'Stage Hydrograph', 'Flow Hydrograph', 'Stage/Flow Hydr.', and 'Rating Curve'. The 'Storage/2D Flow Areas' table is as follows:

Storage/2D Flow Areas	Boundary Condition
1 Area de flujo 2D BCLine: Entrada_Surba	Flow Hydrograph
2 Area de flujo 2D BCLine: Entrada_Chicamocha	Flow Hydrograph
3 Area de flujo 2D BCLine: Aguas_abajo_1	Normal Depth

The 'Hydrograph Data' table is as follows:

No.	Ordinates	Interpolate Missing Values	Del Row	Ins Row	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m³/s)
1					30sept2021 2400	00:00	0.5
2					01oct2021 0100	01:00	0.5
3					01oct2021 0200	02:00	0.5
4					01oct2021 0300	03:00	0.5
5					01oct2021 0400	04:00	0.5
6					01oct2021 0500	05:00	0.5
7					01oct2021 0600	06:00	0.5
8					01oct2021 0700	07:00	0.5
9					01oct2021 0800	08:00	0.5
10					01oct2021 0900	09:00	0.5
11					01oct2021 1000	10:00	0.5
12					01oct2021 1100	11:00	0.5
13					01oct2021 1200	12:00	0.5
14					01oct2021 1300	13:00	0.5
15					01oct2021 1400	14:00	0.5

The 'Min Flow' field is set to 0.008.

Figura 94. Asignación de caudales y pendiente del río Chicamocha, fuente: Autores

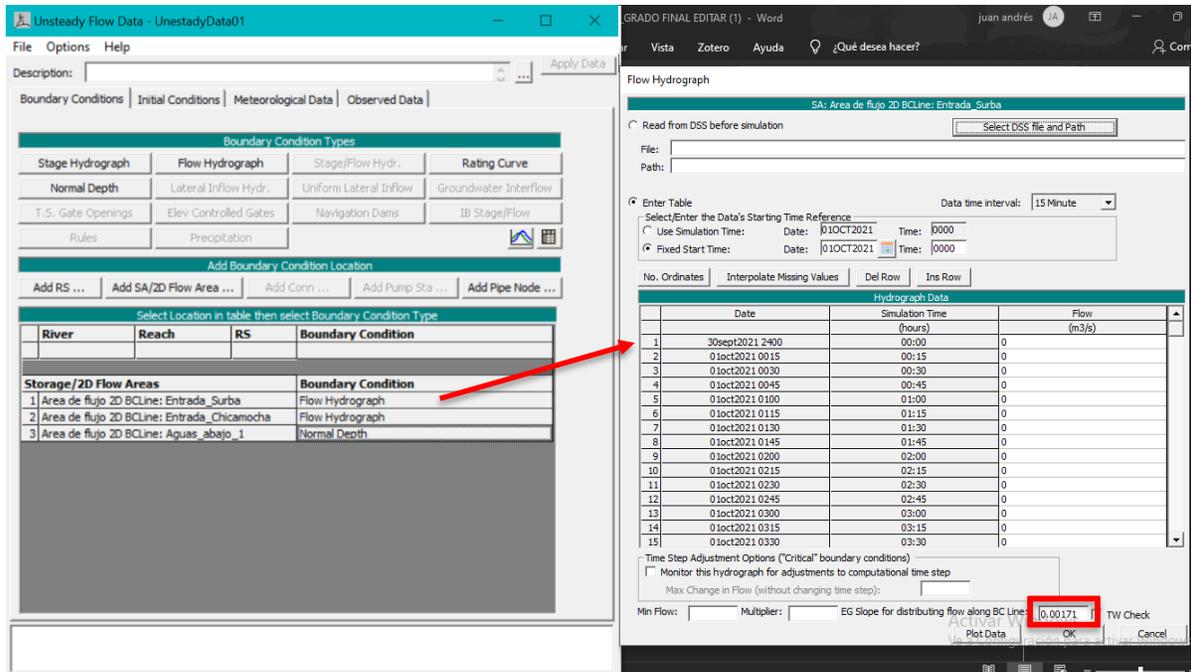


Figura 95. Asignación de caudales y pendiente del río Surba, fuente: Autores

Selección y configuración de los resultados a generar.

Dentro de la interfaz para correr el flujo establecido, se ejecuta la herramienta “Unsteady Flow Analysis” en donde se configuran los valores de tiempo para el inicio y el final de la computación (los valores configurados deben coincidir con los indicados en la etapa de asignación de condiciones de contorno). Así mismo, se configuran los intervalos respectivos a los cuales el programa realizará la modelación y dentro de la herramienta se activa el postproceso de geometría, la simulación y el mapeo de inundación:

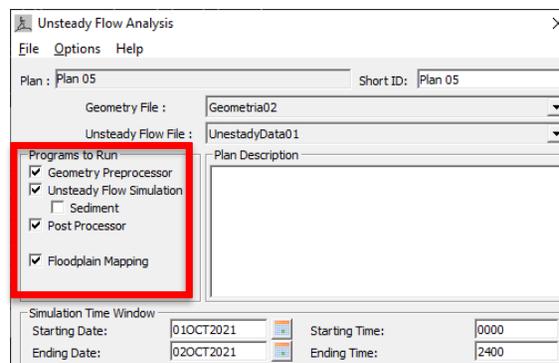


Figura 96. Programas a modelar, fuente: Autores

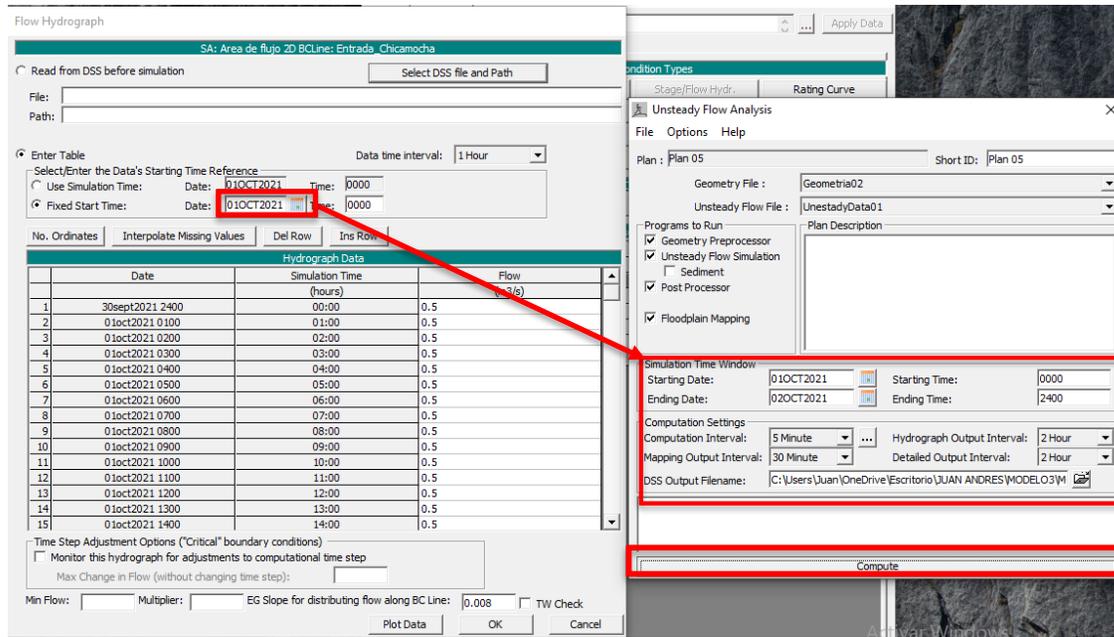


Figura 97. Configuración de valores para ejecutar el modelo, fuente: Autores

Computación.

Luego de configurar que resultados va a generar la modelación se le da en computar y dependiendo del procesador del computador y la velocidad de este, el tiempo de modelado puede demorar más tiempo o menos tiempo, para el caso del proyecto con un computador de procesador “AMD Ryzen 7 3750H with Radeon Vega Mobile Gfx” de 4 núcleos y 8GB de memoria RAM el tiempo de modelado fue de aproximadamente 7 a 9 horas continuas.

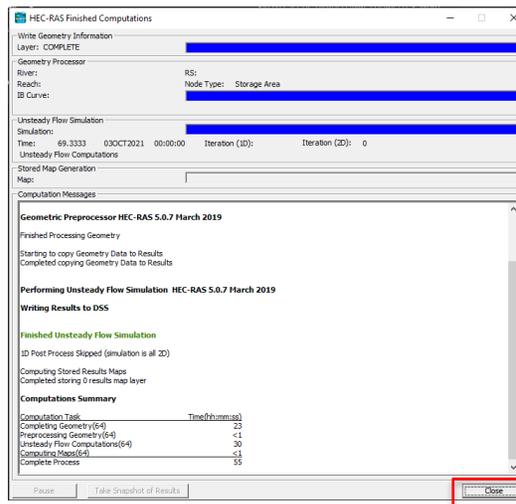


Figura 98. Computación completa, fuente: Autores

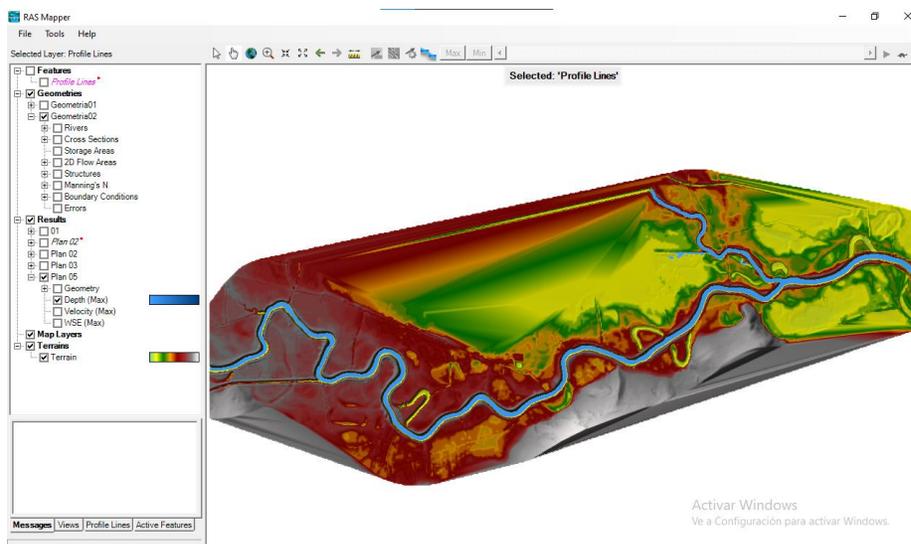


Figura 99. Modelo en condiciones máximas con caudal $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$, fuente: Autores

Una vez realizada la computación y evidenciar que el modelo corre correctamente, se procede a incorporar al modelo los polígonos de Manning respectivos de la zona de estudio:

Determinación del coeficiente de rugosidad de Manning respectivo de las zonas.

Una vez comprobado que el modelo corre y es estable, se procede a establecer los coeficientes de Manning o rugosidad respectivos del terreno, para esto se empleó el programa ArcGIS, dentro del cual se trabajó tanto con imágenes satelitales, el ráster creado y el mallado establecido, sin embargo, cabe resaltar para el proyecto la importancia de identificar estos coeficientes:

La determinación de coeficiente de Manning permite dar un primer vistazo del comportamiento el modelo según los diferentes lechos del cauce, estos coeficientes brindan la posibilidad de realizar los procesos adecuados teniendo en cuenta los tipos de usos de suelos y las características morfológicas de estos. así mismo, para tener un modelo calibrado que brinde información similar a las condiciones reales de la zona de estudio es necesario analizar dicha variable en campo que permite conocer la resistencia de un flujo de un canal por medio del cálculo de la velocidad y calado de la lámina de agua.

La variable de coeficiente de rugosidad de Manning pretende determinar con base a la información secundaria, las coberturas de los materiales y rugosidades de lecho de los cauces

(misma que fue hallada mediante métodos estadísticos e información bibliográfica) brindando información verídica de los resultados asociados al modelo hidrodinámico.

Para la determinación del coeficiente de rugosidad de Manning se realizó una clasificación en función de una imagen satelital de la zona del año 2021. Posteriormente, se reclasificaron estos valores de acuerdo a coeficientes teóricos recopilados del manual de HEC - RAS:

Tabla 6

Valores recomendados para cauces naturales según tablas de ayuda del programa HEC – RAS

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
A.1.1 Cursos en planicies			
- Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0,025	0,030	0,033
- Rectos con algunas piedras y pastos	0,030	0,035	0,040
- Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0,033	0,040	0,045
- Meandros con algunas piedras y pastos	0,035	0,045	0,050
- Meandros con muchas piedras	0,045	0,050	0,060
- Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0,050	0,070	0,080
- Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0,075	0,100	0,150
A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida			
- Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0,030	0,040	0,050
- Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0,040	0,050	0,070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos			
- Pasto corto	0,025	0,030	0,035
- Pasto alto	0,030	0,035	0,050
A.2.2 Zonas cultivadas			
- Sin cultivo	0,020	0,030	0,030
- Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0,025	0,035	0,045
- Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0,030	0,040	0,050
A.2.3 Zonas arbustivas			
- Escasos arbustos y pasto abundante	0,035	0,050	0,070
- Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0,035	0,050	0,060
- Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0,040	0,060	0,080
- Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0,045	0,070	0,110
- Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0,070	0,100	0,160
A.2.4 Zonas arbóreas			
- Sauces densos, temporada invernal	0,110	0,150	0,200
- Terreno claro con ramas sin brotes	0,030	0,040	0,050
- Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0,050	0,060	0,080
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0,080	0,100	0,120
- Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0,100	0,120	0,160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m)			
En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor,			
- Sección regular sin rocas ni arbustos	0,025		0,060
- Sección irregular y rugosa	0,035		0,100

Fuente: Manual HEC - RAS

Aunado a la tabla 6, se determinó el intervalo de los coeficientes respectivos según lo reportado en el Plan de Ordenamiento del Recurso Hídrico de la Cuenca Alta y Media del Río Chicamocha y para mejora y estructuración del criterio que permitió determinar los coeficientes

de rugosidad de Manning respectivos que serán empleados, se analizó la información plasmada en la “Guía Para La Selección Del Coeficiente De Rugosidad De Manning Para Canales Naturales Y Planicies De Inundación” (Arcement, G. & Schneider, V, 1989). Así mismo, se tuvo en cuenta lo conversado con los profesionales que habían realizado estudios previos en esta zona, determinando entonces que los coeficientes de rugosidad de Manning respectivos de la zona de estudios están entre 0.03 y 0.07, a lo cual, según las imágenes satelitales del terreno, se logró establecer los siguientes:

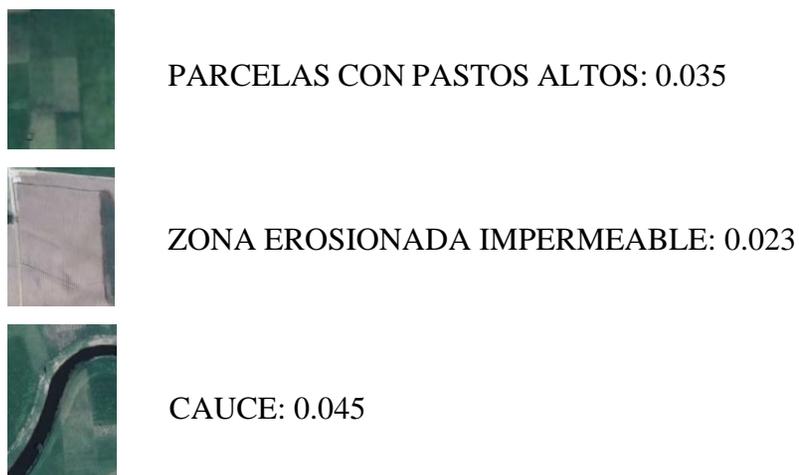


Figura 100. Coeficientes de rugosidad de Manning empleados en el modelo hidrodinámico bidimensional, fuente: Autores

Una vez comprendido la importancia de los coeficientes de rugosidad de Manning y determinar cuáles serán los que se incorporarán al modelo, se procede a elaborar los polígonos con estos valores de coeficientes empleando el programa ArcGIS.

Aplicación dentro del modelo del coeficiente de rugosidad de manning determinado.

Dentro del programa de ArcGIS y guiándonos del ráster utilizado, elaboramos los polígonos a los cuales se les definirá su respectivo coeficiente de rugosidad de Manning:

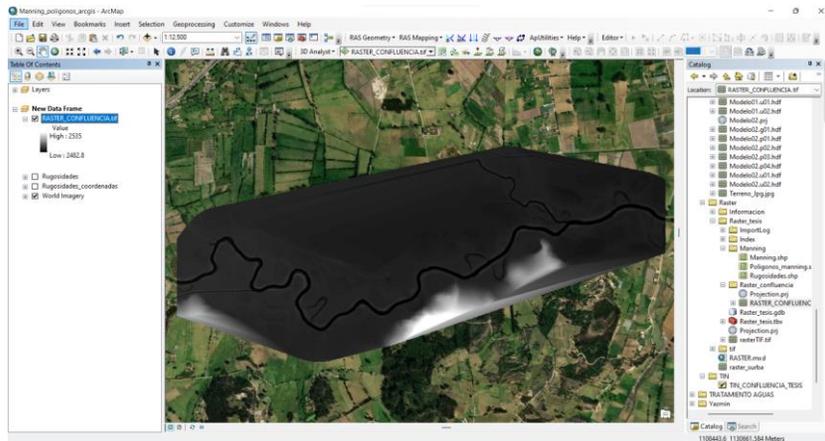


Figura 101. Ráster e imagen satelital en el programa ArcGIS, fuente: Autores

Luego de tener el ráster y la imagen satelital, se procede a realizar los Shapefile donde estará la información contenida de los coeficientes de Manning respectivos de cada polígono:

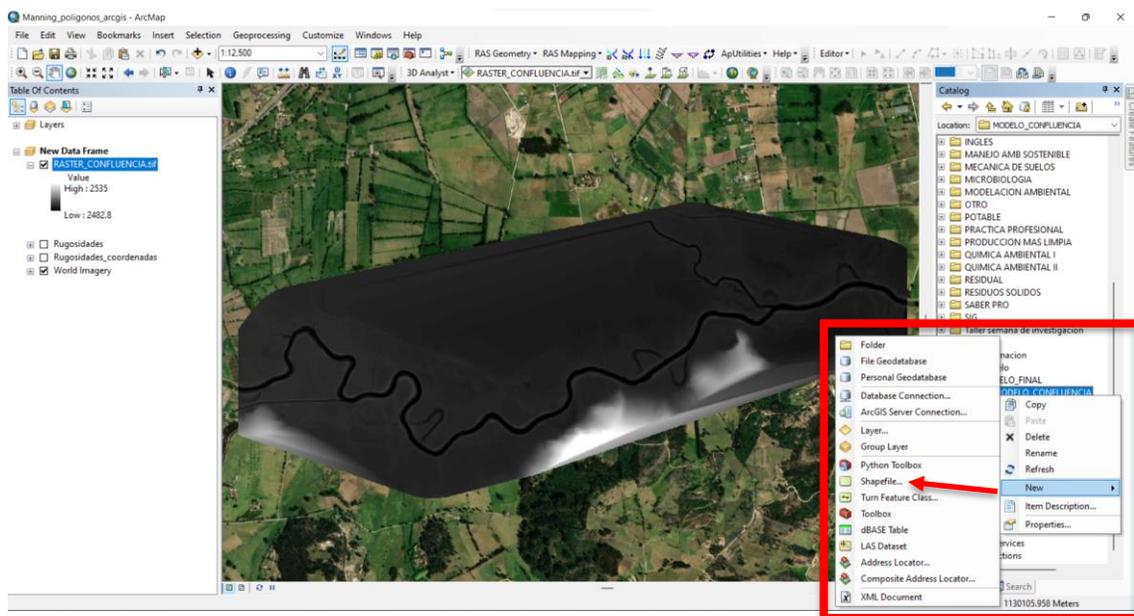


Figura 102. Ruta para la creación del shapefile para designar el coeficiente de Manning, fuente: Autores

Para la creación del shapefile se le asigna a este un nombre y el tipo de rasgo, a lo cual para el proyecto se definió que será tipo polígono:

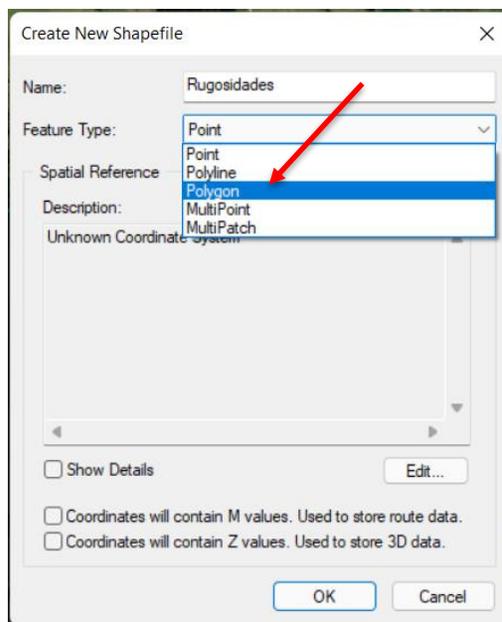


Figura 103. Creación de nuevo shapefile, fuente: Autores

Luego de esto, es importante asignar las mismas coordenadas con las que se está trabajando, debido a que, sin esto, al momento de cargarlo al RAS Mapper aparecerá en otro sitio del mapa:

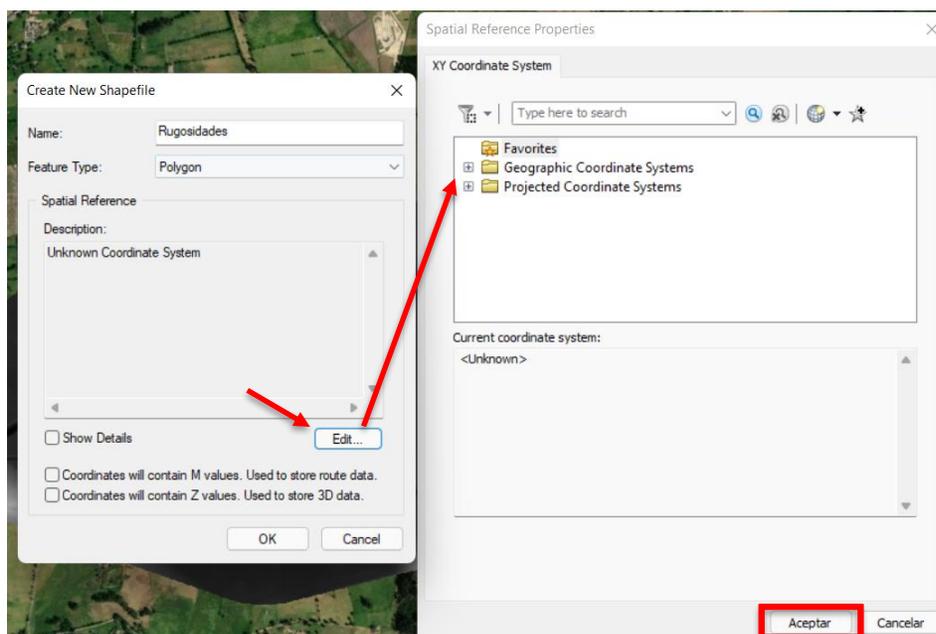


Figura 104. Designación de coordenadas, fuente: Autores

Continuando, una vez designadas las coordenadas, se procede a realizar el respectivo trazado del polígono por medio de la herramienta “start editing”:

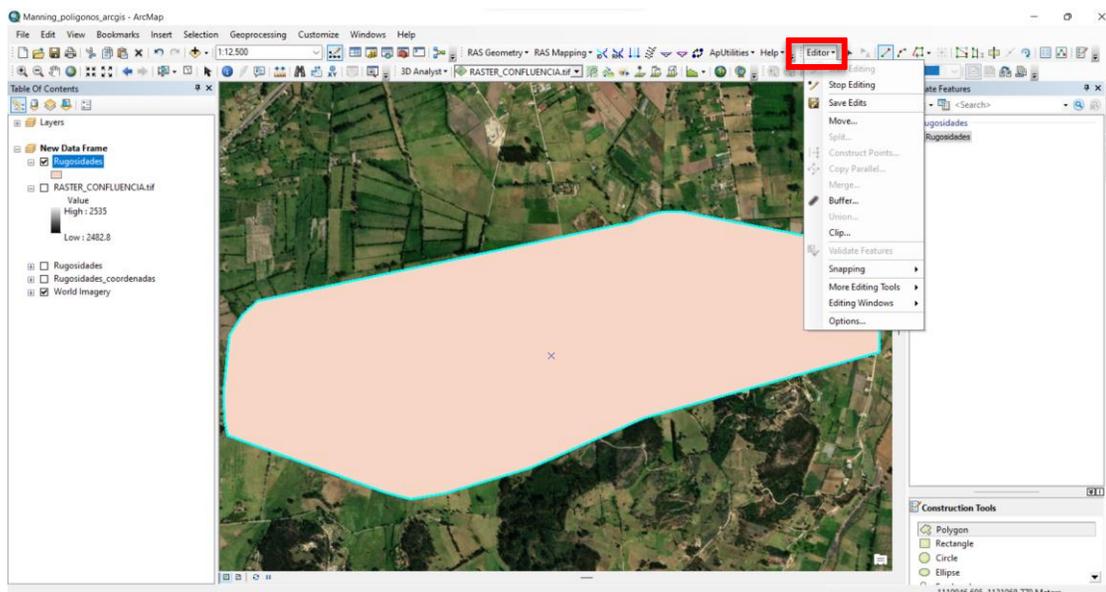


Figura 105. Trazado del polígono para el shapefile con los coeficientes de Manning, fuente: Autores

Una vez creado el polígono, se procede a recortarlo por las respectivas secciones según el tipo de uso de suelo presente en la zona, para esto se empleó la herramienta de “cut polygons tool”:

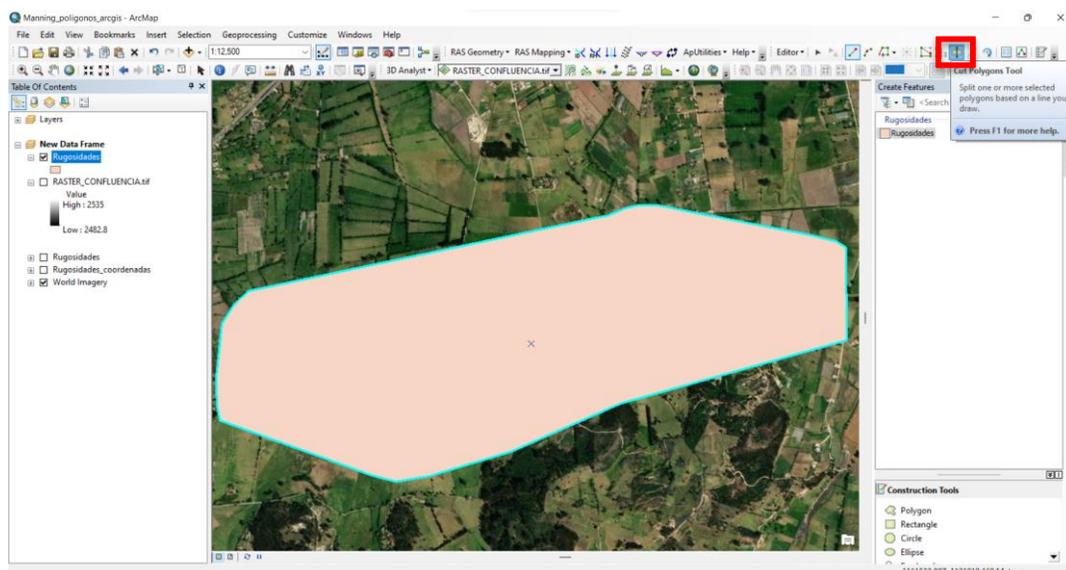


Figura 106. Herramienta para recortar el polígono según uso de suelos de la zona de estudio, fuente: Autores

Una vez recortado el polígono según el tipo de uso de suelos presente en la zona de estudio, visualizamos el resultado y paramos la edición:

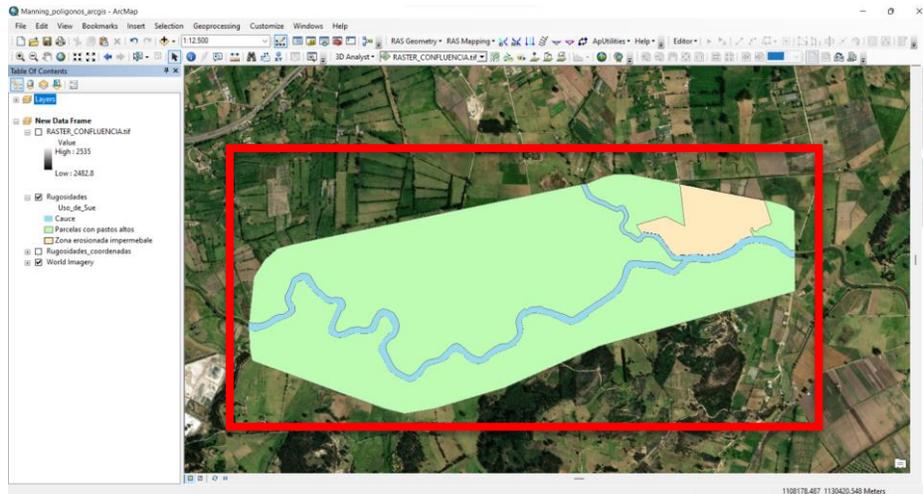


Figura 107. Polígonos según el tipo de uso de suelo presente en la zona de estudio, fuente: Autores

Luego de recortar los polígonos, es necesario asignar a estos los respectivos valores de Manning, por tanto, se abre la tabla de atributos del shapefile creado y se procede a editar tanto la designación del tipo de uso de suelo, como su respectivo valor de coeficiente de rugosidad, para el cual se estimó según la bibliografía presente dentro de los estudios realizados al río Chicamocha, coeficientes literarios de estos tipos de cauces encontrados en diversas revisiones bibliográficas y conversaciones con profesionales dotados de conocimiento sobre esta zona:

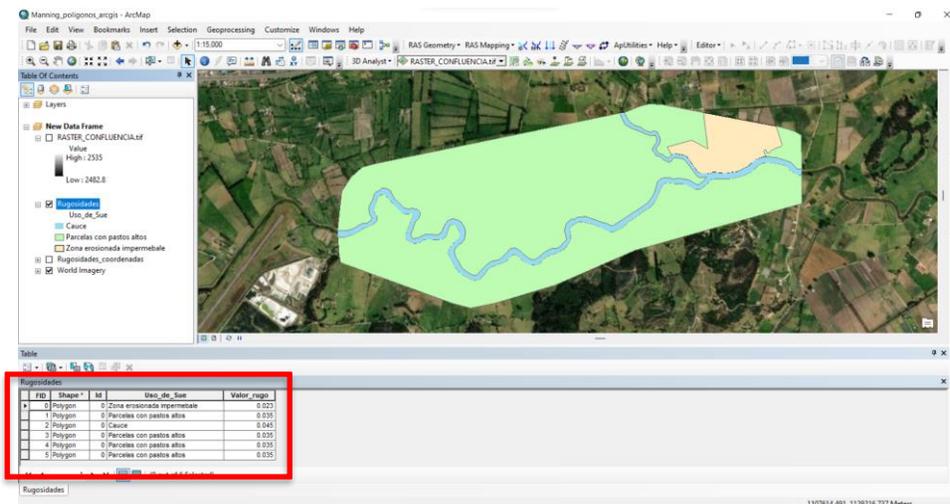


Figura 108. Introducción de valores de coeficiente de Manning, fuente: Autores

Luego de creado el shapefile con sus respectivos polígonos de Manning, se prosigue a exportar la capa en formato “.shp” el cual será importado en el programa de RAS Mapper:

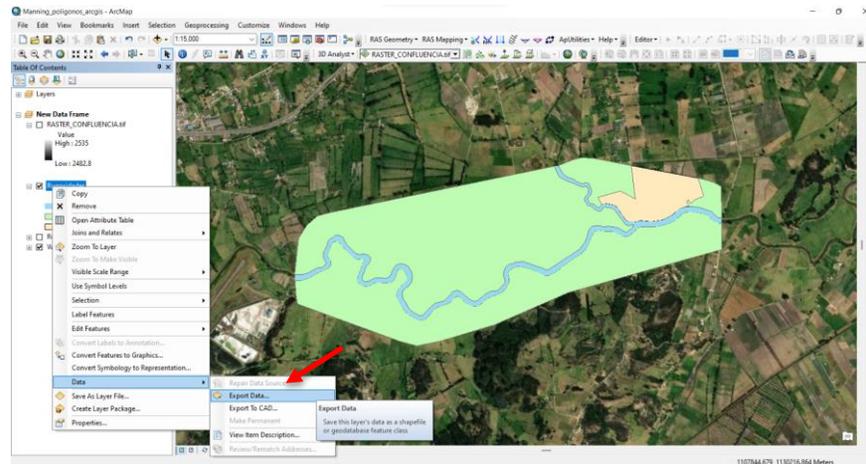


Figura 109. Exportar datos del shapefile con los polígonos de Manning en formato “.shp”, fuente: Autores

Dentro del programa de RAS Mapper, se selecciona la herramienta de “Tools” seguido de la opción de “New Land Cover”:

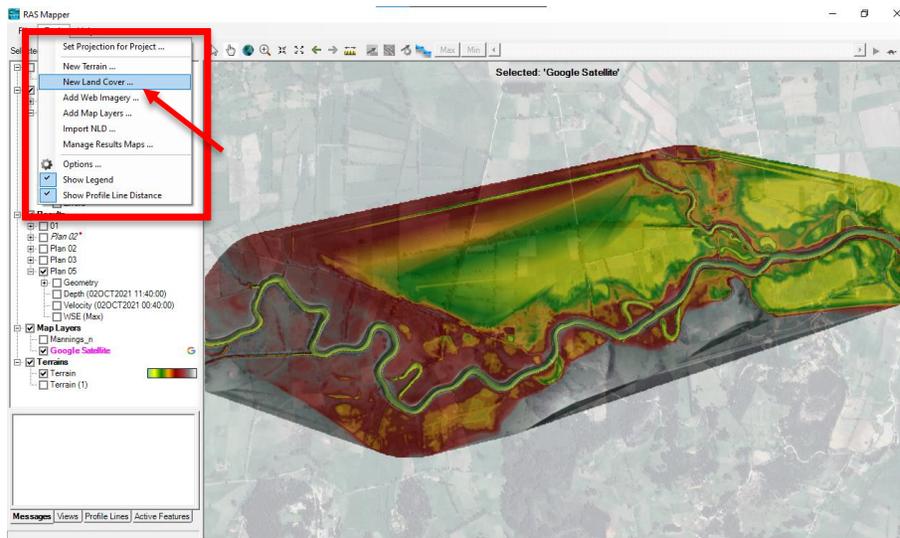


Figura 110. Importar cobertura de coeficiente de Manning en RAS Mapper, fuente: Autores

Seguido de esto, se despliega una pestaña que permite ubicar dentro de los archivos, el shapefile anteriormente guardado y subir dicha capa con los coeficientes de Manning:

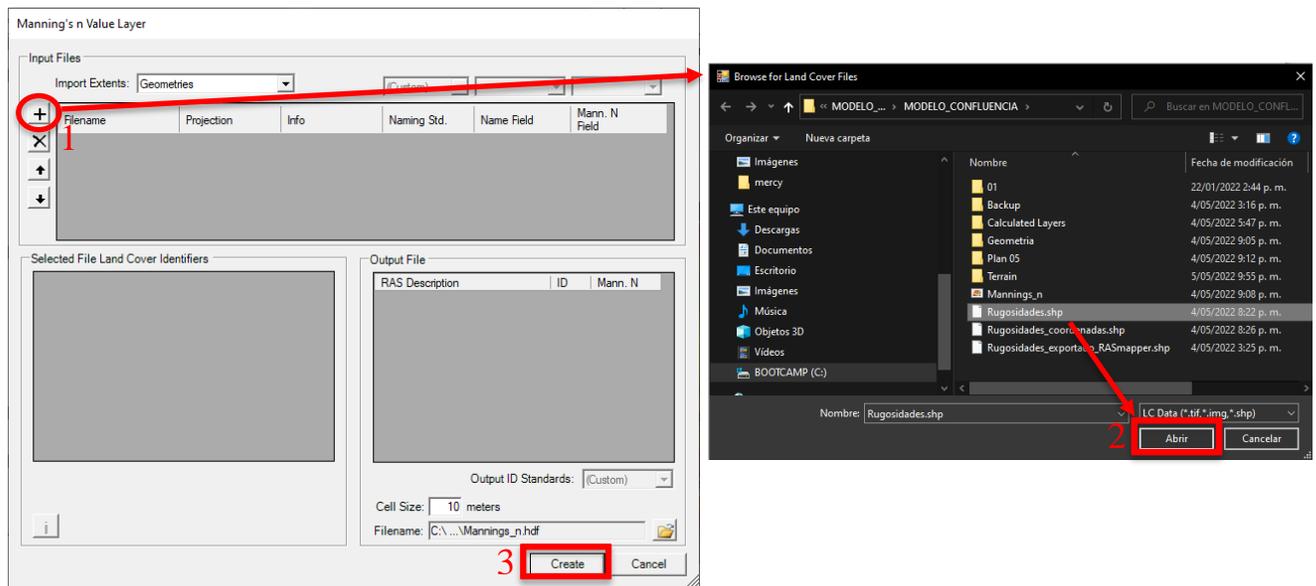


Figura 111. Importar polígonos de Manning en formato shapefile al RAS Mapper, fuente: Autores

Luego de esto, se asignan los respectivos valores de manning a los polígonos que serán importados dentro del RAS Mapper:

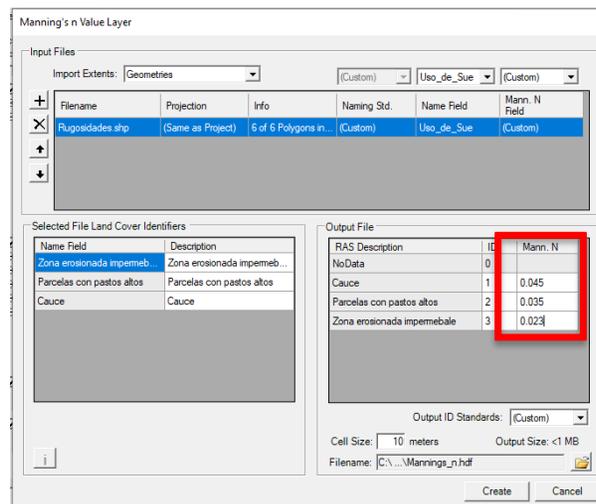


Figura 112. Asignación de los valores de Manning para los polígonos en el programa RAS Mapper, fuente: Autores

Una vez seleccionado el archivo, se presiona en "Create" y se empezara a ejecutar una pestaña de carga, que indica la importación al RAS Mapper del shape, terminado eso, se cierra la pestaña de subida del archivo y se visualiza dentro del modelo los polígonos con el coeficiente de Manning:

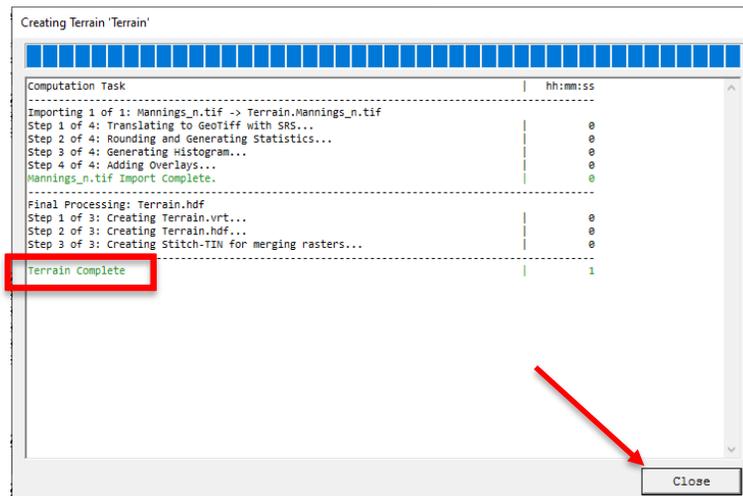


Figura 113. Proceso de creación e importación del terreno con los polígonos de coeficiente de Manning, fuente: Autores

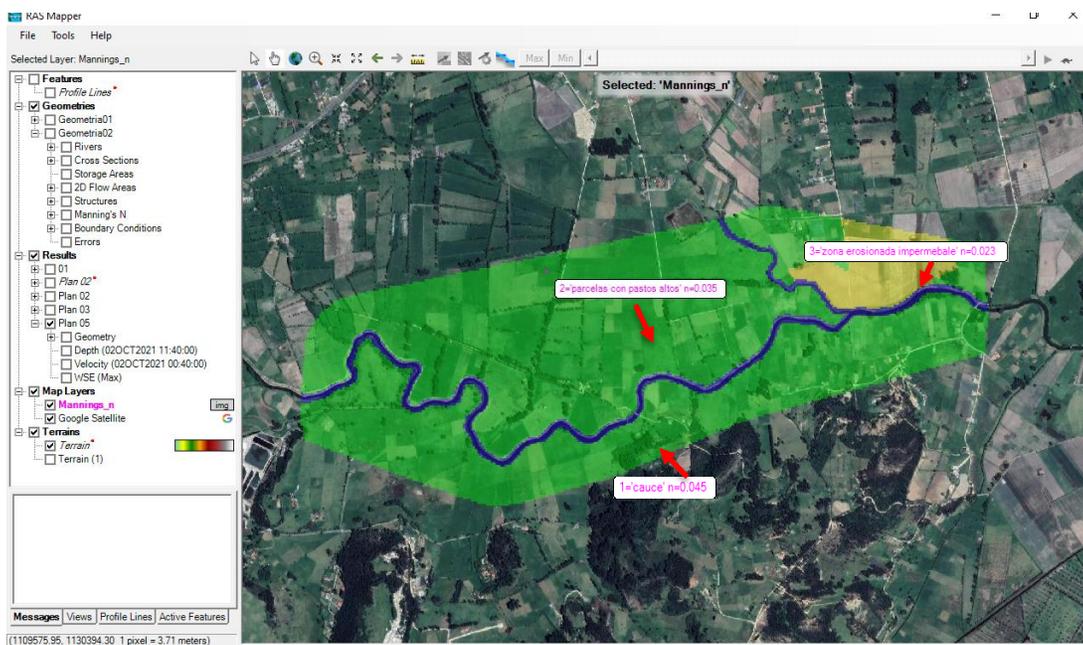


Figura 114. Polígonos con coeficiente de Manning en el programa RAS Mapper, fuente: Autores

Una vez subidos los valores de los coeficientes de rugosidad, se guarda el proyecto y se cierra la pestaña del RAS Mapper. por consiguiente, por medio de la pestaña de “Geometric data” se revisan si los polígonos fueron cargados con sus respectivos valores de coeficientes:

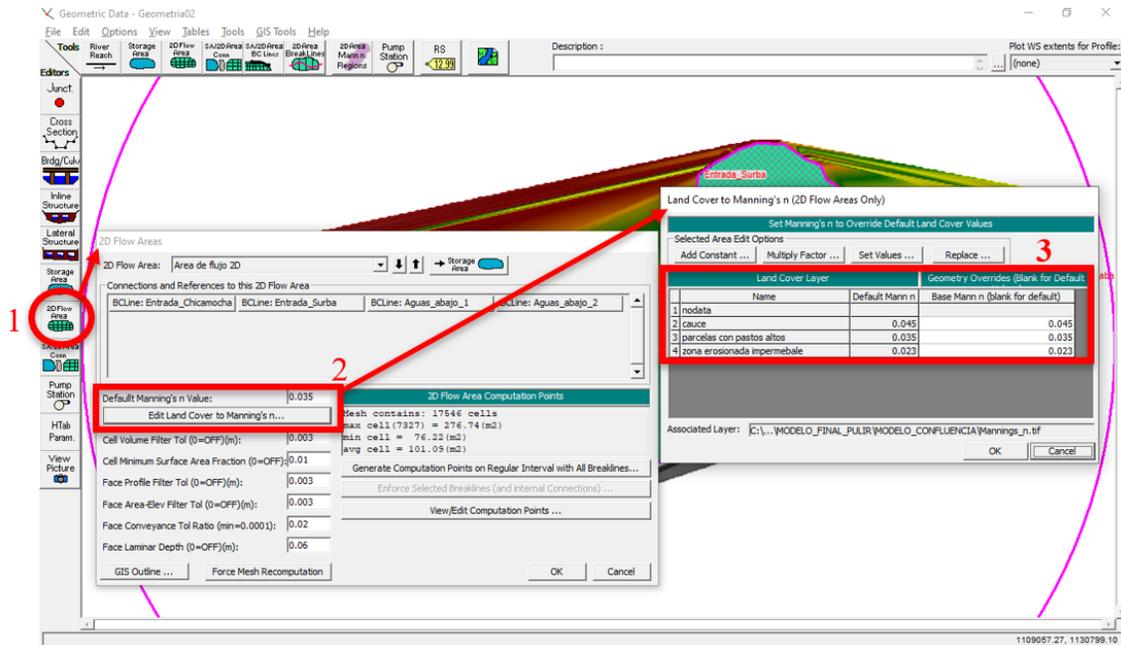


Figura 115. Verificación de la importación de los polígonos de coeficiente de Manning al modelo, fuente: Autores

Finalmente, se lleva a cabo la verificación en materia de la importación de los polígonos con el coeficiente de Manning y la modelación del caudal como de la velocidad.

Una vez se tenga el modelo estable y todas las variables importadas en este, se procede a realizar el procesamiento con los caudales de los diferentes periodos de retorno obtenidos por la interfaz gráfica, introduciendo los valores de caudal uno a uno siguiendo las recomendaciones antes mencionadas en el caudal de ejemplo:

Estación Limnimétrica La Siberia - Río Chicamocha	Estación Limnimétrica La Trinidad - Río Surba
$T_5 = 34.290 \text{ m}^3/\text{s}$	$T_5 = 6.437 \text{ m}^3/\text{s}$
$T_{10} = 40.241 \text{ m}^3/\text{s}$	$T_{10} = 7.619 \text{ m}^3/\text{s}$
$T_{25} = 46.947 \text{ m}^3/\text{s}$	$T_{25} = 9.120 \text{ m}^3/\text{s}$
$T_{50} = 51.480 \text{ m}^3/\text{s}$	$T_{50} = 10.243 \text{ m}^3/\text{s}$
$T_{100} = 55.694 \text{ m}^3/\text{s}$	$T_{100} = 11.371 \text{ m}^3/\text{s}$

Figura 116. Caudales en los dos cauces para los diferentes periodos de retorno, fuente: Autores

Simulación para los Diferentes Eventos Extremos de Caudal

Finalmente, el último paso consistió en simular los diferentes eventos extremos de caudal empleando la topología previamente calculada junto con los caudales hallados en el cálculo de los caudales y se elaboraron las respectivas simulaciones de manera sucesiva para establecer las posibles huellas de inundación que existan en el área de influencia. Posteriormente, se exportaron a un sistema de información geográfico (SIG) para poder georreferenciar y sacar conclusiones con base en este, luego se procede a juntar todos los datos obtenidos para incorporar al modelo elaborado y analizar los diferentes escenarios que se presentan para cada periodo de retorno:

Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 5 años

Luego de realizar el procesamiento de los datos limnimétricos reportados por las estaciones la Siberia y la Trinidad en la interfaz gráfica, se determinó que el caudal máximo apropiado para el periodo de retorno de 5 años fue de:

- ✓ Estación la Siberia – Río Chicamocha: $34.29 \text{ m}^3/\text{s}$
- ✓ Estación la Trinidad – Río Surba: $6.43 \text{ m}^3/\text{s}$

Una vez determinados los caudales, se procede a introducir estos valores en el modelo, resultando lo siguiente:



Figura 117. Modelado para el calado máximo de agua en un periodo de retorno de 5 años,

fuelle: Autores

Así mismo, en la figura anterior, se observan que las zonas de inundación son a causa de depresiones en el terreno. por tanto, se deben tener en cuenta al momento de construir o llevar a cabo algún tipo de actividad en dichas zonas.

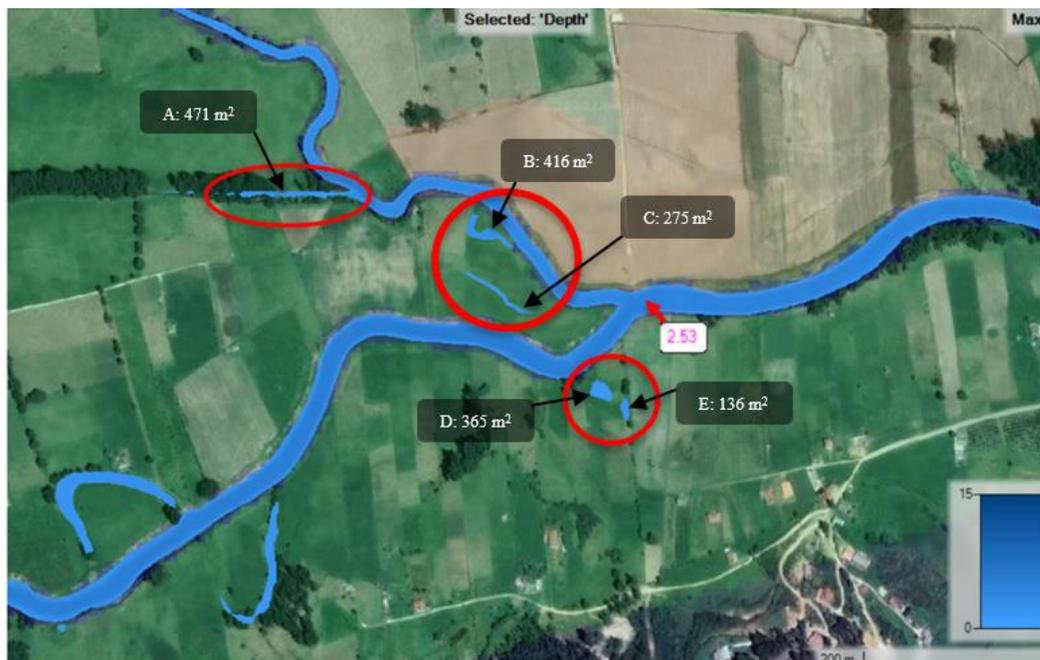


Figura 118. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 5 años (calado máximo aproximado 2.53 metros), fuente: Autores

El calado máximo reportado para un periodo de retorno de 5 años en la confluencia entre los dos cauces es de 2.53 metros aproximadamente, por tanto se logró observar en la figura 118 que a esta altura se alcanzan a observar rebosamientos del río que dan paso a la formación de unas pequeñas pero importantes zonas de inundación las cuales al observar la figura se logra determinar que las vías de evacuación de estas aguas están algo retiradas de los cauces, por tanto pueden demorar más en filtrarse bajo el suelo y desaparecer, así mismo en la figura 118 se puede observar la formación de 7 huellas de inundación, las cuales tiene dimensiones de entre 136 m² hasta 471 m².



Figura 119. Dirección del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba en un periodo de retorno de 5 años, fuente: Autores

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

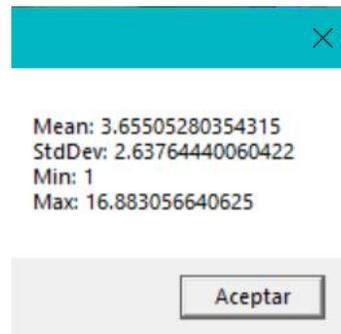


Figura 120. Datos estadísticos de profundidad o calado en metros para los dos tramos modelados en un periodo de retorno de 5 años, fuente: Autores

En calados medios de 3,655 reportados de la figura 120 se puede ocasionar en algunas zonas desbordamientos producto de algunas depresiones del suelo, sin embargo, si bien se alcanza a desbordar el río en algunas partes, no representa un peligro potencial a la comunidad las alturas de las huellas de inundación, más si es importante tener en cuenta que la composición del terreno cambia al estar saturada de agua y el comportamiento de este igual. Por tanto, se debe tener en cuenta al momento de llevar a cabo algún tipo de actividad aledaña a los dos cauces estas apreciaciones que pueden generar pérdidas económicas y sociales.

Aunado al caudal antes modelado, también se determinaron las velocidades para este periodo de retorno, obteniendo:

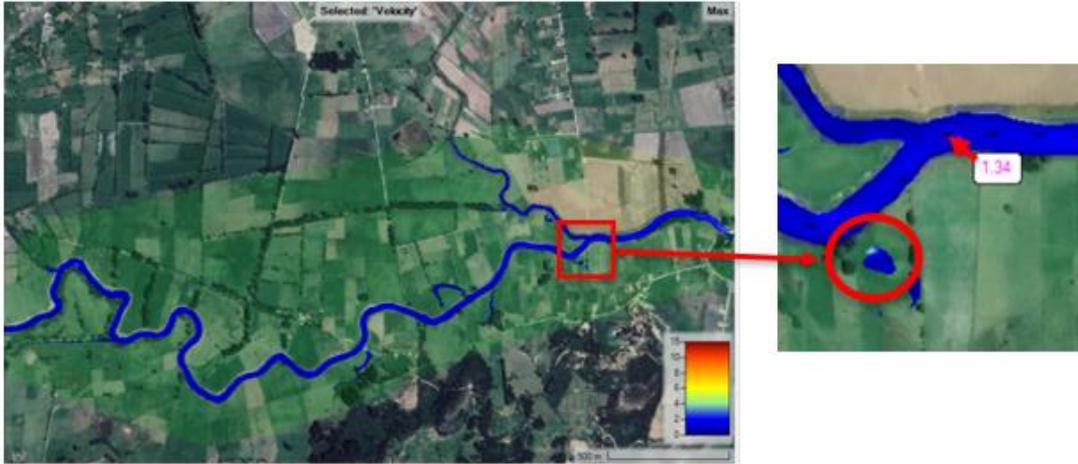


Figura 121. Modelado para la máxima de velocidad en un periodo de retorno de 5 años, fuente: Autores

En la figura 121 si bien, no se presentan altos picos de velocidad, si se pueden evidenciar algunos rápidos en las sinuosidades de los dos cauces y en algunas huellas de inundación, estas zonas identificadas alcanzan velocidad promedio aproximadas de 1.34 m/s. Sin embargo, también se observa en la figura 121 la existencia de una zona de inundación previa a la confluencia donde se evidencia un punto de velocidad entre 4 y 6 m/s, por tanto y teniendo en cuenta estas velocidades, se determina que existe un peligro potencial latente para la población debido a que dentro de las zonas inundadas se pueden ocasionar pérdidas de coberturas vegetales, pérdidas de cultivos, afectaciones directas a las personas y a los asentamientos.

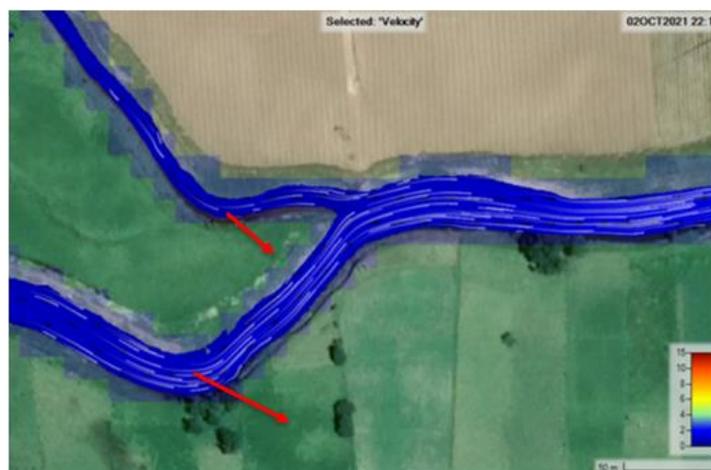


Figura 122. Dirección del flujo de las velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 5 años, fuente: Autores

Debido a que las velocidades promedio para este periodo de retorno no son tan pronunciadas, estos no ocasionarían cambios geomorfológicos tan rápidos en el cauce, sin embargo (las líneas rojas representan la dirección de los cambios geomorfológicos del cauce) se pueden evidenciar a muy largo plazo estos cambios.

Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 10 años

Luego de realizar el mismo procesamiento para los datos limnimétricos reportados por las estaciones La Siberia y La Trinidad en la interfaz gráfica, se determinó que el caudal máximo apropiado para el periodo de retorno de 10 años fue de:

- ✓ Estación La Siberia – Río Chicamocha: 40.24 m³/s
- ✓ Estación La Trinidad – Río Surba: 7.61 m³/s

Una vez determinados los caudales, se procede a introducir estos valores en el modelo, resultando lo siguiente:



Figura 123. Modelado e identificación de zonas inundables en el calado máximo de agua en para un periodo de retorno de 10 años, fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 123, existen algunas huellas de inundación que son al igual que en la modelación para un periodo de retorno de 5 años producto de antiguas sinuosidades del río, las cuales fueron selladas con el paso del tiempo, mas, sin embargo, aun la topografía del terreno sigue siendo propensa a estas inundaciones. Así mismo, debido a que el caudal sobrepasa la ronda hídrica del cauce, este se desborda originando unas pequeñas huellas de inundación y los calados máximos reportados son de aproximadamente 2.62 metros.

En la figura 123 también se logra observar que en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba, existe con un periodo de retorno de 10 años, un peligro no muy alto por desbordamiento, sin embargo, el calado arrojado puede representar una alerta en otras secciones del cauce donde si logra desbordarse considerablemente.

Mediante la herramienta RAS Mapper también es posible conocer las direcciones en las cuales se mueve el flujo, así como el comportamiento del flujo en los diferentes tramos del cauce:



Figura 124. Dirección del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 10 años, fuente: Autores

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de calado, así como el máximo y mínimo:

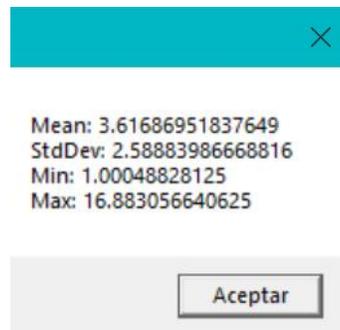


Figura 125. Datos estadísticos de profundidad o calado en metros en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 10 años, fuente: Autores

En calados medios de 3,61 metros se puede ocasionar algunos desbordamientos producto de algunas depresiones del suelo, sin embargo, si bien se alcanza a desbordar el río en algunas partes, no representa un mayor peligro a la comunidad, ya que las alturas de las huellas de inundación no son muy elevadas, más si es importante tener en cuenta que la composición del terreno cambia al estar saturada de agua y el comportamiento de este igual. Por tanto, se debe tener en cuenta al momento de llevar a cabo algún tipo de actividad aledaña a los dos cauces puesto que estas apreciaciones pueden representar un peligro potencial.

Aunado a los caudales antes modelados, también se pueden determinar las velocidades para este periodo de retorno, obteniendo:

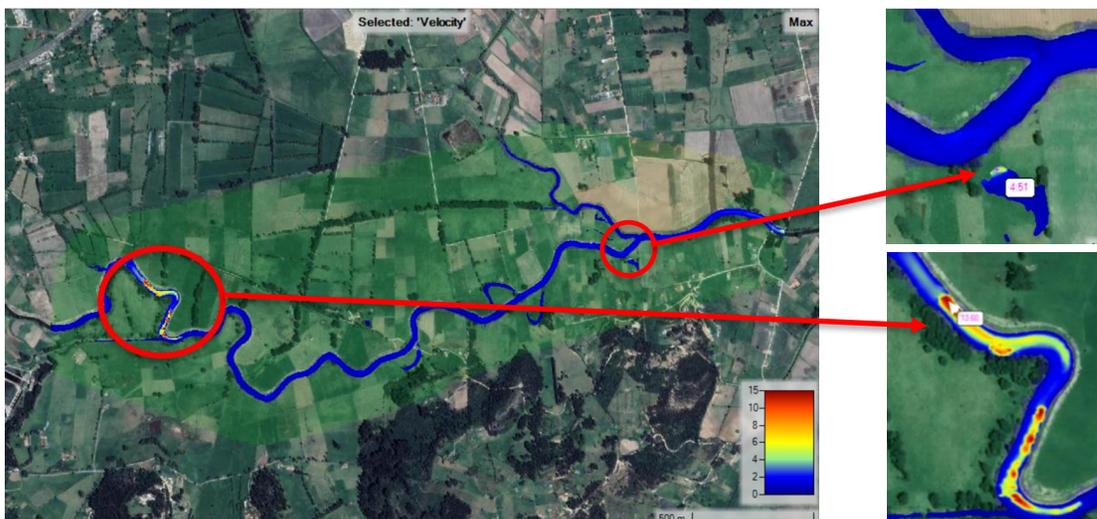


Figura 126. Modelado de la velocidad máxima para un periodo de retorno de 10 años, fuente: Autores

En la figura 126 se presentan altos picos de velocidad en las sinuosidades del río Chicamocha lo cual puede ocasionar cambios en los perfiles del cauce y alerta por transporte de sedimentos con gran volumen. Así mismo, se evidencia una velocidad máxima reportada de 13.60 m/s representando un peligro potencial muy alto para la población y las obras de infraestructura como puentes que planeen construirse e indicando que existe presencia de turbulencias altas, también un factor importante que puede relacionarse con estas velocidades es el cambio morfodinámico a futuro que puede sufrir el cauce conforme el caudal pasa constantemente ya que este puede darse de manera más rápida.

En la figura 126 también se puede observar que las velocidades máximas aproximadas en las huellas de inundación para la confluencia entre el río Chicamocha y Surba en un periodo de retorno de 10 años son de 4.51 m/s, a lo cual también se le pueden asociar pérdidas de coberturas vegetales, perdidas de cultivos y afectaciones directas a las personas.

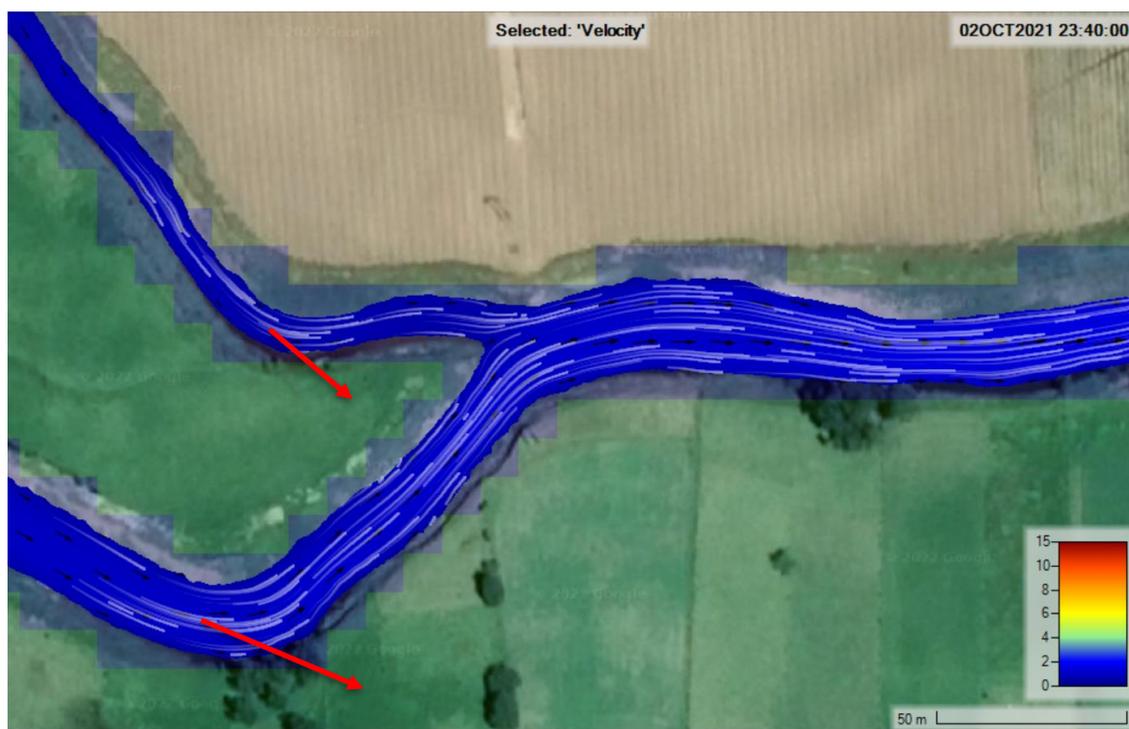


Figura 127. Dirección del flujo de las velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 10 años, fuente: Autores

Debido a que las velocidades promedio para este periodo de retorno no son tan pronunciadas, estos no ocasionarían cambios geomorfológicos tan rápidos en el cauce, sin embargo, se puede observar en la figura 127 que existen algunas zonas donde las velocidades máximas son bastante

pronunciadas a lo cual debido a la mayor turbulencia y mayor transporte de sedimentos se pueden ocasionar cambios en el cauce en dichas zonas (las líneas rojas representan la dirección de los cambios geomorfológicos del cauce).

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

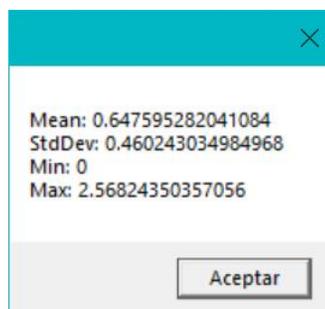


Figura 128. Datos estadísticos de velocidad en m/s para los dos tramos modelados en un periodo de retorno de 10 años, fuente: Autores

En la figura 128 se observa que el promedio de la velocidad para un periodo de retorno de 10 años es de 0.64 m/s que no representa un mayor peligro a la población, sin embargo, se detalló que la velocidad máxima aproximada del agua en el cauce es de 2.57 m/s representando una alerta y peligro potencial directo a las comunidades aledañas.

Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 25 años

Luego de realizar el mismo procesamiento para los datos limnimétricos reportados por las estaciones la Siberia y la Trinidad en la interfaz gráfica, se determinó que el caudal máximo apropiado para el periodo de retorno de 25 años fue de:

- ✓ Estación la Siberia – Río Chicamocha: 46.94 m³/s
- ✓ Estación la Trinidad – Río Surba: 9.12 m³/s

Una vez determinados los caudales, se procede a introducir estos valores en el modelo, resultando lo siguiente:

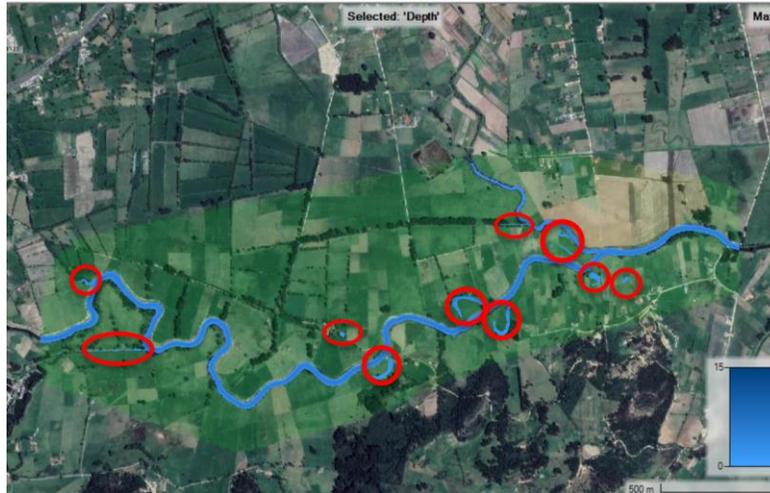


Figura 129. Modelado para el calado máximo de agua en un periodo de retorno de 25 años, fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 129, existen algunas huellas de inundación que son al igual que en la modelación para un periodo de retorno de 10 años producto de antiguas sinuosidades del río, las cuales fueron selladas con el paso del tiempo, mas, sin embargo, aun la topografía del terreno sigue siendo propensa a estas inundaciones. Así mismo, debido a que el caudal sobrepasa la ronda hídrica del cauce, este se desborda originando otras huellas de inundación mucho más pronunciadas y evidentes como se puede observar en la siguiente figura en el caso de la confluencia de los dos cauces:



Figura 130. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 25 años (altura máxima aproximada 2.69 metros de profundidad), fuente: Autores

El calado máximo reportado para un periodo de retorno de 25 años en la confluencia entre los dos cauces es de 2.69 metros aproximadamente, por tanto, se logró observar en la figura 130 que a esta altura se alcanzan a observar rebosamientos del río que dan paso a la formación de unas nuevas considerables huellas de inundación (F, G, H, I), así también, estos rebosamientos ocasionan que el tamaño de previas huellas que se observaron para periodos de retorno menores aumente, siendo un peligro potencial considerablemente crítico para la comunidad, sin embargo en la figura logramos observar un escenario interesante debido a la unión de las huellas D y E vistas en el periodo de retorno de 5 años, aumentando significativamente el tamaño a 1339 m². Aunado a lo anterior, observamos que para este periodo de retorno con caudales de 46.94 m³/s para el río Chicamocha y 9.12 m³/s para el río Surba, se logran formar huellas de inundación de entre 13.4 m² hasta 1339 m².

Continuando con el modelado, activamos la herramienta dentro del RAS Mapper para conocer la dirección y comportamiento del flujo en la confluencia:



Figura 131. Dirección del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 25 años, fuente: Autores

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

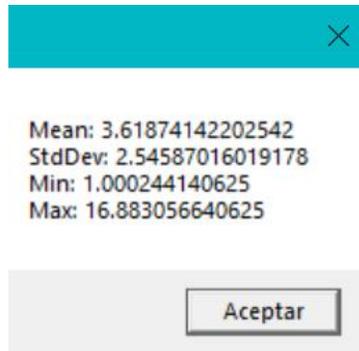


Figura 132. Datos estadísticos de calado o profundidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 25 años, fuente: Autores

En la figura 132 se observa que el promedio de profundidad o calado para un periodo de retorno de 25 años es de 3.618 metros. Por tanto, debido a algunas depresiones del suelo se originan huellas de inundación. Sin embargo, si bien se alcanza a desbordar el río en algunas partes, no representa un mayor peligro a la comunidad las alturas de las huellas de inundación, más si es importante tener en cuenta que la composición del terreno cambia al estar saturada de agua y el comportamiento de este igual. Por tanto, se debe tener en cuenta al momento de llevar a cabo algún tipo de actividad.

Aunado a los caudales antes modelados, también se pueden determinar las velocidades para este periodo de retorno, obteniendo:

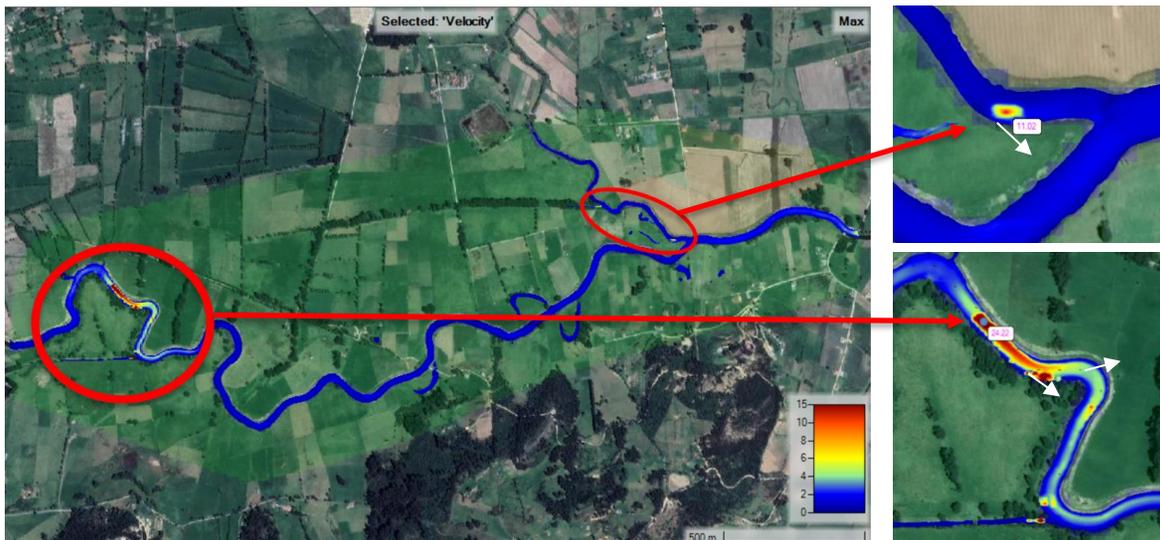


Figura 133. Modelado de las velocidades para un periodo de retorno de 25 años, fuente: Autores

En la figura 133 se presentan altos picos de velocidad en las sinuosidades del río Chicamocha y del Surba, dichas velocidades máximas para un periodo de retorno de 25 años en el río Chicamocha son de aproximadamente 24.22 m/s y para el caso del río Surba son de 11.02 m/s, lo cual representa un alto peligro social, económico y ambiental debido al transporte de sedimentos de gran volumen y turbulencias altas, ya que estas velocidades pueden acabar con cultivos, causar procesos de erosión en el suelo y en estructuras como puentes, daños a las personas y daños críticos a las estructuras.

En la figura anterior, también se muestran unas flechas blancas que representa la dirección de los cambios morfodinámicos a futuro que puede sufrir el cauce conforme el caudal pasa constantemente con estas velocidades.

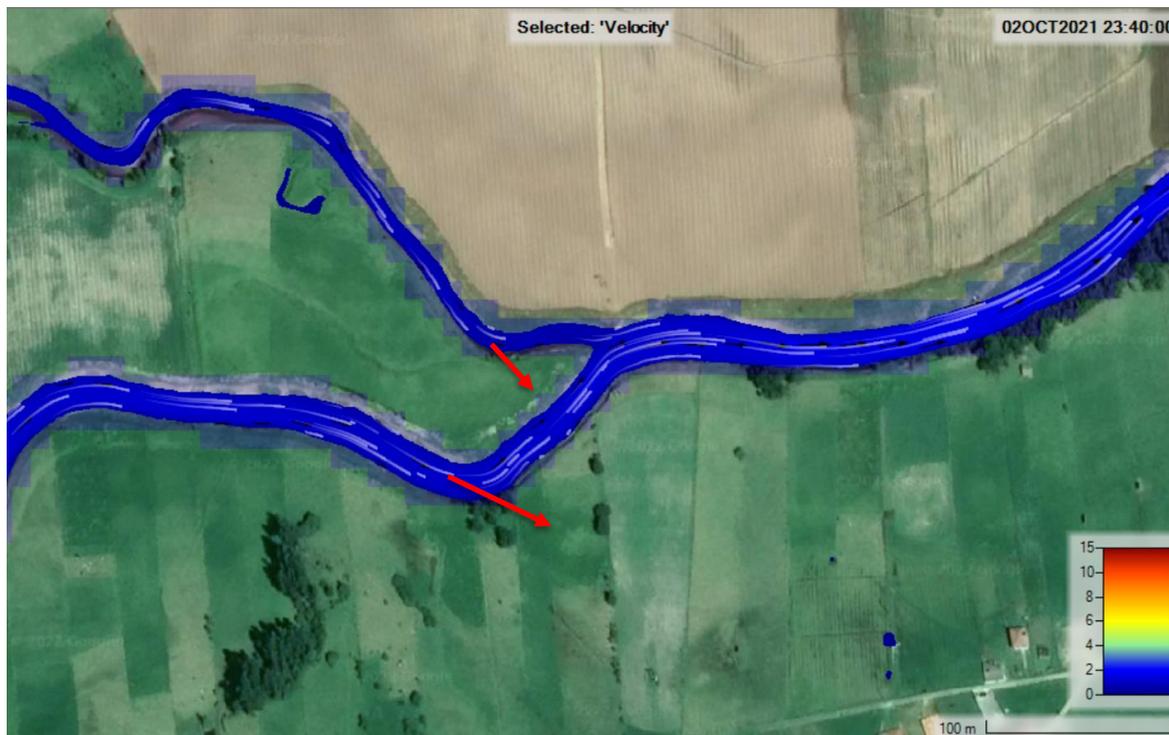


Figura 134. Dirección del flujo con velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 25 años, fuente: Autores

Debido a que las velocidades promedio para este periodo de retorno no son tan pronunciadas, estos no ocasionarían cambios geomorfológicos tan rápidos en el cauce, sin embargo, se puede observar en la figura 133 que existen algunas zonas donde las velocidades máximas son bastante pronunciadas a lo cual debido a la mayor turbulencia y transporte de sedimentos se pueden

ocasionar cambios más rápidos en el cauce en dichas zonas (las líneas rojas representan la dirección de los cambios geomorfológicos del cauce para la zona de confluencia).

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

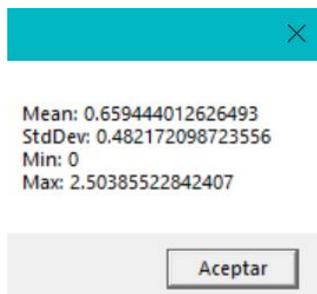


Figura 135. Datos estadísticos de velocidad para los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 25 años, fuente: Autores

En la figura 135 se observa que el promedio de la velocidad para un periodo de retorno de 25 años es de 0.659 m/s lo cual no representa una alerta, más sin embargo según la tabla se reporta un valor máximo promedio de 2.5 m/s en el cauce, que tampoco representa mayor peligro, pero debe tenerse en cuenta las velocidades máximas reportadas.

Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 50 años

Luego de realizar el mismo procesamiento para los datos limnimétricos reportados por las estaciones la Siberia y la Trinidad en la interfaz gráfica, se determinó que el caudal máximo apropiado para el periodo de retorno de 50 años fue de:

- ✓ Estación la Siberia – Río Chicamocha: 51.48 m³/s
- ✓ Estación la Trinidad – Río Surba: 10.24 m³/s

Una vez determinados los caudales, se procede a introducir estos valores en el modelo, resultando lo siguiente:



Figura 136. Modelado para el calado máximo de agua en un periodo de retorno de 50 años, fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 136, se originan nuevas huellas de inundación y también se observa que persisten algunas huellas que son al igual que en la modelación para un periodo de retorno de 25 años producto de antiguas sinuosidades del río, más sin embargo estas aumentan su tamaño considerablemente, generando un peligro potencial cada vez más próximo a las construcciones aledañas, lo cual se puede observar más en detalle en la siguiente figura, donde hay presencia de unas viviendas que están muy próximas a las huellas de inundación encontradas:

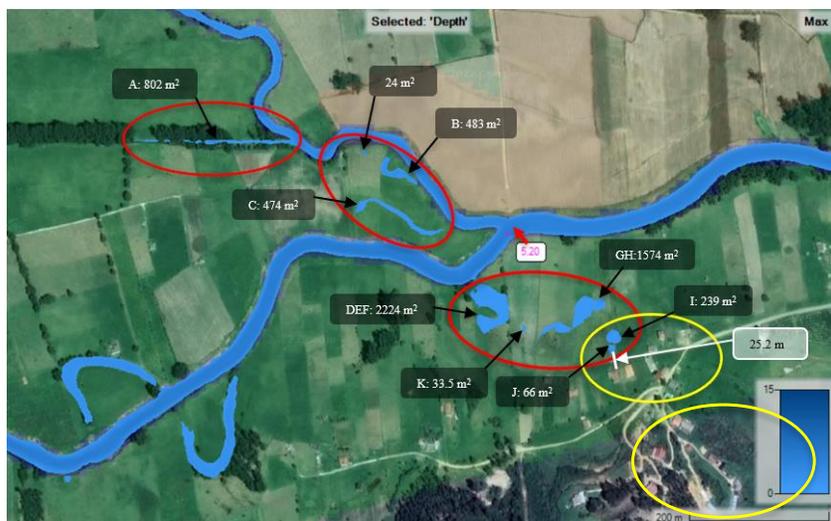


Figura 137. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 50 años (altura máxima aproximada en el cauce es de 5.20 metros), fuente: Autores

El calado máximo reportado para un periodo de retorno de 50 años en la confluencia entre los dos cauces es de 5.20 metros aproximadamente, por tanto, según la figura 137 a esta altura se presentan rebosamientos del río que dan paso a la formación de una nueva huella de inundación y el aumento de las anteriores observadas para el periodo de retorno de 25 años, para este escenario se observa un comportamiento a tener en cuenta debido a su proximidad de aproximadamente 25.2 metros de la construcción más cercana, esto puede generarse en un peligro potencial bastante alto, ya que si esta huella de inundación llegase a formarse y aunado a esto ocurre un evento de lluvias torrenciales, la huella aumentaría de tamaño y llegaría hasta la construcción, generando posibles procesos de socavación en la estructura, además de ser un peligro directo para las personas aledañas o que ahí conviven.

En la figura 137 también se puede observar el aumento del doble o más en tamaño para diversas huellas de inundación, entre los casos más destacados se encuentra el aumento en tamaño de la huella de inundación “I” la cual pasa de 13.4 m^2 a 239 m^2 correspondiente a una de las huellas de inundación más preocupantes por su proximidad a las construcciones en la zona, también la unión de las huellas de inundación DE y F donde el área aumenta de 1339 m^2 y 114 m^2 a 2224 m^2 y otro aumento considerable es el de la huella de inundación “H” ya que aumenta hasta los 1574 m^2 más del doble del periodo de retorno anterior.



Figura 138. Dirección y comportamiento del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 50 años, fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 138, las líneas blancas corresponden al comportamiento del flujo, el cual una vez modelado y visualizado el flujo, si se acerca con zoom se pueden observar rápidos y centrifugas en algunas secciones del río, más sin embargo estas no representan mayor cambio en las direcciones del cauce.

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

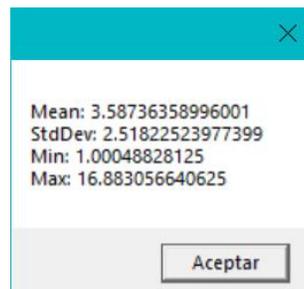


Figura 139. Datos estadísticos de profundidad o calado en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 50 años, fuente: Autores

En la figura 139 se observa que el promedio de profundidad o calado para un periodo de retorno de 50 años es de 3.587 metros. Por tanto, debido a algunas depresiones del suelo se originan huellas de inundación. Sin embargo, si bien se alcanza a desbordar el río en algunas partes, no representa un mayor peligro a la comunidad las alturas de las huellas de inundación, más si es importante tener en cuenta que la composición del terreno cambia al estar saturada de agua y el comportamiento de este. Igual cabe resaltar que se están mencionando las profundidades promedio mas no las máximas, las cuales, si representan un peligro potencial bastante significativa para la comunidad, por tanto, se debe tener en cuenta al momento de llevar a cabo algún tipo de actividad aledaña a los dos cauces estas apreciaciones.

Aunado a los caudales antes modelados, también se pueden determinar las velocidades para este periodo de retorno, obteniendo:

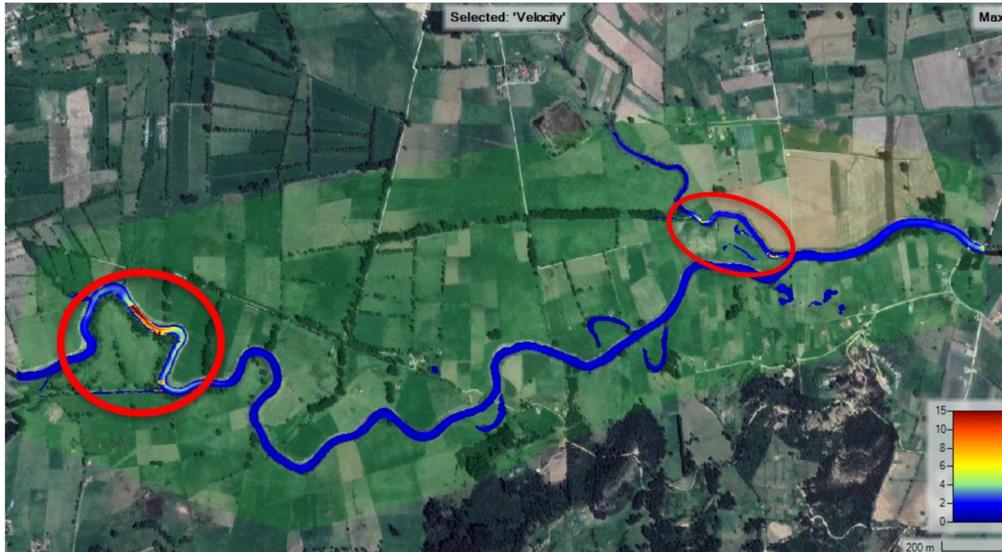


Figura 140. Modelado para el calado máximo de velocidad en un periodo de retorno de 50 años, fuente: Autores

En la figura 140 se presentan altos picos de velocidad en las sinuosidades del río Chicamocha y del Surba las cuales se detallan en las siguientes figuras:



Figura 141. Velocidades en la sinuosidad del río Chicamocha y la confluencia con el Surba para un periodo de retorno de 50 años (velocidad máxima aproximada 91.27 m/s y 46.77 m/s), fuente: Autores

En la figura 141 se muestran las velocidades máximas que reporta el modelo para un periodo de retorno de 100 años, las cuales representan según los valores un peligro muy alto para la población y las obras de infraestructura como puentes debido a el transporte de sedimentos de gran volumen y a turbulencias altas, adicionalmente las dos flechas blancas representa la

dirección de los cambios morfodinámicos a futuro que puede sufrir el cauce conforme el caudal pasa constantemente con esas velocidades.

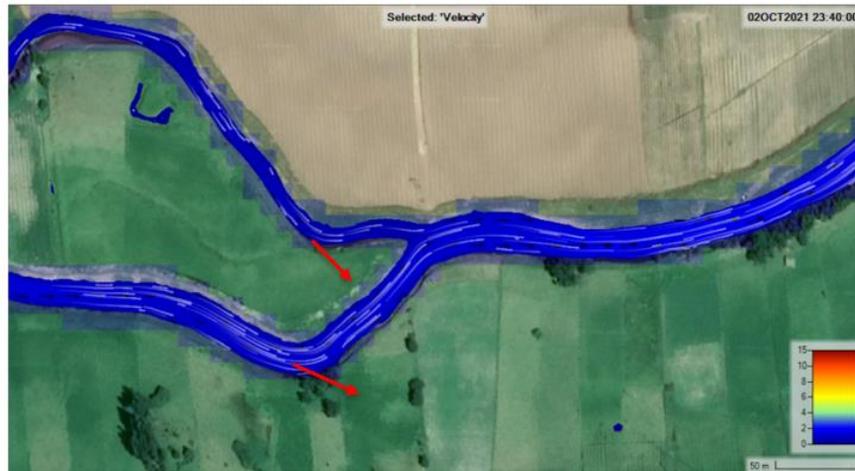


Figura 142. Dirección de las velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 50 años, fuente: Autores

Debido a que las velocidades promedio para este periodo de retorno no son tan pronunciadas, estos no ocasionarían cambios geomorfológicos tan rápidos en el cauce, sin embargo, se puede observar en la figura 140 que existen algunas zonas donde las velocidades máximas son bastante elevadas. A lo cual, debido a la mayor turbulencia y mayor transporte de sedimentos se pueden ocasionar cambios en el cauce para dichas zonas de velocidades rápidas (las líneas rojas representan la dirección de los cambios geomorfológicos del cauce para la zona de confluencia).

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

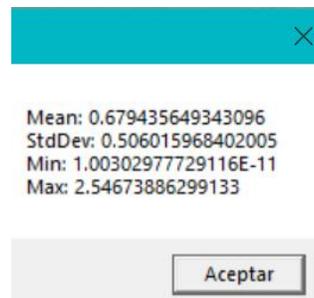


Figura 143. Datos estadísticos de velocidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 50 años, fuente: Autores

En la figura 143 se observa que el promedio de la velocidad para un periodo de retorno de 50 años es de 0.679 m/s. Así también, se detalló que la velocidad máxima del agua es de 2.546 m/s, lo cual resulta ligeramente mayor a los valores reportados en periodos de retorno más bajos.

Modelado hidrodinámico para el caudal máximo arrojado por la interfaz gráfica en un periodo de tiempo de retorno de 100 años

Luego de realizar el mismo procesamiento para los datos limnimétricos reportados por las estaciones la Siberia y la Trinidad en la interfaz gráfica, se determinó que el caudal máximo apropiado para el periodo de retorno de 100 años fue de:

- ✓ Estación la Siberia – Río Chicamocha: 55.69 m³/s
- ✓ Estación la Trinidad – Río Surba: 11.37 m³/s

Una vez determinados los caudales, se procede a introducir estos valores en el modelo, resultando lo siguiente:



Figura 144. Modelado en el calado máximo de agua para un periodo de retorno de 100 años, fuente: Autores

Como se puede observar en la figura 144, existen algunas huellas de inundación que son al igual que en la modelación para los periodos de retorno anteriores producto de antiguas sinuosidades del río, las cuales fueron selladas con el paso del tiempo, mas, sin embargo, aun la topografía del terreno sigue siendo propensa a estas inundaciones, sin embargo en este periodo de retorno sucede algo más perjudicial y es que las huellas de inundación crecen considerablemente e incluso en la región derecha de la figura podemos ver que están muy cercanas a las construcciones, lo cual representa un peligro potencial muy crítico en la comunidad, como se detalla en la siguiente figura:

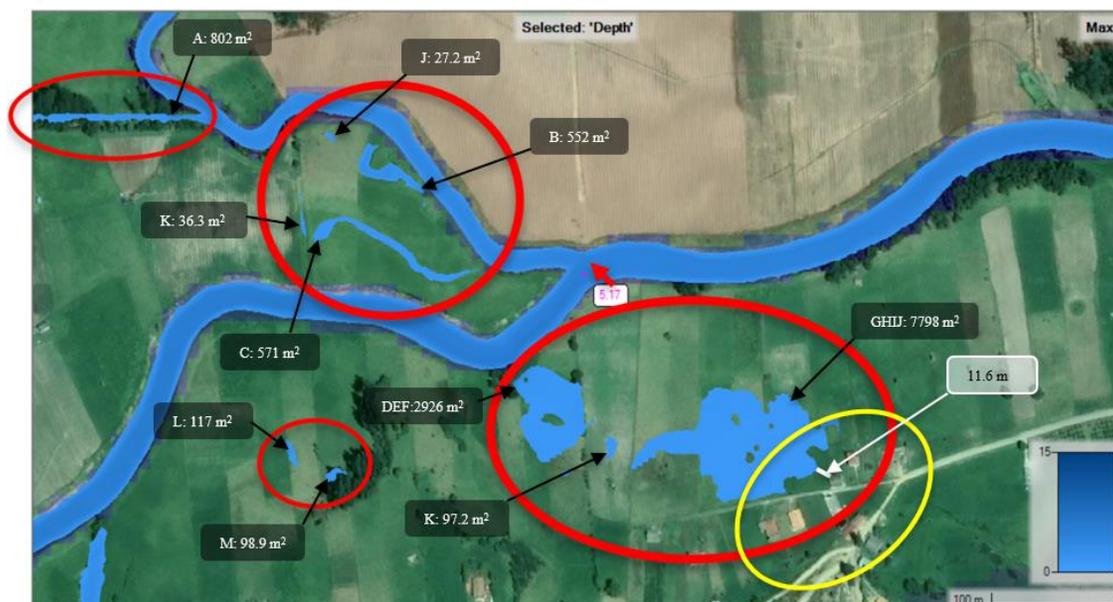


Figura 145. Huellas de inundación en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años (altura máxima aproximada en la confluencia es de 5.17 metros), fuente: Autores

El calado máximo reportado para un periodo de retorno de 50 años en la confluencia entre los dos cauces es de 5.17 metros aproximadamente, por tanto, según la figura 145 a esta altura se presentan rebosamientos del río que dan paso a la formación de 2 huellas de inundación (L y M) que pueden ocasionar pérdidas de cobertura vegetal producto de procesos de erosión, así mismo, también se observa la unión de las huellas de inundación “GH” con la huella “I” y la huella “J” generando consigo una gran y considerable zona de inundación de aproximadamente 7798 m², bastante crítica que representa un peligro potencial muy alto para la comunidad debido

a la proximidad de aproximadamente 11.6 metros (proximidad con respecto a las estructuras más cercanas).

Esta situación si bien es producto de caudales elevados en un periodo de retorno amplio de 100 años, se debe tener muy en cuenta en los planes de ordenamiento territorial del municipio y en los sistemas de alertas tempranas, ya que, si se construye aledañosamente a la zona, se pueden acarrear pérdidas no solo ambientales por la erosión del suelo, sino económicas y sociales, por la destrucción de construcciones y pérdidas de vidas humanas.



Figura 146. Dirección del caudal en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años, fuente: Autores

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

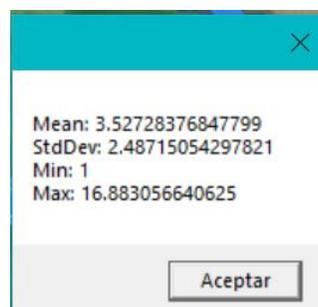


Figura 147. Datos estadísticos de calado o profundidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 100 años, fuente: Autores

En la figura 147 se observa que el promedio de profundidad o calado para un periodo de retorno de 100 años es de 3.527 metros, por tanto, debido a algunas depresiones del suelo se originan pocas huellas de inundación. Sin embargo, no se desborda mayor parte del cauce, situación diferente al ver el comportamiento con el calado máximo, ya que en este si se reportan mayores y pronunciadas huellas de inundación.

Aunado a los caudales antes modelados, también se pueden determinar las velocidades para este periodo de retorno, obteniendo:

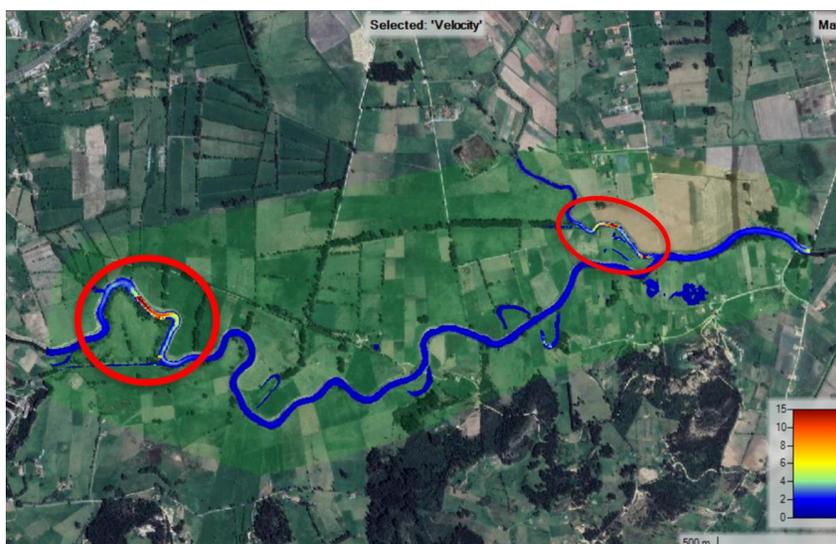


Figura 148. Modelado para el calado máximo de velocidad en un periodo de retorno de 100 años, fuente: Autores

Como se logra observar en la figura 148 existen diferentes zonas en los cauces en las que se pueden presentar velocidades muy altas, las cuales representan un peligro potencial muy alto para la población, estas zonas se visualizan a continuación:

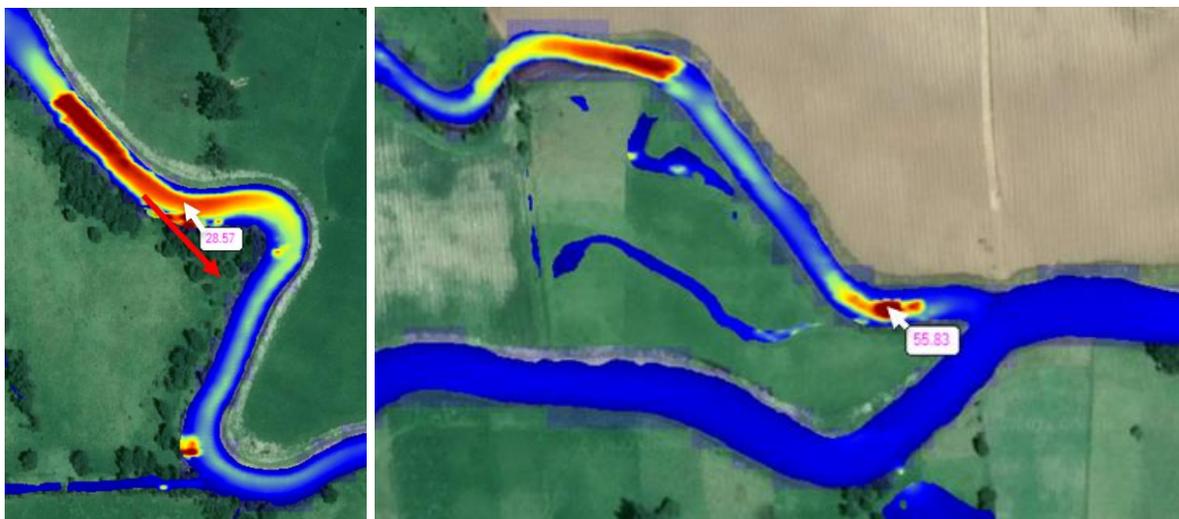


Figura 149. Velocidades en la sinuosidad del río Chicamocha y en la confluencia con el río Surba para un periodo de retorno de 100 años (velocidad aproximada en un tramo del río Chicamocha es de 28.57 m/s y para el tramo del río Surba es de 55.83 m/s), fuente: Autores

En la figura 149 se muestra velocidades bastante elevadas, las cuales representan un peligro potencial muy crítico para el municipio, en la imagen de la izquierda se ilustra las velocidades no máximas del tramo del río Chicamocha sino más adelante, en la imagen de la derecha se ilustra las velocidades máximas reportadas en el tramo del río Surba, las cuales al hacer una relación con el cauce presente, son bastante elevadas y pueden ocasionar procesos de erosión bastante críticos, adicionalmente de cambiar morfológicamente el cauce, generando a un futuro posibles desbordamientos más críticos con transporte de sedimentos de gran volumen.

Sin embargo, al analizar las velocidades máximas promedio en la confluencia de los dos cauces, se evidencian que están en un rango bastante normal y que no generan peligro, como se muestra en la siguiente figura:

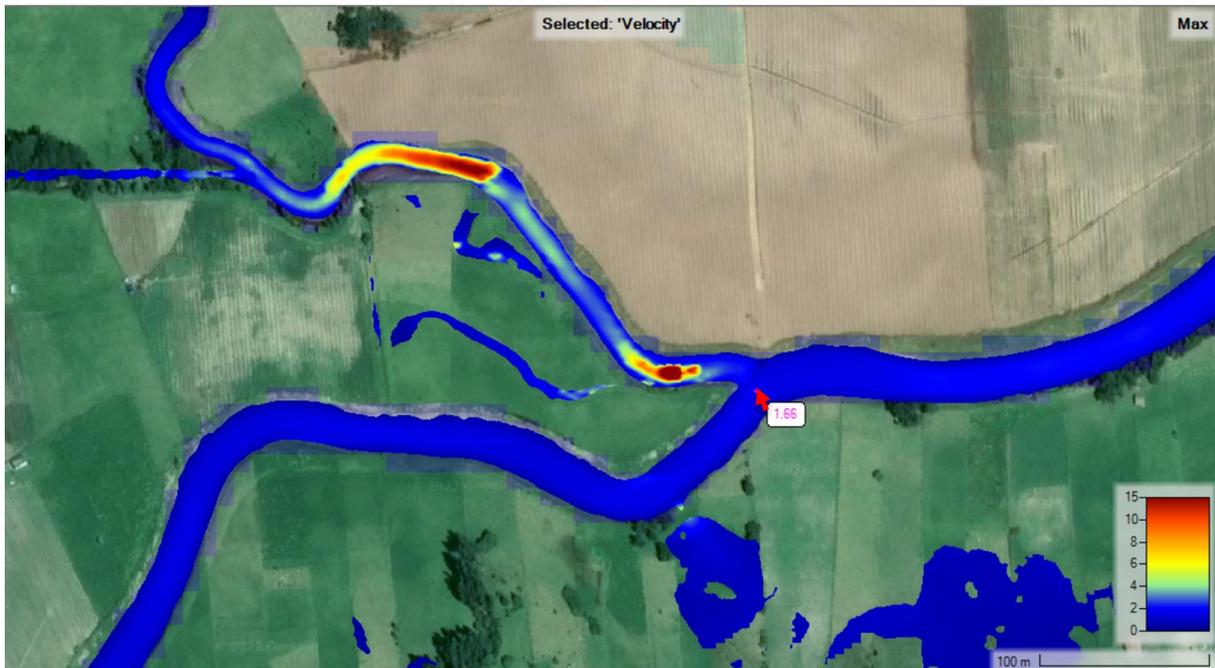


Figura 150. Velocidades en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años (velocidad máxima aproximada 1.66 m/s), fuente: Autores

Estas velocidades máximas no representan un peligro para la población ni para la cobertura vegetal que rodea los cauces.

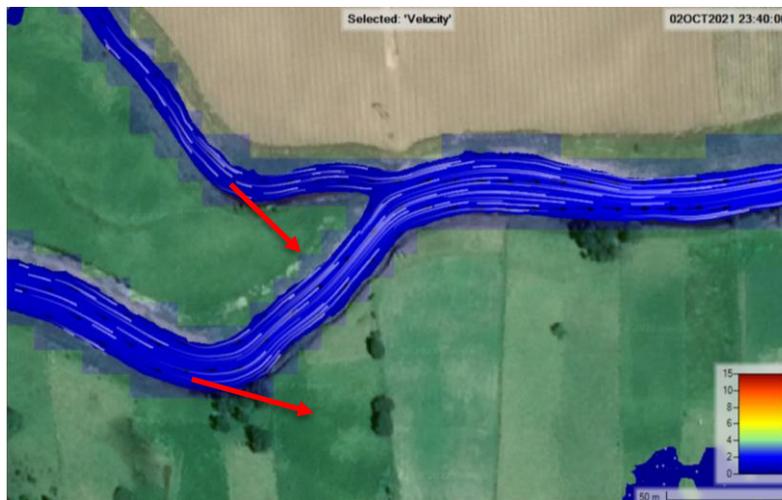


Figura 151. Dirección y comportamiento del flujo en la confluencia entre el río Chicamocha y Surba para un periodo de retorno de 100 años, fuente: Autores

Debido a que las velocidades promedio para este periodo de retorno no son tan pronunciadas, estos no ocasionarían cambios geomorfológicos tan rápidos en el cauce, sin embargo, se puede

observar en la figura 148 que existen algunas zonas donde las velocidades máximas son bastante pronunciadas, a lo cual, debido a la mayor turbulencia y mayor transporte de sedimentos se pueden ocasionar cambios en el cauce para dichas zonas de velocidades rápidas (las líneas rojas representan la dirección de los cambios geomorfológicos del cauce para la zona de confluencia).

Por consiguiente, el modelo arroja el promedio de profundidad, así como el máximo y mínimo:

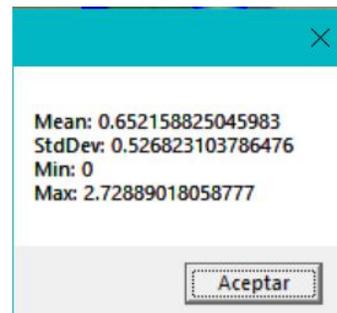


Figura 152. Datos estadísticos de velocidad en los dos tramos modelados para un periodo de retorno de 100 años, fuente: Autores

En la figura 152 se observa que el promedio de la velocidad para un periodo de retorno de 100 años es de $0.652 \text{ m}^2/\text{s}$ que es más elevado al de los periodos de retorno antes vistos, así también, se detalló que la velocidad máxima del agua es de $2.728 \text{ m}^2/\text{s}$ igualmente, mayor al de los periodos de retorno anteriores.

Análisis de los Calados y las Zonas de Inundación

Según los modelos arrojados para los diferentes periodos de retorno, se lograron determinar diferentes huellas de inundación, las cuales a medida que aumentaba el tiempo estas crecían o se formaban unas nuevas:

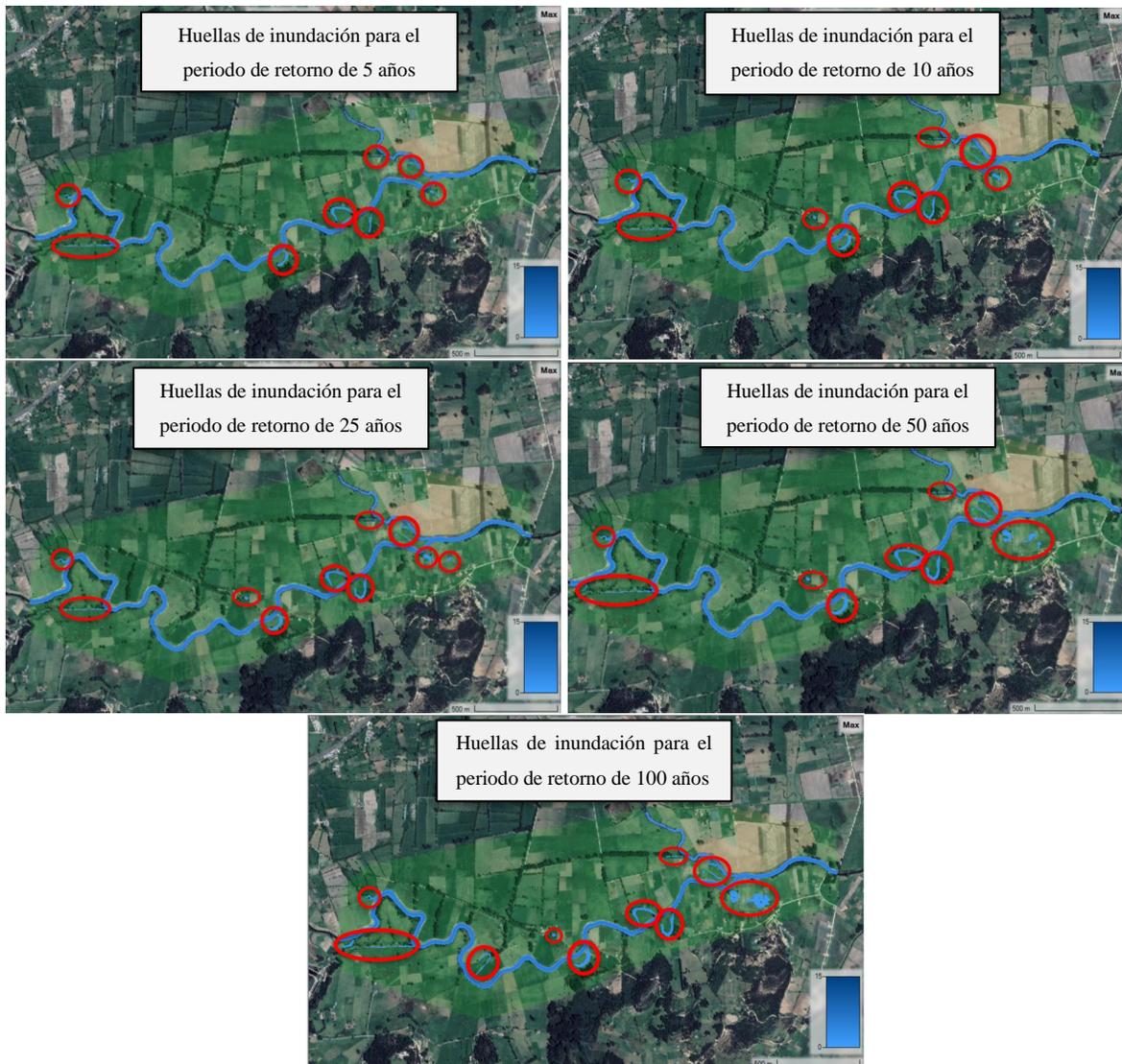


Figura 153. Mapeo de huellas de inundación para los diferentes *periodos* de retorno

Como se puede observar en las figuras anteriores para los resultados modelados del calado en los diferentes periodos de retorno, existen algunas huellas de inundación que son producto de antiguas sinuosidades de los cauces, las cuales fueron selladas con el paso del tiempo, mas, sin embargo, aun la topografía del terreno sigue siendo propensa a estas inundaciones, así

mismo encontramos una relación ente el nacimiento de árboles por donde surgen las huellas de inundación, es así que estas formaciones arbóreas también sirven como primer indicio para determinar donde habrán posibles inundaciones, así mismo sirven como barrera ecológica para frenar el paso de agua y reducir los posibles peligros potenciales ligados.

Se observó también que el promedio de altura de calado para cada uno de los periodos de retorno no varía considerablemente, sin embargo, se puede evidenciar que existen algunas zonas donde las profundidades son mayores y las alturas del calado alcanzan a sobrepasar el cauce e incluso las riberas del mismo, ocasionando así las planicies de inundación, afectando algunas zonas de cultivos o praderas. Por tanto, si se llegase a construir o cultivar aledañosamente allí, las inundaciones ocasionarían daños directos que incurrirían en pérdidas económicas tanto para los propietarios como para el municipio, es importante reconocer estas huellas de inundación y prevenir estos posibles peligros potenciales por medio de estrategias como la construcción de taludes o el respectivo respeto de ronda hídrica.

Como resultado del modelado para el periodo de retorno de 100 años se obtuvo una huella de inundación aledaña a unas construcciones, como se muestra en la siguiente figura, la cual explica con ayuda de perfiles topográficos el escenario:

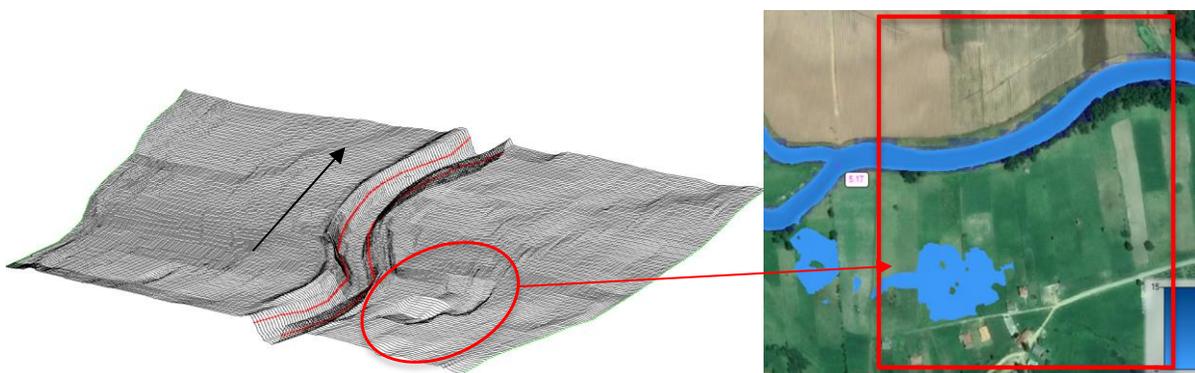


Figura 154. Perfiles del terreno para la huella de inundación aledaña a las construcciones, fuente: Autores

En la figura 154 se ilustra un tramo de cauce correspondiente a después de la confluencia, en este se pueden evidenciar según lo encerrado en el círculo rojo, las depresiones en el suelo que dan paso a la formación de huellas de inundación una vez el caudal rebosa las riberas del cauce, la flecha negra corresponde a la dirección del caudal y el cuadro rojo corresponde al área

perfilada, además de lo anterior, en la siguiente figura se logra visualizar más en detalle unos de los perfiles topográficos de la huella de inundación:

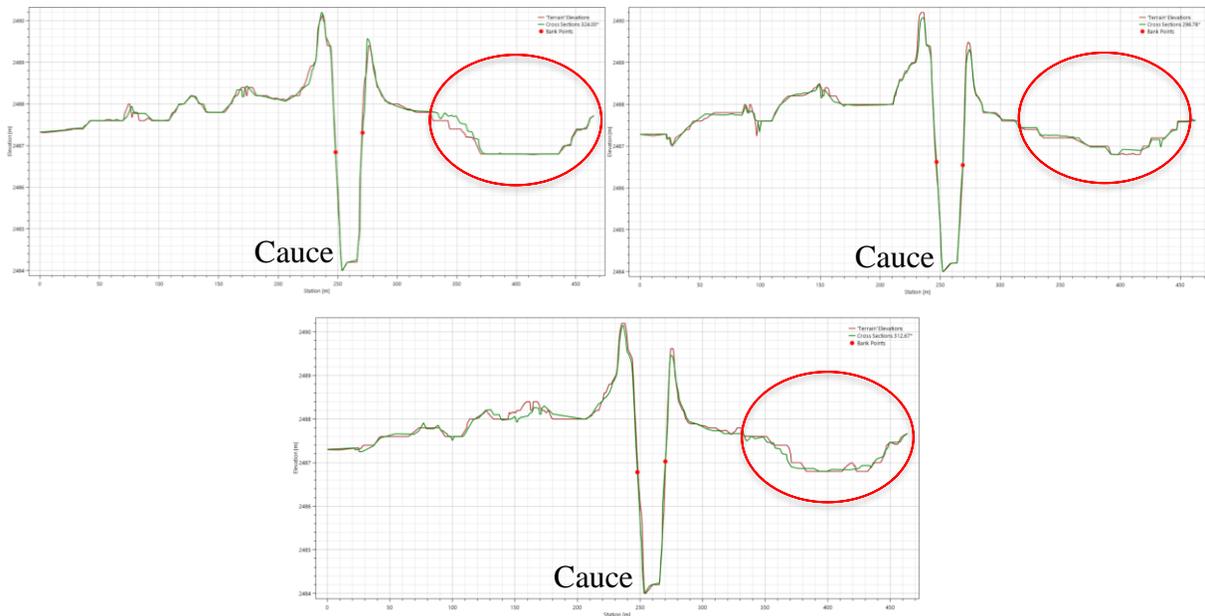


Figura 155. Perfiles topográficos para la huella de inundación después de la confluencia del río Chicamocha con el río Surba, fuente: Autores

En la figura 155 visualizamos en la región derecha del cauce, por las proximidades de los asentamientos y/o construcciones, se encuentra una depresión causante de las huellas de inundación.

Otro de los tramos donde se reportan en los diferentes periodos de retorno la presencia de huellas de inundación es en las antiguas sinuosidades del cauce, por lo cual se realizó un perfilamiento topográfico de los tramos:

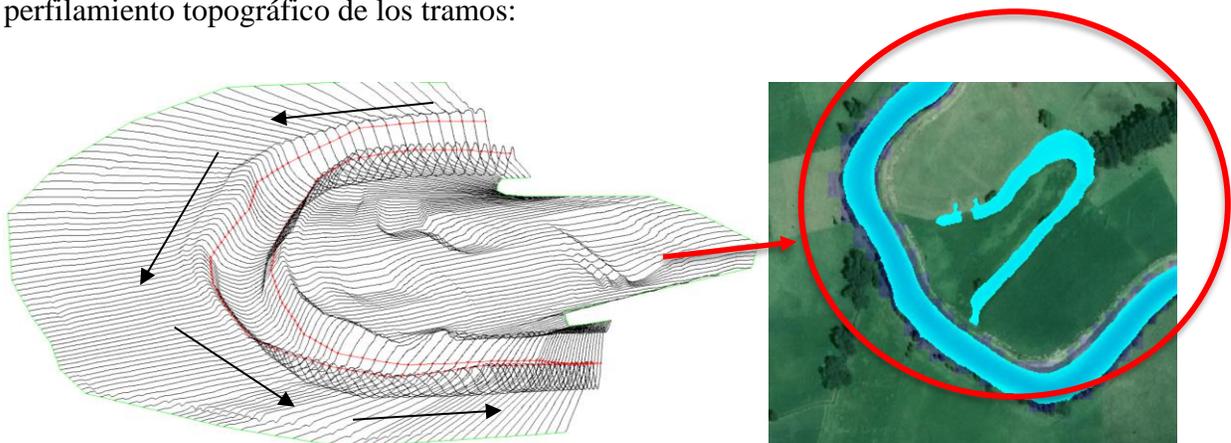


Figura 156. Perfiles topográficos para la sinuosidad donde se presentan inundaciones, tramo del río Chicamocha, fuente: Autores

En la figura 156 en la imagen de la izquierda se logra evidenciar algunas depresiones en el terreno (las líneas negras representan la dirección del caudal), lo cual es una causal para originar huellas de inundación, sin embargo, en la siguiente figura se puede observar más en detalle el terreno:

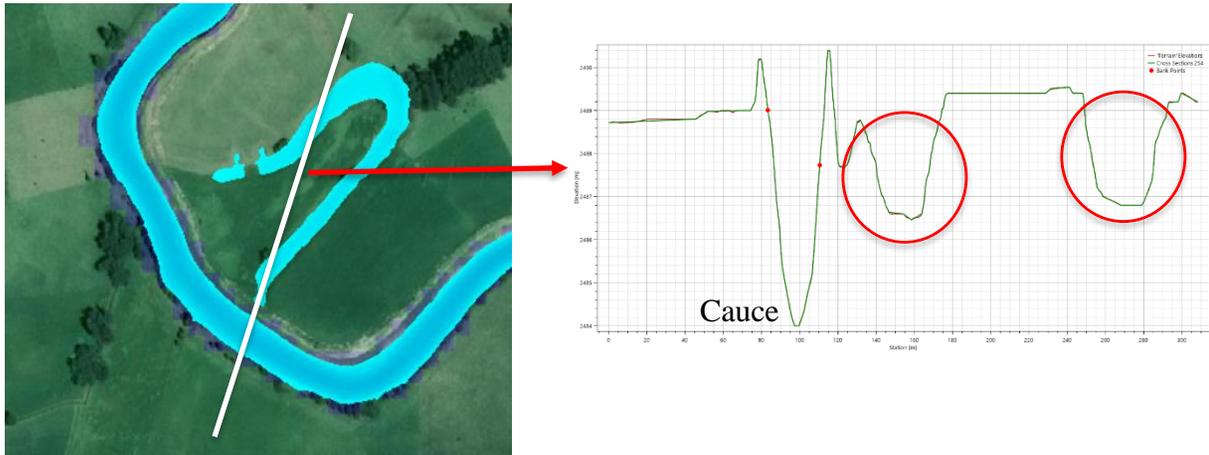


Figura 157. Perfil topográfico transversal del cauce y de la huella de inundación, tramo río Chicamocha, fuente: Autores

Como se puede evidenciar en la figura 157 según el perfil obtenido (línea transversal blanca), los hundimientos en el terreno son bastante pronunciados, lo cual, al estar tan cercano al cauce, se llenan los hundimientos y se genera la huella de inundación reportada en los modelos para los diferentes periodos de retorno.

También se evaluaron los resultados del modelado para las posteriores huellas de inundación en un tramo del río Chicamocha:

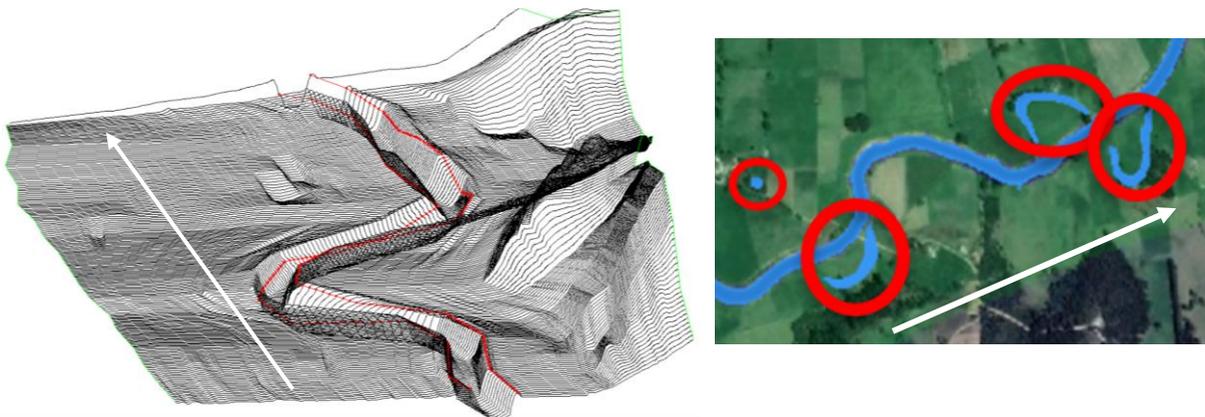


Figura 158. Perfiles topográficos para la sinuosidad donde se presentan inundaciones, tramo río Chicamocha, fuente: Autores

En la figura 158 se evidencian que, a lo largo del tramo, los márgenes del cauce presentan hundimientos que pueden ocasionar la formación de huellas de inundación (las flechas blancas ilustran la dirección del caudal en el cauce), sin embargo, en la siguiente figura se observa más en detalle cada sección transversal del cauce con las zonas de inundación:



Figura 159. Perfiles topográficos transversales del tramo de huellas de inundación para un tramo del río Chicamocha, fuente: Autores

Las líneas blancas ilustran la sección trasversal de la cual se sacó el perfil topográfico y al lado derecho los dos perfiles correspondientes del terreno para las diferentes huellas de inundación.

Se determinó la presencia de algunas huellas de inundación que ocasionarían daños directos muy graves a las viviendas y a los habitantes de las mismas, por tanto, si bien se debe respetar las rondas hídricas establecidas en el decreto 2811 del 1974 en su artículo 83 que establece que las rondas hídricas protectoras deben tener un aislamiento de un máximo de hasta treinta (30) metros y el decreto 2245 del 22 de diciembre del 2017 "Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas", también se debe incluir dentro de los planes de ordenamiento territorial el tipo de uso de suelo de estas zonas donde existe probabilidad de inundación y denominarlas áreas de restauración, conservación y preservación, a lo cual brinde mayor seguridad a las personas para que no construyan ni lleven a cabo sus actividades allí, pues como

se logra ver en la figura 155 la zona de mayor inundación está muy próxima a asentamientos y construcciones de viviendas. Por tanto, si bien estas están construidas algunas en mampostería normal de ladrillo y cemento, con velocidades y alturas pronunciadas se pueden ocasionar pérdidas y daños directos muy graves, tanto a la estructura como a las personas que allí habitan, dentro de los peligros potenciales están inmersos la socavación de la estructura y la erosión de la misma, por tanto, esta zona está en peligro y alerta constante por posible inundación según lo identificado en este proyecto.

Por lo anterior mencionado, se recomienda entonces que estas planicies de inundación sean incluidas dentro de los mapas para la atención de riesgos y alertas tempranas, de tal forma que las estrategias municipales para la respuesta a estas emergencias permitan que el equipo de socorro del municipio atienda primeramente como punto crítico las zonas determinadas de inundación, también se recomienda que una vez se empiecen a reportar rebosamientos de las cotas de inundación, se les informe con tiempo a la población aledaña a las zonas de inundación previamente determinadas en este proyecto para llevar a cabo una evacuación pronta.

Teniendo en cuenta las zonas de inundación determinadas en este proyecto y según los decretos previamente mencionados, es recomendable solicitar e informar a la población que, si llegase a realizar algún tipo de actividad o construcción aledaña al río y a la zona de confluencia, debe tener en cuenta que el respeto de ronda se recomienda también tomarlo a partir de las huellas de inundación identificadas y reducir así los peligros potenciales y la posibilidad de desastres.

Análisis de las Velocidades

Según las velocidades identificadas para los diferentes periodos de retorno con sus respectivos caudales, se determinaron y estudiaron algunos comportamientos que sucederían a futuro para los cauces y el terreno. Uno de los cambios más notorios que se pueden presentar es la modificación morfodinámica en el cauce de los meandros presentes, debido a la acumulación y transporte de sedimentos en las zonas cóncavas y convexas.

Sin embargo, debido a que para los caudales mayores existen velocidades muy altas las cuales representan peligros muy altos tanto para las personas como para las estructuras presentes, así mismo podrían transportar consigo sedimentos de mayor tamaño y acelerar los cambios morfodinámicos del cauce. Según lo arrojado por los modelos en los diferentes periodos de retorno existe un tramo en el río Chicamocha donde las velocidades aumentan considerablemente, por tanto, en las siguientes figuras se ilustran los perfiles topográficos concernientes del tramo:

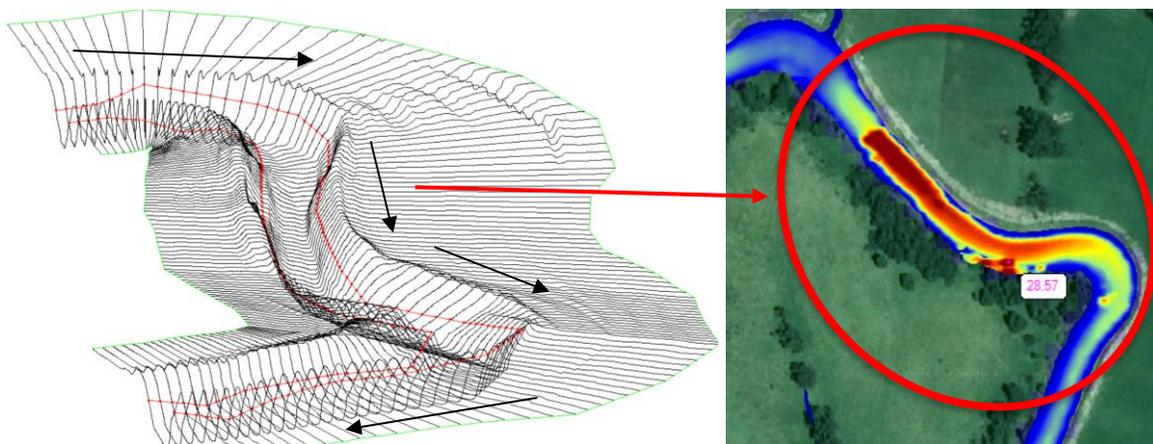


Figura 160. Perfiles topográficos de la zona donde se presentan mayores velocidades en el tramo del río Chicamocha, fuente: Autores

En la figura 160 se ilustran los perfiles topográficos del tramo en donde se reportaron mayores velocidades para cada uno de los periodos de retorno, como se puede observar en la imagen de la izquierda el canal se hace más angosto lo cual según las posteriores figuras se justifica el incremento de velocidades (las flechas negras ilustran la dirección del cauce).

Para comprender mejor el incremento de velocidad se ilustran dos perfiles topográficos del tramo:

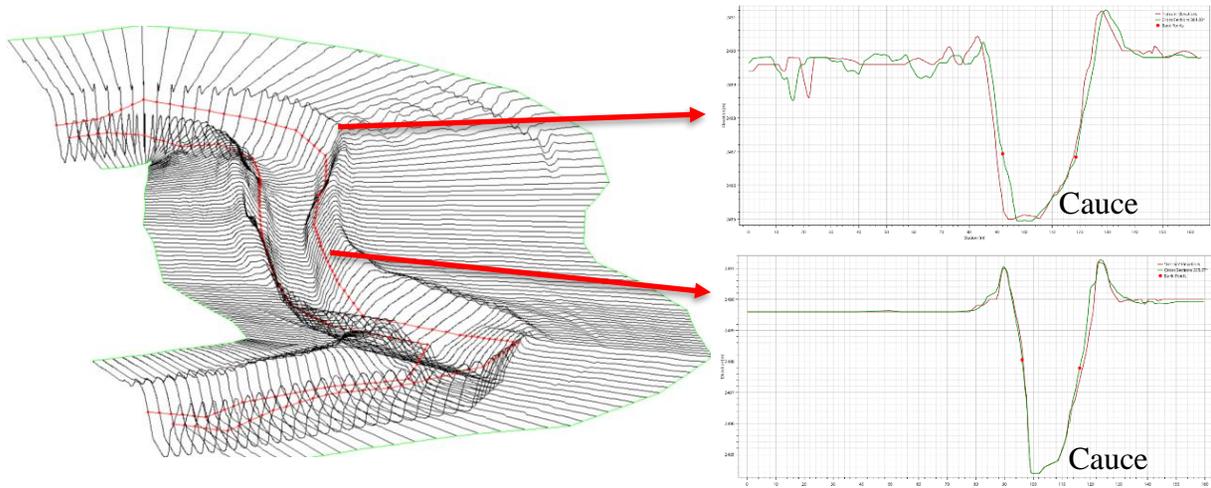


Figura 161. Perfiles topográficos transversales para la zona con presencia de mayores velocidades en un tramo del río Chicamocha, fuente: Autores

En la figura 161 se logra evidenciar como el cauce se hace más angosto, lo cual es una de las causales del incremento en las velocidades.

Dentro de los otros comportamientos que pueden suceder con las velocidades reportadas en la modelación, se encuentra la presencia de procesos de erosión en los terrenos y debido al transporte de sedimentos considerables se pueden afectar algunas obras de infraestructura como puentes, generando procesos de socavación. Es recomendable aplicar algunos mecanismos que permitan reducir o controlar estas velocidades, asegurando la integridad y calidad de vida de las personas.

Conclusiones

Para la determinación de los caudales máximos en los distintos periodos de retorno, se elaboró una interfaz gráfica utilizando el lenguaje de programación de Python con la herramienta Pycharm, la interfaz gráfica elaborada tiene como función tomar los datos descargados de caudal medio diario del DHIME y someterlos a una serie de procesos para el análisis estadístico y probabilístico, dando como resultado la generación de diversos gráficos con información diaria, mensual y anual de caudales mínimos, medios y máximos, así como también el resultado de histogramas y gráficos con las distribuciones de probabilidad empleadas para calcular el caudal en los distintos periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años). De lo anterior, por medio de la interfaz gráfica se obtuvo los caudales máximos de las estaciones la Siberia y la Trinidad para posteriormente llevar a cabo la modelación hidrodinámica bidimensional y reflejar la aparición de huellas de inundación dentro de la zona de estudio.

La elaboración de la interfaz gráfica por medio del lenguaje de programación de Python permite a este y futuros proyectos la obtención confiable de caudales máximos según diversos periodos de retorno, optimizando los procesos para la organización de los datos descargados de las estaciones limnimétricas por medio de la aplicación de diversos métodos estadísticos que permiten obtener el caudal ideal, aunado a lo anterior, la interfaz creada brinda la posibilidad de automatizar los procesos de lectura y escritura de archivos, cálculo de funciones, elaboración de gráficos y determinación de pruebas estadísticas empleadas a lo largo del procesamiento de datos, así como arrojar información estadística (media, mediana, desviación estándar, valor máximo, valor mínimo, curtosis, varianza y entre otros).

El proyecto arrojó resultados de las posibles zonas susceptibles a inundación, con un nivel de confiabilidad alto que se puede verificar por el nivel de detalle del ráster empleado, así mismo, esta información limnimétrica también permite determinar parámetros de longitudes, pendientes, coberturas y/o usos de suelos, área de drenaje de los cauces, entre otras, por tanto se puede concluir que una de las bases primordiales para la elaboración de un modelo hidrodinámico bidimensional es el nivel de detalle en la información topográfica o limnimétrica del área de estudio.

Debido a que el ráster empleado para la elaboración del modelo hidrodinámico bidimensional no abarca toda el área de estudio incluyendo las dos estaciones limnimétricas, resulta complejo

llevar a cabo la calibración del respectivo modelo por medio de la medición del coeficiente de rugosidad de Manning, sumado a ello, debido a la emergencia sanitaria presentada por el Covid-19 se dificultó el proceso en el préstamo de los equipos necesarios para llevar a cabo la medición en campo del coeficiente de rugosidad representativo del tipo de terreno, por tanto se concluye que se incorporaran valores teóricos tomados de fuentes de información secundaria y terciaria.

Por medio de metodología desarrollada empleando la herramienta de simulación HEC-RAS 2D y la elaboración del modelo hidrodinámico bidimensional se determinó la formación de diversas huellas de inundación que son producto de caudales que van desde $34.29 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Chicamocha y $6.43 \text{ m}^3/\text{s}$ para el río Surba.

Recomendaciones

Se recomienda desarrollar el aplicativo informático de la interfaz gráfica que contenga todo el lenguaje de programación elaborado y así lograr su fácil comercialización con distintos usuarios.

Se recomienda que se realicen pruebas adicionales a la interfaz gráfica por medio de diferentes metodologías que permitan validar la confiabilidad de los datos generados.

Se recomienda que la interfaz gráfica se utilice con fines investigativos relacionados con el modelamiento hidrodinámico de cauces.

Se recomienda llevar a cabo la calibración y validación del modelo hidrodinámico bidimensional por medio de la determinación en campo del coeficiente de rugosidad de Manning respectivo del terreno, e incluirlo dentro de los polígonos creados con valores teóricos a fin de validar la confiabilidad de las zonas de inundación simuladas.

Se recomienda que los resultados de las huellas de inundación generadas en este proyecto sean base y complemento de otros estudios respectivos de la zona.

Se recomienda tomar los resultados de las huellas de inundación previamente simuladas en este proyecto, con el fin de incluirlas como peligros potenciales dentro de la estructuración de los planes de gestión del riesgo del municipio.

Referencias

- Alcaldía de Paipa. (2008). *Plan de desarrollo 2008 - 2011*. Paipa: Alcaldía de Paipa.
- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). *Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains*. (No. FHWA-TS-84-204). United States: Federal Highway Administration
- Beltrán, G., & Torres, S. (2020). *Estimación de los parámetros de Muskingum para el estudio del tránsito de crecientes empleando un método para cuencas con escasa información. Caso de estudio: Quebrada Honda y río Chicamocha*. (Trabajo de grado). Universidad de Boyacá, Tunja.
- Benítez Castro, S. D., & Cueto González, A. (2017). *Análisis comparativo entre software inteligente de modelación de flujo a superficie libre HEC RAS y ensayos de laboratorio de canales y compuertas*. (Trabajo de grado). Universidad Católica De Colombia, Bogotá.
- Bladé, E., Sánchez, M., Sánchez, H., & Niñerola, M. (2009). *Modelación numérica en ríos en régimen permanente y variable*. Barcelona: Edicions UPC.
- Bernard, J., Fripp, J. F., & Robinson, K. R. (2007). *Part 654 Stream Restoration Design National Engineering Handbook, Washington DC: Natural Resources Conservation Service*.
- Brunner, G. W., Piper, S. S., Jensen, M. R., & Chacon, B. (2015). Combined 1D and 2D hydraulic modeling within HEC-RAS. *World Environmental and Water Resources Congress 2015* (1432-1443). Recuperado de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784479162.141>
- Carrión Agila, E. J. (2020). *Estrategias sostenibles para la protección contra inundaciones de las zonas vulnerables del cantón Santa Rosa*. (Estudio de caso). Universidad Técnica de Machala, Ecuador.
- Chóez Nogales, J. H., & Motato Mezones, G. (n.d.). *Análisis espacio temporal debido a pérdida de vegetación por inundaciones y remanentes de bosques periodo 2015- 2020, Cantón Babahoyo*. (Trabajo de grado). Universidad Agraria Del Ecuador, Ecuador.
- Consorcio Río Chicamocha IEH Grucon - H&E. (2019). *Consultoría para realizar los estudios técnicos necesarios para definir la ronda de protección ambiental, la cota máxima de*

inundación y las alternativas de adecuación hidráulica en el cauce principal de la cuenca alta del río Chicamocha. Tunja: CORPOBOYACÁ

Comisión Nacional del Agua. (2011). *Manual para el control de inundaciones.* Tlalpan: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Cubillos Monroy, F. A. (2016). *Generación del mapa de inundación del río Chicamocha departamento de Boyacá, mediante una aplicación sig.* (Trabajo de grado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

Corpoboyacá, & Ingeniería y Gestión de la Información. (2015). *Plan de ordenamiento del recurso hídrico de la cuenca alta y media del río Chicamocha.* Recuperado de <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2019/09/informe-porh-chicamocha.pdf>

Demir, V. & Kisi. O. (2016) Cartografía del peligro de inundaciones mediante el uso de un sistema de información geográfica y un modelo hidráulico: río Mert, Samsun, Turquía, *Avances en meteorología, 2016*, 1-9

Engineering, Training & Development Solutions. (2017). *Simulaciones hidráulicas: ¿Unidimensional, Bidimensional o Tridimensional?.* Recuperado de <https://eadic.com/blog/entrada/simulaciones-hidraulicas-unidimensional-bidimensional-o-tridimensional/>

Epidat 4. (2014). *Ayuda de distribuciones de probabilidad.* Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador.

Ezzine, A., Saidi, S., Hermassi, T., Kammessi, I., Darragi, F., & Rajhi, H. (2020). Flood mapping using hydraulic modeling and Sentinel-1 image: Case study of Medjerda Basin, northern Tunisia. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(3), 303–310.

Ferrando A., F. J. (2006). Sobre inundaciones y anegamientos. *Revista de Urbanismo*, (15), 25 – 42.

Fleischmann, A. S., Brêda, J. P. F., Passaia, O. A., Wongchuig, S. C., Fan, F. M., Paiva, R. C. D., ... & Collischonn, W. (2021). Regional scale hydrodynamic modeling of the river - floodplain - reservoir continuum. *Journal of Hydrology*, 596.

- Freecodecamp. (2021). *Guía de funciones de python con ejemplos*. Recuperado de <https://www.freecodecamp.org/espanol/news/guia-de-funciones-de-python-con-ejemplos/>
- Guarniz Muñoz, C. K. (2014). *Comparación de los modelos Hidráulicos Unidimensional (HEC-RAS) y Bidimensional (IBER) en el Análisis de Rotura en Presas de Materiales Suelos; y Aplicación a la Presa Palo Redondo*. (Trabajo de grado). Universidad Privada Antenor Orrego, Perú.
- IBM. (2022). *Prueba Kolmogorov - Smirnov para una muestra*. Recuperado de <https://prod.ibmdocs-production-dal-6099123ce774e592a519d7c33db8265e-0000.us-south.containers.appdomain.cloud/docs/es/spss-statistics/SaaS?topic=tests-one-sample-kolmogorov-smirnov-test>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (s. f.). *Cotas de inundación*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/cotas-inundacion>
- Igarza, L. M. Z. (2018). Resiliencia urbana ante inundaciones por intensas lluvias en contribución al desarrollo urbano equilibrado. *Arquitectura y Urbanismo*, 39 (1), 39 - 50. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/3768/376858935004/376858935004.pdf>
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2021). *Caracterización general del escenario de riesgo por inundación*. Recuperado de <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>
- Martín Vide, J. P., López Querol, S., Martín Moreta, P., Simarro Grande, G., & Benito Ferrández, G. (2003). Uso de modelos uni y bidimensionales en llanuras de inundación. Aplicación al caso del río Tajo en Talavera de la Reina. *Ingeniería del Agua*, 10 (1), 49 - 58.
- Martínez, I. (2016). *Análisis del efecto laminador del cauce utilizando modelos fluviales bidimensionales*. (Trabajo de doctorado), Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Maidment, D. R., Mays, L., & Larry, W. (1994). Aguas superficiales. En *Hidrología aplicada*, (146). México: Mc Graw Hill.
- Molina-Prieto, L. F. (2016). Resiliencia a inundaciones: nuevo paradigma para el diseño urbano. *Revista de Arquitectura*, 18, 82 – 94.

- Mosquera - Machado, S., & Ahmad, S. (2007). Flood hazard assessment of Atrato River in Colombia. *Water resources management*, 21(3), 591-609. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11269-006-9032-4>
- Naghetini, M. (Ed.). (2017). *Fundamentals of statistical hydrology*. Cham: Springer International Publishing.
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chichiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43-58. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242014000100004
- O'Loughlin, F. E., Neal, J., Schumann, G. J. P., Beighley, E., & Bates, P. D. (2020). A LISFLOOD-FP hydraulic model of the middle reach of the Congo. *Journal of Hydrology*, 580. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169419309382?casa_token=Blq5IjBccsAAAAA:SE-4SwjdEr3T8wAE41kHvn4nTqIazy8WsNYYQb5Ownm7sOXf0-pjkoMQgLr0cYzZtZwiBDd7984
- Ortega Prieto, J. C., & Remedios Rebolledo, M. (2020). Análisis de Herramientas de Modelización Hidráulica Bidimensional. *WSP Spain*, 1, 3–4. Recuperado de <https://www.wsp.com/es-ES/insights/analisis-herramientas-modelizacion-hidraulica-bidimensional>
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). 2D hydraulic flood modeling in data - Scarce regions the case of Ranchería river delta, Riohacha - Colombia. *Inf. Tecnol*, 29(4), 143-157. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/326822099_Modelacion_Hidraulica_2D_de_Inundaciones_en_Regiones_con_Escasez_de_Datos_El_Caso_del_Delta_del_Rio_Rancheria_Riohacha-Colombia
- Pérez, J. I., Nardini, A., & Zuñiga, Y. P. (2018). Identification multiattribute of typologies of flood-vulnerable housing in Riohacha, La Guajira - Colombia. *Información Tecnológica*, 29(5), 187–201. Recuperado de https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-07642018000500187&script=sci_arttext

- Pérez - Maqueo, O., Delfín - Alfonso, C. A., Fregoso, A., Avalos, H. C., & Zamora, M. E. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, (78), 47-66. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2878418>
- Pinos, J., & Timbe, L. (2019). Performance assessment of two-dimensional hydraulic models for generation of flood inundation maps in mountain river basins. *Water Science and Engineering*, 12(1), 11–18. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674237019300183>
- Pontes, P. R. M., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., de Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Siqueira, V. A., Jardim, P. F., Sorribas, M. V., & Collischonn, W. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open-source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 94, 1–20. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136481521630189X?casa_token=QSD2Jxvc63QAAAAA:cGyhI6jX6O3TPZRtbkpu6guzOiGiGuCDdudxBaSOL3UIDu0L6Qhlwm6k9eszl8LIknBw4yc8m4k
- Python, (S.F). *Interfaces graficas de usuario con Tk*. Recuperado de <https://docs.python.org/es/3/library/tk.html>
- Progra, (S.F) *Interfaces graficas*. Recuperado de <http://progra.usm.cl/apunte/materia/interfaces-graficas.html>
- Rodríguez, A. L. V. (2017). Inundaciones en la costa Atlántica y en la costa Mediterránea, dos entornos diferentes, un problema en común: estudio comparativo. *Geotemas (Madrid)*, (17), 215-218. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6398565>
- Russo, B., Velasco, M., Monjo, R., Martínez - Gomariz, E., Sánchez, D., Domínguez, J. L., & Gonzalez, A. (2020). Evaluación de la resiliencia de los servicios urbanos frente a episodios de inundación en Barcelona. El Proyecto RESCCUE. *Ingeniería del Agua*, 24 (2), 101-118. Recuperado de <https://iwaponline.com/IA/article/24/2/101/75813/Evaluacion-de-la-resiliencia-de-los-servicios>
- Ruíz, P. R. (2008). *Hidráulica de canales*. México: Civilgeeks. com.

- Saksena, S., Merwade, V., & Singhofen, P. J. (2019). Flood inundation modeling and mapping by integrating surface and subsurface hydrology with river hydrodynamics. *Journal of Hydrology*, 575, 1155–1177. Recuperado de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169419305657?casa_token=6iKDZyFxiVEAAAAA:pFEG1W28eej5f8phpR25htlFwe1kAjz_G9DsQ4YZ8bZCK9nbIy4ho4Lcps0ndRcpewcxr4zAjwo
- Sedano, K., & Carvajal, Y. (2013). Variabilidad climática, cambio climático y gestión integrada del riesgo de inundaciones en Colombia. *Revista Semillas*, 46–53. Recuperado de https://www.researchgate.net/profile/Alvaro-Avila-Diaz-2/publication/281015880_Variabilidad_climatica_cambio_climatico_y_gestion_integrada_del_riesgo_de_inundaciones_en_Colombia/links/55d5d6e308aec156b9a5ad1c/Variabilidad-climatica-cambio-climatico-y-gestion-integrada-del-riesgo-de-inundaciones-en-Colombia.pdf
- Sedano Cruz, K., Carvajal Escobar Y. (2013). Análisis de aspectos que incrementan el riesgo de inundaciones en Colombia. *Luna Azul*, (37), 219–218. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742013000200014
- Singh, R. K., Kumar Villuri, V. G., Pasupuleti, S., & Nune, R. (2020). Hydrodynamic modeling for identifying flood vulnerability zones in lower Damodar river of eastern India. *Ain Shams Engineering Journal*, 11(4), 1035–1046. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447920300137>
- Tenorio, V., Carmen, M., Edward, A., Aguilar, C., Antonio, J., Sánchez, A., Moral, G., Vergara, C., Ellis, E. A., Alarcón, C., & Galván, U. (2011). La conceptualización de las inundaciones y la percepción del riesgo ambiental. *Política y Cultura*, 36, 45–69. Recuperado de <https://polcul.xoc.uam.mx/index.php/polcul/article/view/1152>
- Varón Gutiérrez, S., & Vargas Cuervo, G. (2019). Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas con la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 152-174. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-215X2019000100152&script=sci_abstract&tlng=es
- Vide, J. P. M. (2009). *Ingeniería de ríos (Vol. 9)*. Universidad Politécnica de Catalunya.