

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA
VICERRECTORÍA DE DOCENCIA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CUENCAS DE LOS RÍOS CORREDOR Y
CAÑO SECO COMO PARTE DE UN ESTUDIO INTEGRAL DE RIESGO DE LA
COMISIÓN NACIONAL DE EMERGENCIAS

KEVIN GONZALO CÉSPEDES GUILLÉN

CARTAGO, 2022

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

A las 11:20 horas del día 22 del mes de junio del año 2023 el estudiante:
Kevin Céspedes Guillén

presenta y defiende su trabajo de graduación titulado:

Modelación Hidrológico de las cuencas de los ríos Corredor y Caño Seco, como parte de un estudio integral de riesgo de la Comisión Nacional de Emergencias.

ante el Tribunal de Evaluación compuesto por los siguientes miembros:

Presidente (a): Ing. Milton Solórzano

Lector (a): Lic. Cristopher Gamboa Monge

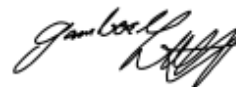
Asesor (a) Externo (a): Lic. Kerin Romero Calvo (en representación de Lidier Esquivel)

Firman conforme lo dispone el Reglamento de Trabajos Finales de Graduación:

MILTON ULISES
SOLORZANO
QUINTANA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
MILTON ULISES
SOLORZANO QUINTANA
(FIRMA)
Fecha: 2023.06.22 11:52:42
-06'00'

PRESIDENTE (A)



LECTOR (A)

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

Firmado digitalmente por
KERIN FABIAN ROMERO
CALVO (FIRMA)
Fecha: 2023.06.22
11:48:10 -06'00'

ASESOR (A) EXTERNA(A)



ESTUDIANTE

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE LAS CUENCA DE LOS RÍOS CORREDOR Y CAÑO
SECO COMO PARTE DE UN ESTUDIO INTEGRAL DE RIESGO DE LA COMISIÓN
NACIONAL DE EMERGENCIAS

Kevin Gonzalo Céspedes Guillén

Informe de Trabajo Final de Graduación presentado a la
Escuela de Ingeniería Agrícola como requisito parcial para
optar al grado de Licenciado en Ingeniería Agrícola

Nombre

Asesor - Lector

Nombre

Director Escuela
Ingeniería Agrícola

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

CARTAGO, COSTA RICA

2022

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico a Dios, por darme la sabiduría y la paciencia para llegar hasta este punto. También va dedicado con mucho amor a mi familia, en especial a mis padres. Mi madre Sonia, por aligerarme el camino para salir adelante y a mi padre, Eduardo, por creer más en mí que yo mismo inclusive.

Agradecimientos

Quiero agradecer al Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Agrícola y profesores, por la formación brindada a lo largo del proceso. Un agradecimiento especial a la Profesora Laura, por su colaboración y al Ing. Christopher Gamboa por la ayudada brindada.

A los amigos que me dejó mi paso por la universidad que han sido una curita cuando las cosas se han puesto difíciles.

A mis amigos de siempre Darío, Warner, Vilma y mi pequeño Maty que sin ustedes la historia se contaría diferente, gracias por enseñarme el verdadero significado de la amistad.

A María Laura, por se la amiga incondicional, por siempre estar, por ayudarme y darme el valor para concluir este proyecto.

Y por supuesto, agradezco a la vida por haber coincidido con Mon, por apoyarme y darme fuerzas para concluir esta etapa. Sos una lucecita en la vida de las personas.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1	CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	- 3 -
1.1	Antecedentes y problemática	- 4 -
1.2	Objetivos	- 6 -
1.2.1	Objetivo general.....	- 6 -
1.2.2	Objetivos específicos	- 6 -
2	CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	- 7 -
2.2	Aplicación de la estadística en la hidrología.....	- 8 -
2.2.1	Periodo de retorno o intervalos de recurrencia	- 8 -
2.2.2	Distribuciones teóricas.....	- 9 -
2.2.3	Pruebas de bondad de ajuste	- 9 -
2.2.4	Comparación estadística de datos	- 10 -
2.2.5	Correlación estadística.....	- 11 -
2.2.6	Regresión lineal	- 11 -
2.3	Cuenca hidrológica.....	- 12 -
2.3.1	Elementos de una cuenca.....	- 12 -
2.3.2	División de una cuenca	- 13 -
2.3.3	Caracterización morfológica de una cuenca	- 14 -
2.4	Precipitación.....	- 22 -
2.4.1	Polígonos de Thiessen	- 22 -
2.4.2	Curvas intensidad-duración-frecuencia	- 22 -
2.4.3	Método de Grobe	- 24 -
2.4.4	Hietograma.....	- 24 -
2.4.5	Método del bloque alterno	- 24 -
2.5	Fuentes de datos en Costa Rica.....	- 24 -
2.6	Precipitación satelital	- 25 -
2.7	Modelo de elevación digital (MED)	- 25 -
2.8	Sistemas de información geográfica (SIG)	- 25 -
2.9	Aplicación de los sistemas de información geográfica en la hidrología.....	- 26 -

2.10	Modelación hidrológica	- 26 -
2.10.1	Número de curva (CN)	- 27 -
2.10.2	Tiempo de concentración.....	- 27 -
2.10.3	Tiempo de retardo	- 28 -
2.10.4	HEC-HMS	- 28 -
3	CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	- 30 -
3.1	Recursos usados	- 31 -
3.2	Caracterización de las cuencas en estudio	- 32 -
3.2.1	Delimitación de las cuencas.....	- 32 -
3.2.2	Cálculo del área, perímetro, índice de forma (f) e índice de compacidad (Kc)-	37
	-	
3.2.3	Elevación promedio, mínima y máxima	- 40 -
3.2.4	Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes	- 42 -
3.2.5	Pendiente de la cuenca.....	- 43 -
3.2.6	Red de drenaje	- 44 -
3.2.7	Perfil longitudinal	- 47 -
3.3	Precipitación.....	- 49 -
3.3.1	Polígonos de Thiessen	- 49 -
3.3.2	Cálculo de la precipitación promedio anual	- 53 -
3.3.3	Análisis de representación de datos de precipitación	- 53 -
3.3.4	Serie anual de precipitación diaria.....	- 54 -
3.3.5	Estimación de eventos extremos de precipitación	- 55 -
3.3.6	Curvas IDT	- 62 -
3.3.7	Hietograma.....	- 63 -
3.4	Modelación hidrológica	- 64 -
3.4.1	Número de curva.....	- 64 -
3.4.2	Tiempo de concentración.....	- 64 -
3.4.3	Tiempo de retardo	- 64 -
3.4.4	HEC – HMS.....	- 65 -
3.5	Descarga de datos satelitales de precipitación	- 71 -

3.6	Comparación estadística de datos	- 73 -
4	CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	- 75 -
4.1	Parámetros morfométricos de las cuencas Río Corredor y Río Caño Seco	- 76 -
4.1.1	Parámetros de forma	- 76 -
4.1.2	Parámetros asociados al relieve	- 79 -
4.1.3	Parámetros asociados a la red de drenaje.....	- 81 -
4.2	Análisis de precipitación	- 85 -
4.3	Modelo hidrológico.....	- 91 -
4.4	Comparación de datos de precipitación	- 94 -
5	CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	- 97 -
5.1	Conclusiones	- 98 -
5.2	Recomendaciones.....	- 99 -
6	CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	- 101 -
7	ANEXOS.....	- 106 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio	- 4 -
Figura 1.2 Ubicación Ciudad Neily	- 5 -
Figura 2.1 Esquema pruebas estadísticas.....	- 10 -
Figura 2.2 División de una cuenca.....	- 14 -
Figura 2.3 Factor de forma	- 16 -
Figura 2.4. Histograma de frecuencia de altitudes.....	- 19 -
Figura 2.5. Curva hipsométrica.....	- 20 -
Figura 2.6. Método de Strahler	- 21 -
Figura 3.1 Herramienta Clip Raster With Polygon.....	- 33 -
Figura 3.2 Herramienta r.fill.dir.....	- 34 -
Figura 3.3 Herramienta r.watershed	- 35 -
Figura 3.4 Herramienta r.watershed	- 36 -
Figura 3.5 Herramienta r.water.outled.....	- 37 -
Figura 3.6 Herramienta r.to.vect.....	- 38 -
Figura 3.7 Herramienta Field Calculator	- 39 -
Figura 3.8 Herramienta Zonal Statistics	- 41 -
Figura 3.9 Herramienta Hypsometry	- 42 -
Figura 3.10 Herramienta Slope.....	- 44 -
Figura 3.11 Fill Sinks (Wang & Liu).....	- 45 -
Figura 3.12 Channel network an drainage basins.....	- 46 -
Figura 3.13 Herramienta Dissolve	- 47 -
Figura 3.14 Herramienta Terrain Profile	- 48 -
Figura 3.15 Herramienta Voronoi Polygons.....	- 50 -
Figura 3.16 Herramienta Clip	- 51 -
Figura 3.17 Zonas de influencia para la Cuenca del Río Caño Seco.....	- 52 -
Figura 3.18 Zonas de influencia para la Cuenca del Río Corredor.....	- 52 -
Figura 3.19 Área comprendida entre las cuencas cubiertas por cada estación	- 54 -
Figura 3.20 New time series - General information	- 56 -

Figura 3.21 New time series - Time Step	- 57 -
Figura 3.22 New time series – Interval	- 58 -
Figura 3.23 Ajuste de series de precipitación a las distribuciones teóricas	- 60 -
Figura 3.24 Histograma densidad de probabilidad por distribución teórica	- 61 -
Figura 3.25 Basin Model Mananger	- 65 -
Figura 3.26 Map Layers	- 66 -
Figura 3.27 Barra de herramientas HEC-HMS	- 66 -
Figura 3.28 Elemento Subbasin	- 67 -
Figura 3.29 Time- Series Data Mananger	- 68 -
Figura 3.30 Componente Time-Series Gage	- 68 -
Figura 3.31 Time window	- 69 -
Figura 3.32 Meteorologic model mananger	- 69 -
Figura 3.33 Specified Hyetograph	- 70 -
Figura 3.34 Control Specifications	- 71 -
Figura 3.35 Iniciar Simulación	- 71 -
Figura 3.36 Selección punto de interés	- 72 -
Figura 3.37 Pagina Giovanni NASA	- 73 -
Figura 4.1 Delimitación de la cuencas y punto de aforo	- 76 -
Figura 4.2 Ubicación de las cuencas y punto de aforo	- 78 -
Figura 4.3 Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la Cuenca del Río Corredor	- 80 -
Figura 4.4 Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la Cuenca del Río Caño Seco .-	- 80 -
Figura 4.5 Orden de drenajes de la Cuenca del Río Corredor (Der) y la Cuenca del Río Caño Seco (Izq)	- 83 -
Figura 4.6 Perfil longitudinal del Río Corredor	- 84 -
Figura 4.7 Perfil longitudinal del Río Caño Seco	- 84 -
Figura 4.8 Registro de precipitaciones máximas diarias en los últimos años de la estación Coto 47	- 86 -
Figura 4.9 Curvas Intensidad - Duración - Periodo de retorno	- 88 -
Figura 4.10 Hietograma para un periodo de retorno de 50 años	- 89 -

Figura 4.11 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T=50 años.	- 92 -
Figura 7.1 Ajuste gráfico de datos a la distribución Gamma.....	- 107 -
Figura 7.2 Ajuste gráfico de datos a la distribución Gumbel.	- 108 -
Figura 7.3 Ajuste gráfico de datos a la distribución Log Normal.....	- 109 -
Figura 7.4 Ajuste gráfico de datos a la distribución Log Pearson III.	- 110 -
Figura 7.5 Ajuste gráfico de datos a la distribución Normal.	- 111 -
Figura 7.6 Ajuste gráfico de datos a la distribución Pearson III.....	- 112 -
Figura 7.7 Curva IDF para T = 2 años.....	- 113 -
Figura 7.8 Curva IDT para T = 5 años.....	- 114 -
Figura 7.9 Curva IDF para T = 10 años.....	- 115 -
Figura 7.10 Curva IDF para T = 15 años.....	- 116 -
Figura 7.11 Curva IDF para T = 25 años.....	- 117 -
Figura 7.12 Curva IDT para T = 100 años.....	- 118 -
Figura 7.13 Hietograma para un periodo de retorno de 2 años.....	- 119 -
Figura 7.14 Hietograma para un periodo de retorno de 5 años.....	- 119 -
Figura 7.15 Hietograma para un periodo de retorno de 10 años.....	- 120 -
Figura 7.16 Hietograma para un periodo de retorno de 15 años.....	- 120 -
Figura 7.17 Hietograma para un periodo de retorno de 25 años.....	- 121 -
Figura 7.18 Hietograma para un periodo de retorno de 100 años.....	- 121 -
Figura 7.19 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 2 años	- 122 -
Figura 7.20 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 5 años	- 122 -
Figura 7.21 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 10 años ...	- 123 -
Figura 7.22 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 15 años ...	- 123 -
Figura 7.23 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 25 años ...	- 124 -

Figura 7.24 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para $T = 100$ años .- 124 -

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1 Áreas de referencia para clasificar una cuenca	- 14 -
Cuadro 2.2 Rango de coeficiente de Gravelius.....	- 16 -
Cuadro 2.3 Rangos aproximados de factor de forma.....	- 17 -
Cuadro 2.4 Pendiente media y tipo de relieve	- 18 -
Cuadro 3.1 Recursos utilizados del Atlas Digital de Costa Rica.....	- 31 -
Cuadro 3.2 Construcción del gráfico de la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes	- 43 -
Cuadro 3.3 Serie de precipitación máxima anual para un periodo de 24 horas de la estación Coto 47	- 55 -
Cuadro 3.4 Prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolgomorov	- 62 -
Cuadro 3.5 Método del bloque alterno	- 63 -
Cuadro 3.6 Serie de precipitación máxima satelital de 24 horas	- 74 -
Cuadro 4.1 Parámetros de forma de las Cuencas del Río Corredor y del Río Caño Seco.....	- 77 -
Cuadro 4.2 Parámetros asociados al relieve	- 79 -
Cuadro 4.3 Parámetros de drenaje en cuencas.....	- 82 -
Cuadro 4.4 Precipitación anual promedio de la Cuenca del Río Caño Seco	- 85 -
Cuadro 4.5 Precipitación anual promedio de la Cuenca del Río Corredor.....	- 85 -
Cuadro 4.6 Precipitación máxima de 24 horas para diferentes periodos de retorno para una distribución Log Pearson III	- 87 -
Cuadro 4.7 Número de curva calculado para las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco-	90
-	
Cuadro 4.8 Tiempo de concentración para las cuencas Río Corredor y Río Caño Seco.....	- 90 -
Cuadro 4.9 Tiempo de retardo para las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco	- 90 -
Cuadro 4.10 Resumen de los datos necesarios para la modelación.....	- 91 -
Cuadro 4.11 Resultados modelación hidrológica	- 92 -
Cuadro 4.12 Estimación de caudales máximos para las cuencas de Río Corredor y Caño Seco. -	94 -
Cuadro 4.13 Cuadro de posición la Prueba U de Mann-Whitney con datos satelitales sin corregir	- 95 -

Cuadro 4.14 Resultado de la Prueba U de Mann-Whitney con datos satelitales sin corregir- 96

-

Resumen

Este proyecto consistió en realizar un modelo hidrológico para las cuencas de los Ríos Corredor y Caño Seco ubicadas en los cantones de Corredores y Coto Brus de la provincia de Puntarenas, respectivamente, el cual es de importancia para la Comisión Nacional de Emergencias pues históricamente se presentan emergencias debido al desbordamiento de los ríos en los poblados de la parte baja de la confluencia de los cauces principales de ambas cuencas, principalmente en Ciudad Neily generando inundaciones.

La caracterización morfométrica y delimitación de la cuenca, fue realizada por medio de sistemas de información geográfica, haciendo uso del software Qgis. Posteriormente se obtuvo la serie de precipitación máxima diaria por medio de la estación meteorológica Coto 47 para el periodo de 1991 al 2021 y con la cual, mediante el software Hydrognomon se estimaron los eventos extremos de precipitación para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años, así mismo se calcularon las Curvas intensidad- duración-frecuencia (IDF) y la ecuación de intensidad para los mismos periodos de retorno. Estos datos permitieron realizar las modelaciones hidrológicas para una condición de humedad antecedente promedio (AMC II) con una duración igual al tiempo de concentración de las cuencas obteniendo como resultado los caudales de 354,6 - 455,6 - 545,2 - 603,4 - 683,5 - 805,0 - 942,8 m³/s para cada periodo de retorno respectivamente.

Finalmente, con el objetivo de determinar si es posible utilizar otra fuente de datos de precipitación máxima diaria como solución a la escasez de este tipo de datos en varios sectores del país, se descargó una serie de precipitación máxima diaria del servidor de la NASA Giovanni, específicamente de la misión TRMM desarrollada para este fin, donde se realizó una comparación estadística contra los datos de la estación en tierra Coto 47 y se concluyó que los datos satelitales requieren un ajuste para ser utilizados.

Palabras clave

Ríos Corredores y Caño Seco, cuenca, modelo hidrológico, sistema de información geográfica.

Abstract

This project consisted of making a hydrological model for the basins of the Corredor and Caño Seco rivers located in the cantons of Corredores and Coto Brus in the province of Puntarenas, respectively, which is of importance to the National Emergency Commission (CNE) since historically they have been emergencies due to river overflows in the towns in the lower part of the confluence of the main channels of both basins, mainly in Ciudad Neily, generating floods.

The morphometric characterization and delimitation of the basin was conducted through geographic information systems, using the Qgis software. Subsequently, the maximum daily precipitation series was obtained through the Coto 47 meteorological station for the period from 1991 to 2021 and with which, using the Hydrognomon software, extreme precipitation events were estimated for return periods of 2, 5, 10, 15, 25, 50 and 100 years, likewise the intensity-duration-frequency curves (IDF) and the intensity equation for the same return periods were calculated. These data allowed to conduct the hydrological modeling for an average antecedent humidity condition (AMC II) with a duration equal to the time of concentration of the basins, obtaining as a result the flows of 354.6 - 455.6 - 545.2 - 603.4 - 683.5 - 805.0 - 942.8 m³/s for each return period, respectively.

Finally, with the objective of determining if it is possible to use another source of maximum daily precipitation data as a solution to the scarcity of this type of data in various sectors of the country, a series of maximum daily precipitation was downloaded from the NASA Giovanni server, specifically from the TRMM mission developed for this purpose, where a statistical comparison was made against the data from the Coto 47 ground station and it was concluded that the satellite data requires an adjustment to be used.

Keywords

Corredores and Caño Seco Rivers, basin, hydrological model, geographic information system.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y problemática

Las cuencas de interés para el presente estudio hidrológico son las que comprenden el Río Corredor y Caño Seco, ambas cuencas están ubicadas en la provincia de Puntarenas, Costa Rica, comprendidas específicamente en los cantones de Corredores y Coto Brus (Figura 1.1). El Río Corredor se extiende a lo largo de 12,53 km mientras el Río Caño Seco, presenta una longitud de 12,38 km. Además, las cuencas que comprenden estos ríos cubren un área de 57,62 km² y 43,82 km² respectivamente.

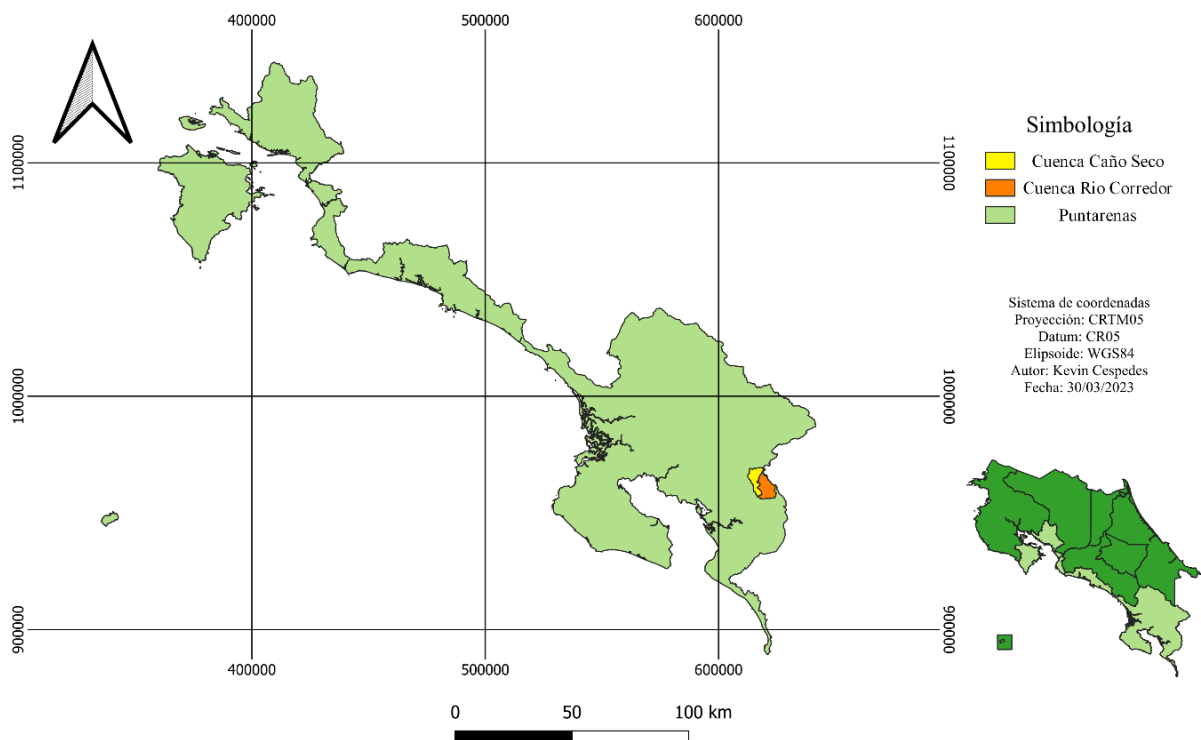


Figura 1.1 Ubicación de la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Históricamente los ríos Corredores y Caño Seco han afectado zonas de los cantones de Corredores y Coto Brus, uno de los poblados que resulta más afectado cuando se presentan precipitaciones extremas es Ciudad Neily, pues se encuentra en la parte baja de la confluencia de ambos ríos como se observa en la figura 1.2 Por ejemplo, en 1998 Ciudad Neily fue

fuertemente afectada por el Huracán Juana, al punto de que los diques que protegían a la ciudad en ese momento cedieron, inundando varias zonas periféricas, dejando un total de 30 muertos y siendo la zona más afectada por la emergencia en aquel momento (O’neal, 2016). De igual forma, han ocurrido eventos más recientes y con un fuerte impacto, en el año 2012, dos horas de lluvia intensa provocaron la inundación del hospital de Ciudad Neily, pues la precipitación superó la capacidad que tenía el hospital de drenar la cantidad de agua que precipitó (Sin Autor, 2012). Por otra parte, en el año 2020 ambos cantones (Coto Brus y Corredores) fueron declarados en alerta roja por las fuertes lluvias en la zona provocando incluso, la ruptura del dique de Ciudad Neily donde posteriormente, el exceso de agua se llevaría totalmente la calle y 3 casas en un barrio de dicha ciudad (Ugarte, 2020). Finalmente en el año 2022 el cuerpo de bomberos, en el sector de la Tarimera (Ciudad Neily) realizaron el rescate de 15 personas, las cuales quedaron atrapadas por las inundaciones provocadas por el desbordamiento de varios ríos (Molina, 2022).

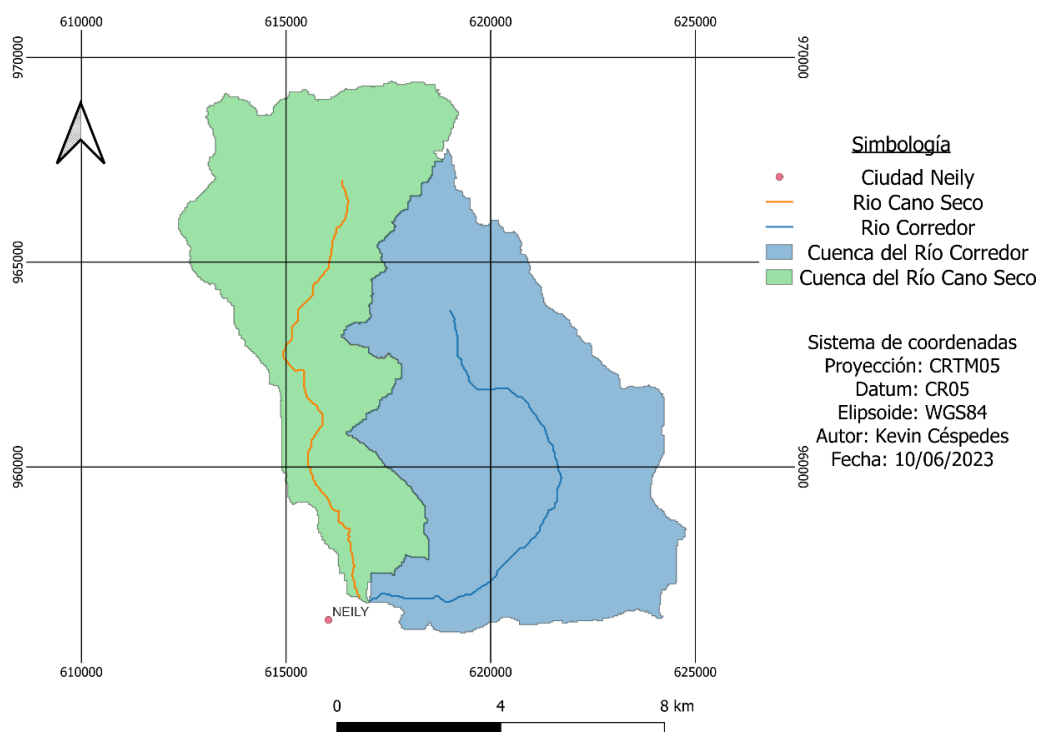


Figura 1.2 Ubicación Ciudad Neily

Fuente: Elaboración propia

Es justamente por la recurrencia de las situaciones de riesgo en la zona, que la Comisión Nacional de Emergencia busca desarrollar una serie de estudios integrales como el expuesto a continuación, que le brinde el criterio técnico para conocer, identificar, dimensionar y valorar los fenómenos y eventos naturales que tienen influencia sobre habitantes o bienes del país para desarrollar medidas que permitan mitigar los efectos negativos que pueden suceder eventualmente.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un modelo hidrológico para las cuencas de los ríos Corredor y Caño Seco, mediante la disponibilidad de datos de precipitación máxima diaria, propios de la zona, que permita la obtención de caudales máximos para diferentes periodos de retorno.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar una caracterización morfológica de las cuencas del Río Corredor y Caño Seco para conocer características relevantes sobre parámetros y procesos hidrológicos presentes en dichas cuencas, mediante sistemas de información geográfica.
- Determinar los eventos extremos de precipitación para diferentes periodos de retorno y caudales máximos mediante un modelo hidrológico para su posterior análisis.
- Comparar estadísticamente la serie de precipitación máxima diaria de la estación meteorológica Coto 47 contra una serie de precipitación máxima diaria descargada directamente del servidor de la NASA Giovanni, específicamente de la misión TRMM, con el fin de determinar la validez del uso de esta fuente de datos de precipitación.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.2 Aplicación de la estadística en la hidrología

Según Zucarelli (2017), se evidencia una creciente limitación del recurso hídrico, tanto en término de cantidad, calidad y frecuencia de ocurrencia. Además, persisten condiciones de exceso que pueden generar situaciones de riesgo. Por consiguiente, es imperativo establecer registros de datos históricos de variables medioambientales, mediciones de caudales de ríos y garantizar la confiabilidad de los datos generados.

Es por ello por lo que la hidrología actúa como ciencia que debe cuantificar una gran cantidad de datos hidrometeorológicos ya sean datos de precipitación, caudal, temperatura o evaporación. En opinión de Villón (2022) los datos que se recopilan representan información en bruto, sin embargo, si estos datos se organizan y analizan correctamente, se transforman en una herramienta útil como criterio de diseño. Para el estudio de esta información, la hidrología utiliza conceptos de probabilidad y estadística, siendo una de las primeras áreas de ciencia e ingeniería en aplicar los conceptos de la estadística para analizar los fenómenos naturales.

2.2.1 Periodo de retorno o intervalos de recurrencia

En ciencias como climatología o hidrología se suelen establecer los riegos a partir de lo que se conoce como periodos de retorno o intervalos de frecuencia, que no son más que la inversa de la probabilidad de ocurrencia de un evento. Por ejemplo, un evento con una probabilidad de $1/100$ o $0,01$ le corresponde un periodo de retorno de 100 años u otro con una probabilidad de $0,2$ pertenece a un periodo de retorno de 5 años. Estas aproximaciones se consideran estadístico-frecuencial ya que, a partir de registros de precipitaciones existentes, se hacen las estimaciones de los periodos de retorno. Por lo general se utilizan las precipitaciones máximas diarias, asegurando la independencia de los sucesos y ajustándose la serie resultante mediante una distribución teórica o distribución de probabilidad de valores máximos (Parra & Vide, 2013).

2.2.2 Distribuciones teóricas

Las distribuciones teóricas existen para representar por medio de un modelo probabilístico el comportamiento de una variable, las cuales varían según el campo de estudio. En caso de la hidrología pueden ser precipitación, caudales, evapotranspiración, temperatura, entre otras (Villón, 2004). Según Gutiérrez (2014) las distribuciones teóricas más comúnmente utilizadas en la hidrología son:

- a) Distribución normal: Es una distribución simétrica, sigue la forma de campana de Gauss. Muchas veces no se ajusta a los datos hidrológicos, sin embargo, tiene una amplia aplicación.
- b) Distribución Log – normal: Este tipo de distribución suele ser muy usada para el cálculo de valores extremos como caudales máximos o mínimos o precipitaciones máximas o mínimas.
- c) Distribución Gumbel: También se conoce como distribución de valores extremos Tipo I. Es muy utilizada para la estimación de valores extremos, comportamientos crecientes y sequías (máximos y mínimos).

Las anteriores como las distribuciones teóricas principales, sin embargo, existen muchas otras que son utilizadas en la hidrología como Pearson Tipo III, Log-Pearson III o la distribución Gamma.

2.2.3 Pruebas de bondad de ajuste

Una prueba de bondad de ajuste es un procedimiento estadístico para probar la hipótesis de que una función de distribución particular ajusta un conjunto de datos observados sin especificar una hipótesis alternativa (Estrada, 2007). Villón (2022) clasifica estas pruebas de la siguiente manera:

- a) Ajuste gráfico: Comparar gráficamente un histograma o la función densidad empírica de la serie de datos, con la función teórica y decidir, de forma visual, si hay o no un ajuste de acuerdo con la similitud.
- b) Prueba chi-cuadrado: Esta prueba se realiza en la función densidad de datos agrupados en intervalos de clases. Es una prueba aplicable solo para los ajustes de

distribución normal ya que fue desarrollada basada en datos normal e independientes.

- c) Prueba Smirnov-Kolmogorov: Esta prueba es aplicable a distribuciones de datos no agrupados, es decir no requiere de los intervalos de clase, además, se puede aplicar a cualquier distribución teórica, sin embargo, posee la desventaja de ser una prueba aproximada y no exacta.

2.2.4 Comparación estadística de datos

Para realizar una comparación de dos o más muestras existen una variedad pruebas estadísticas con diferentes nombres y diferentes requisitos, así lo expresa Reyna (2019) en su trabajo y lo resume en el esquema de la figura 2.1.

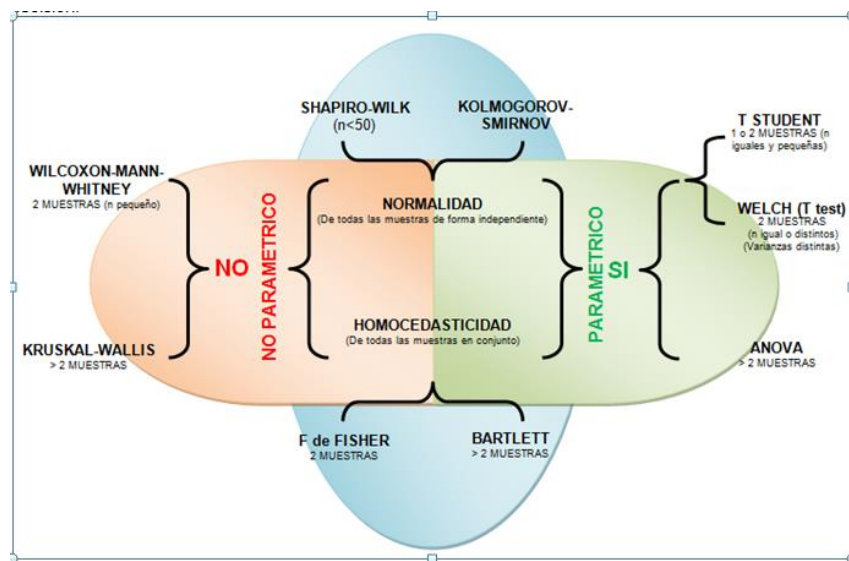


Figura 2.1 Esquema pruebas estadísticas

Fuente: (Reyna, 2019)

Las pruebas paramétricas son aplicadas para un conjunto de datos que tengan un comportamiento normal mientras para las pruebas no paramétricas no precisa cumplir el requisito de la normalidad. Existen algunas pruebas para son empleadas para evaluar la normalidad, tal es el caso de la prueba de Shapiro-Wilk o también la prueba de Kologomorov-Smirnov, en cuanto a las pruebas paramétricas existe la prueba de Welch y el Test ANOVA

mientras que para las pruebas no paramétricas se puede emplear la prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney o la prueba Kruskal-Wallis (Reyna, 2019).

2.2.4.1 Prueba de la U de Mann – Whitney

Para aplicar este método, inicialmente se ordenan los valores de menor a mayor y se asignan los rangos (R). Una vez ordenados se determina el estadístico de contraste de la prueba que es la U de Mann – Whitney, el cual es el valor mínimo de U_1 , U_2 que se obtiene mediante las ecuaciones 1 y 2 (Ortega et al., 2021).

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1 + 1)}{2} - W_1 \quad (1)$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2 + 1)}{2} - W_2 \quad (2)$$

Donde n_1 y n_2 son los tamaños muestrales de cada grupo y W_1 , W_2 son la sumatoria de los rangos de cada grupo. El contraste se realiza con el valor más bajo de la U resultante en la tabla de Mann Whitney (tabla 7.1) para los dos tamaños de muestras correspondientes.

2.2.5 Correlación estadística

En estadística, la correlación es definida como la asociación que hay entre dos o más variables aleatorias y explica parcialmente la variación total de una variable aleatoria respecto a la variación de las otras variables aleatorias involucradas en la ecuación que las asocia (Villón, 2006).

2.2.6 Regresión lineal

Según Smith y Campuzano (2016) los modelos de regresión lineal son uno de los modelos más utilizados en la hidrología, el cual establece una relación lineal ya sea entre dos variables o entre una variable y un grupo de variables. El modelo de regresión lineal es utilizado para múltiples propósitos en la hidrología, por ejemplo, predicciones hidrológicas, relleno, extensión y ajuste de datos, modelamiento hidrológico, análisis de relación de variables, entre muchos otros.

2.3 Cuenca hidrológica

Existen diversas definiciones válidas para el término de cuenca hidrológica, por ejemplo para (Villón, 2022) la cuenca de drenaje de una corriente se refiere al área en la superficie donde se unen todas las aguas caídas por precipitación y que forman un solo curso de agua mientras para Ascencio, Moreno y Gisbert (2011) es el área o superficie de terreno que aporta todas sus aguas de escorrentía a un mismo punto de desagüe o punto de salida. Otra definición es que es todo un sistema complejo donde ocurre el ciclo hidrológico y cuyos elementos naturales, sociales, ambientales económicos, políticos e institucionales son variables en el tiempo y se encuentran en estrecha relación (Vásquez et al., 2016).

2.3.1 Elementos de una cuenca

Una cuenca hidrológica posee diversas funciones, entre ellas, la hidrológica que se trata de captar el agua de las diferentes fuentes de precipitación, la ecológica que promueve el hábitat la flora y fauna, la ambiental que regula la recarga hídrica y los ciclos biogeoquímicos y demás y la función socioeconómica, pues suministra los recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas que dan sustento a la población (Gaspari et al., 2013). En ese sentido, Vásquez et al. (2016) explican en su trabajo que los elementos básicos de una cuenca son los recursos naturales, elementos antropogénicos, elementos institucionales y los aspectos gubernamentales. Haciendo énfasis en los elementos naturales de una cuenca, los más importantes son:

- a) El agua: El agua es el elemento más importante y que integra todos los demás elementos de una cuenca además el que permite el desarrollo de la vida, las actividades productivas, económicas y ambientales. El manejo adecuado de este recurso trae a la población grandes beneficios como agua potable, riego, pesca, producción de energía, actividades industriales, turismo, biodiversidad, entre otra. Por el contrario una mala administración conlleva a erosión, deslizamientos, inundaciones, contaminación, deterioro del medio ambiente, etcétera.

- b) El suelo: El suelo es otro elemento de vital importancia para una cuenca, esto porque si se relaciona adecuadamente con agua de buena calidad favorece la vida humana, animal y vegetal.
- c) El clima: Este elemento define factores como el nivel de temperatura, radiación, horas de sol, precipitación, viento, nubosidad y otros fenómenos climáticos que resultan favorables o adversos para la actividad biológica, productiva, turística, entre otras.
- d) La vegetación: Es un elemento clave en el ciclo hidrológico, debido al tema de evapotranspiración y la acción de protección y amortiguamiento del impacto directo del agua sobre el suelo. También incide en la infiltración del agua en el suelo y la estabilidad de este, además de la captura y almacenamiento de dióxido de carbono.
- e) La topografía y pendiente: Así sean estos elementos en la cuenca influyen en las velocidades que adquiere el agua al discurrir por la superficie. Razón para un aprovechamiento racional del agua y suelo, implementando prácticas de conservación para evitar o disminuir la erosión de los suelos.
- f) Población animal: Otorga condiciones para que la cuenca mantenga un equilibrio.
- g) Recursos naturales que sirven para la actividad no agropecuaria: Se refiere, por ejemplo, al uso del agua y viento para generación de electricidad o al uso de suelo para el establecimiento de ciudades.
- h) El hombre: Es el elemento más importante en una cuenca, ya que es el único con la capacidad de planificar el uso racional de los recursos naturales, llevando a un adecuado aprovechamiento y conservación o por el contrario desperdicio y destrucción.

2.3.2 División de una cuenca

Según Vásquez et al., (2016) una forma de establecer la división de una cuenca es considerar el grado de ramificaciones de los cursos de agua. Por ejemplo, se puede denominar microcuenca a los cursos de agua de primer, segundo y tercer orden, subcuenca a aquellos de cuarto y quinto orden, y finalmente cuenca a los de sexto orden o superiores. El orden de un curso de agua o río se determina a partir del cauce más pequeño, tomando como referencia el *Divortium Acuarum* (Divisoria de agua) como se muestra en la Figura 2.2. Sin embargo, en la

práctica, el grado de ramificaciones puede variar según la magnitud del área. Por tanto, el cuadro 2.1 proporciona áreas de referencia que pueden utilizarse para definir las divisiones de la cuenca.



Figura 2.2 División de una cuenca

Fuente: (Vásquez et al., 2016)

Cuadro 2.1 Áreas de referencia para clasificar una cuenca

Unidad Hidrográfica	Área (miles de ha)
Cuenca	>50
Subcuenca	5-50
Microcuenca	< 50

Fuente: (Vásquez et al., 2016)

2.3.3 Caracterización morfológica de una cuenca

Para caracterizar una cuenca, se deben cuantificar todos los datos que describen la estructura física y territorial con el objetivo de determinar las posibilidades y limitaciones de los recursos naturales además de identificar los problemas presentes y potenciales. La caracterización de una cuenca se inicia con la delimitación, la forma, tamaño o área pendiente

media y pendiente del cauce principal, red de drenaje, entre otros. El determinar estos parámetros sirve de base para determinar la vulnerabilidad y considerar peligros a los desastres (Ordóñez, 2011).

2.3.3.1 Delimitación de una cuenca

Actualmente existen diversas metodologías para delimitar una cuenca siendo la más fundamental aquella que se basa en seguir las líneas del parteaguas, el parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida, llamados estaciones de aforo (Villón, 2004), esta técnica implica trazar una línea imaginaria que separa las cuencas adyacentes y dirige el flujo de agua resultante de la precipitación hacia un punto de salida o aforo en cada sistema de drenaje.

2.3.3.2 Área y perímetro de una cuenca

Existen métodos tradicionales para el cálculo de áreas como el uso de la balanza analítica o el uso del planímetro y el método del mecate o hilo y el uso del curvómetro para calcular el perímetro, actualmente con los avances y el acceso a la tecnología se ha popularizado el uso de SIG para determinar ambos parámetros (Villón, 2022).

2.3.3.3 Índice de compacidad o de Gravelius (K_c)

Es un índice adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca como se muestra en la ecuación 3 (Ordóñez, 2011).

$$K_c = \frac{P}{P_o} \quad (3)$$

Donde K_c representa el Coeficiente de Gravelius, P el perímetro de la cuenca y P_o el perímetro de un círculo de igual área. En el cuadro 2.2 se muestra la forma que posee la cuenca según su coeficiente de Gravelius (K_c).

Cuadro 2.2 Rango de coeficiente de Gravelius

Valor Kc	Forma de la cuenca
1,00	Redonda
1,25	Oval redonda
1,50	Oblonga
1,75	Rectangular oblonga

Fuente: (Ramírez, 2015)

2.3.3.4 Índice o factor de forma de una cuenca (f)

Expresa la relación entre el ancho promedio de la cuenca y su longitud (figura 2.3), teniendo como resultado un factor adimensional. Este factor también es conocido como el factor de forma de Horton y se determina por medio de la ecuación 4 (Ordóñez, 2011).

$$f = \frac{A}{L^2} \quad (4)$$

Donde f es factor de forma de la cuenca, A es Área (km^2) y L es Longitud de la cuenca (km).

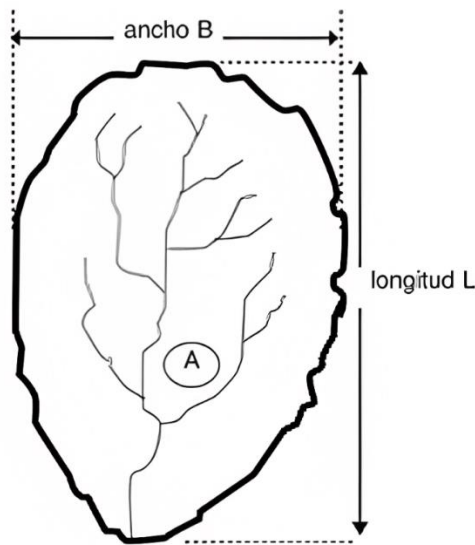


Figura 2.3 Factor de forma

Fuente: (Villón, 2004)

En el cuadro 2.3 se muestra la forma que posee la cuenca según su factor de forma (f).

Cuadro 2.3 Rangos aproximados de factor de forma

Factor de forma (<i>f</i>)	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 a 0,30	Alargada
0,30 a 0,37	Ligeramente alargada
0,37 a 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 a 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 a 0,80	Ensanchada
0,80 a 1,20	Muy ensanchada
>1,20	Rodeando el desagüe

Fuente: (Perez, 1979)

2.3.3.5 Pendiente de la cuenca

La pendiente de la cuenca es un parámetro clave al realizar un estudio pues tiene una importante relación con la infiltración, la escorrentía superficial y humedad del suelo. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje además de tener una relación directa respecto a la magnitud de las crecidas (Villón, 2022). El cuadro 2.4 representa la relación que existe entre la pendiente media de la cuenca y el tipo de relieve predominante.

Cuadro 2.4 Pendiente media y tipo de relieve

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

Fuente: (Ministerio de Ambiente, 2021)

2.3.3.6 Pendiente del cauce

El conocer la pendiente del cauce principal de una cuenca es un parámetro importante en el estudio del comportamiento del recurso hídrico. Por ejemplo, para aprovechamiento hidroeléctrico o solventar problemas causados por inundaciones. La pendiente de un tramo del cauce de un río se puede considerar como el cociente que resulta del dividir el desnivel de los extremos del cauce entre su longitud horizontal (Villón, 2004).

2.3.3.7 Histograma de frecuencia de altitudes

Representa el grado de incidencia de las áreas comprendidas entre curvas de nivel con respecto al total del área de la cuenca (Ordóñez, 2011).

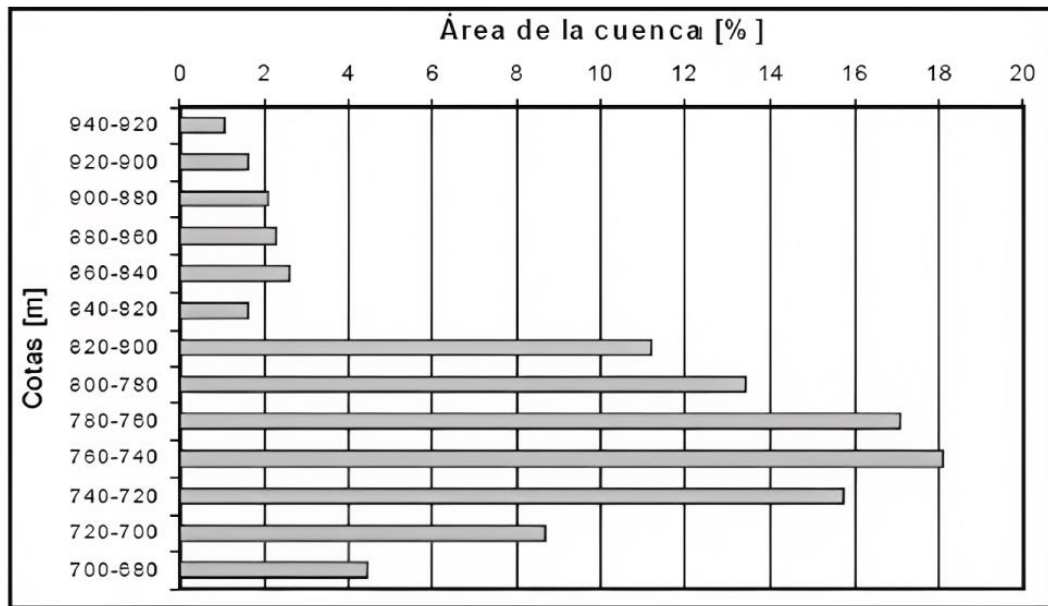


Figura 2.4. Histograma de frecuencia de altitudes

Fuente: (Ordóñez, 2011)

La figura 2.4 representa un ejemplo de histograma de frecuencia de altitudes donde relaciona un eje vertical con cotas contra un eje horizontal con el porcentaje de área de la cuenca sobre esa altitud.

2.3.3.8 Curva hipsométrica

Es una curva representada en coordenadas rectangulares que representa la relación entre la altitud y la superficie de la cuenca que queda sobre esa altitud (Villón, 2022).

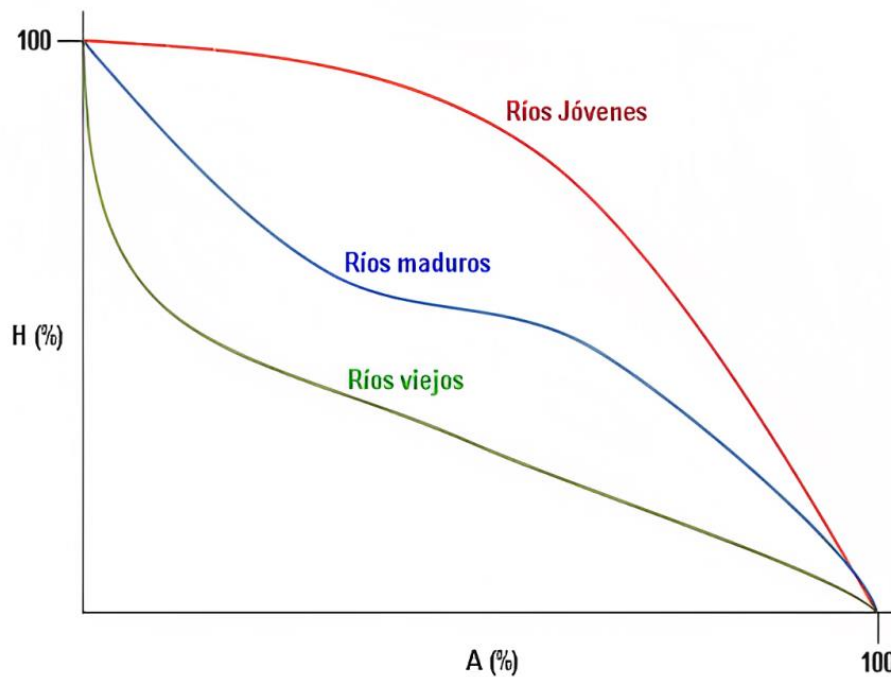


Figura 2.5. Curva hipsométrica

Fuente: (Ordóñez, 2011)

Como se muestra en la figura 2.5, la curva hipsométrica permite además determinar la fase en la que se encuentra el cauce principal de la cuenca, si se trata de ríos jóvenes, maduros o viejos. Asimismo al integrar la curva hipsométrica y el histograma de frecuencia de altitudes, en una sola gráfica como lo indica Villón (2004), se pueden determinar las siguientes altitudes características:

- a) Altitud o elevación media: Ordenada media de la curva hipsométrica, en ella el 50% del área de la cuenca está este situado por encima de esa altitud y el otro 50% por debajo de ella.
- b) Altitud más frecuente: Máximo valor en porcentaje de la curva de frecuencia de altitudes.
- c) Altitud de frecuencia $\frac{1}{2}$: Corresponde al punto de abscisa $\frac{1}{2}$ de la curva de frecuencia de altitudes.

2.3.3.9 Orden de corrientes

El orden de corrientes permite tener un mejor entendimiento de la complejidad y desarrollo de los sistemas de drenaje de una cuenca. Este parámetro se relaciona con el caudal relativo del segmento de un canal (Ordóñez, 2011). Hay varios sistemas de jerarquización siendo el método de Horton y el método de Strahler los más comunes.

El método de Strahler, según la figura 2.6, consiste en que un mismo río puede tener segmentos de distinto orden a lo largo de su curso. El orden no se incrementa cuando a un segmento de un determinado orden confluye con uno de orden menor. Este sistema es el utilizado universalmente en el presente.

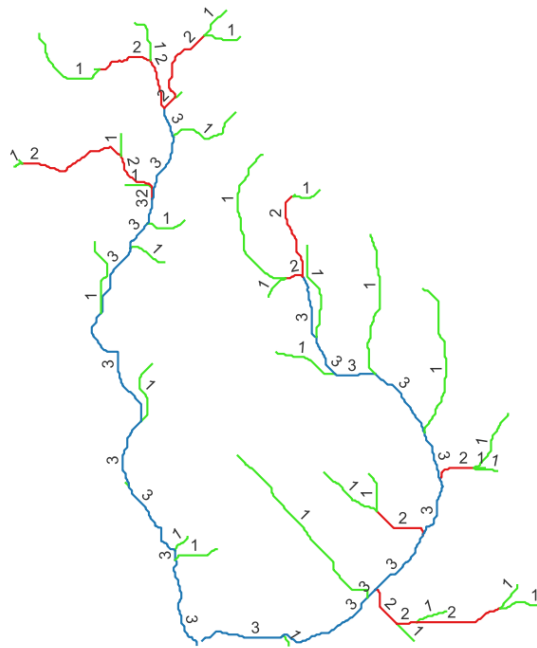


Figura 2.6. Método de Strahler

Fuente: Elaboración propia

2.3.3.10 Densidad de drenaje

La densidad de drenaje influye en la dinámica de la cuenca, la estabilidad de la red y el tipo de escorrentía de la superficie, así como la respuesta de la cuenca a una precipitación. Se define como la relación que existe entre la longitud total de los cursos de agua y su área total (Ordóñez, 2011).

2.4 Precipitación

Según Gutiérrez (2014) la lluvia es la precipitación de partículas líquidas de agua de diámetro mayor a 0.5 mm o de gotas menores pero muy dispersas. Si no alcanza la superficie terrestre no se trata de lluvia sino de virga y si el diámetro es menor sería una llovizna. También se dice sobre la precipitación que es producida cuando las gotas pequeñas que producen las nubes se enfrían produciendo condensación, generando la unión de esas gotas pequeñas y formando gotas de mayor tamaño y peso que terminan precipitándose a la superficie terrestre como consecuencia (Vásquez et al., 2016).

La precipitación es medida en milímetros al año donde menos de 200 son insuficientes, entre 200 y 500 son escasas, entre 500 y 1000 son suficientes, entre 1000 y 2000 son abundantes y más de 2000 excesivas (Gutiérrez, 2014).

2.4.1 Polígonos de Thiessen

El método de Thiessen es uno de los métodos más populares para obtener la precipitación media sobre un área. Es basado en la ponderación del valor de precipitación de cada estación meteorológica según el área de influencia. La precisión de este método se encuentra por encima de métodos como el de la media aritmética (Forero, 2017).

Como parte de sus ventajas el método es de los más aplicados, dada su facilidad y sencillez de aplicación además es aplicable en cuencas con escasa densidad de estaciones pluviométricas. Sin embargo, como desventajas del método es que proporciona una distribución discontinua de las lluvias y no toma en cuenta otro tipo de influencias hidrometeorológicas. Tampoco toma en cuenta la topografía y orografía en las lluvias ni la dirección de los vientos (Gutiérrez Caiza, 2014).

2.4.2 Curvas intensidad-duración-frecuencia

Para Villón (2022) las curvas intensidad-duración-frecuencia, es la representación gráfica que existe entre las variables de intensidad de lluvia (I), la duración de la precipitación (D) y el periodo de retorno (T). Esta relación es representada por medio de la ecuación 5 (Aparicio, 1987).

$$I_{\max} = \frac{KT^a}{D^b} \quad (5)$$

Donde I_{\max} es Intensidad máxima (mm/h), T es el Periodo de retorno (años), D es Duración (minutos) y K , a , b , son parámetros de la ecuación calculados por medio de un análisis de regresión múltiple.

Dado que estas curvas representan las características más relevantes de las tormentas que ocurren en una zona determinada, son usadas principalmente para la predicción de crecientes, ya que se analizan y aplican métodos hidrológicos que transforman la lluvia de diseño (eventos hipotéticos de precipitación críticos según periodo de retorno) en las predicciones que se desean estimar, considerando las condiciones físicas actuales de la cuenca o área de estudio (Suárez-aguilar et al., 2020).

2.4.2.1 Intensidad

La intensidad de precipitación, es la altura de agua que se precipita con respecto al tiempo (Quispe, 2018). Para Villón (2022), la intensidad máxima se refiere a la altura de precipitación máxima referida a una hora de duración. La intensidad máxima es un parámetro indispensable para el cálculo del caudal de diseño (caudales máximos que están en función del periodo de retorno) y su valor siempre se relaciona a una duración.

2.4.2.2 Duración de la lluvia

La duración de la lluvia de diseño se considera, normalmente, igual al tiempo de concentración t_c , esto se debe a que al cabo de dicho tiempo la escorrentía alcanza su valor pico al contribuir toda el área aportante al flujo en la salida del área de drenaje a considerar (Villón, 2022).

2.4.3 Método de Grobe

También conocido como el método de Dick y Peschke, es un método usado para construir curvas de intensidad – duración – periodo de retorno (Villón, 2022). Este modelo es utilizado cuando no se dispone de información pluviográfica, a partir de información pluviométrica, con datos de precipitaciones máximas diarias, mediante la ecuación 6 (Mártinez, 2019).

$$P_d = P_{24h} \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \quad (6)$$

Donde P_d es la precipitación máxima de duración D (mm), P_{24h} es la precipitación máxima de 24 horas (mm) y D es la duración de la precipitación (min).

2.4.4 Hietograma

Para cada curva IDF corresponde un hietograma específico. Un hietograma se refiere a un gráfico que expresa la precipitación en función del tiempo. Un hietograma se refiere a un día o a una tormenta en concreto, específicamente lo que duró la tormenta. Los hietogramas son elementos meteorológicos requeridos para realizar modelaciones hidrológicas (Angulo & Saavedra, 2018).

2.4.5 Método del bloque alterno

Este es uno de los métodos más conocidos para realizar hietogramas, fue propuesto por D.J Keifer y H.H. Chu y lleva el nombre de bloque alterno por la forma que es diseñado. Para determinarlo, los autores obtuvieron las curvas intensidad – duración – frecuencia de la ciudad de Chicago para determinar el hietograma de la tormenta de diseño (Chow et al., 1988).

2.5 Fuentes de datos en Costa Rica

En Costa Rica existen varias instituciones copiladoras de datos hidrometeorológicos tal es el caso del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) que lleva registro de 105 estaciones hidrológicas. El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) se encarga de recopilar datos de

precipitación, temperatura, humedad, radiación solar, entre otros, por medio de 66 estaciones presentes por el país. Otras instituciones que manejan datos de calidad en el país son el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), la Universidad de Costa Rica (UCR) y Acueductos y Alcantarillados (AyA) (Villón, 2022).

2.6 Precipitación satelital

La eficacia de la modelación hidrológica depende de la disponibilidad de los datos de entrada. La tecnología actual permite generar modelos distribuidos los cuales requieren de datos de distribución espacial suficientemente precisos, los cuales son facilitados por sensores satelitales que disponen en tiempo real, información meteorológica (Fernández & García, 2014).

En ese sentido, existen diversos satélites que son utilizados para la descarga de datos de precipitación, entre ellos, uno destacado es la Misión de Medición de Lluvias Tropicales o por sus siglas en inglés, TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), la cual se trata de una misión conjunta entre los Estados Unidos y Japón donde uno de sus principales objetivos es medir lluvias en las regiones tropicales y subtropicales, el cual utiliza un producto llamado 3B42 que contiene una estimación de precipitación en milímetros por hora de sensores infrarrojos fusionados con microondas. Estos datos resultan ser una alternativa de fuente de datos para las cuencas hidrográficas con nulo o poco registro de datos (Gavilan et al., 2019).

2.7 Modelo de elevación digital (MED)

Un modelo de elevación digital se define como una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la elevación del terreno y que gracias a la tecnología pueden construirse por medio de los sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG) o a partir de imágenes satelitales (Peralta et al., 2013).

2.8 Sistemas de información geográfica (SIG)

Según (Olaya, 2014) los sistemas de información geográfica (SIG) se definen según las operaciones que se realizan, las cuales pueden ser de gestión de datos (lectura, edición, almacenamiento), análisis de datos (elaboración de modelos) o generación de resultados (mapas,

informes, gráficos). En ese sentido, un SIG puede definirse como un conjunto de software y hardware diseñado para la adquisición, mantenimiento y uso de datos cartográficos.

También puede decirse de un SIG que es un sistema de información diseñado para el trabajo de datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas, en otras palabras, un SIG se trata tanto de un sistema de base de datos con funciones específicas para datos georreferenciados como un conjunto de operaciones para trabajar con esos datos (Olaya, 2014).

2.9 Aplicación de los sistemas de información geográfica en la hidrología

Los sistemas de información geográfica tienen muchos campos de aplicación, en el caso de la hidrología específicamente en el análisis y gestión de riegos de inundaciones fluviales, abarcan desde aspectos del estudio de la peligrosidad, regionalización de datos de precipitación, obtención de parámetros morfométricos y de la red, discretización de parámetros hidrológicos, delimitación de áreas inundables, mapas de riego hasta adopción de medidas de mitigación de carácter predictivo, preventivo o corrector, que comprenden la predicción meteorológica e hidrológica, el ordenamiento del territorio y los sistemas de aseguramiento, los planes de protección civil y emergencia (Isidro et al., 2009). Actualmente el uso de SIG supone un ahorro de tiempo, esfuerzo y garantiza objetividad y predicción en el desarrollo de los modelos hidrológicos e hidráulico.

2.10 Modelación hidrológica

Los modelos hidrológicos surgen dada la necesidad de estimar las magnitudes de las variables que interviene en el ciclo del agua (Gutiérrez Caiza, 2014). Un modelo hidrológico resulta ser una aproximación de un sistema real y eso es posible dado que el ciclo hidrológico se puede representar como un sistema. Un modelo hidrológico puede ser de dos clases, físico o abstracto. En hidrología se utiliza principalmente el modelo abstracto o matemático, el cual consiste en una ecuación que relaciona variables de entrada y salida del sistema. De forma práctica, la importancia de un modelo matemático es que conociendo las entradas y estudiando cómo se comporta el sistema, es posible predecir su salida (Vásquez et al., 2016).

2.10.1 Número de curva (CN)

El número de curva es un parámetro que representa las características medias del complejo suelo-vegetación, estando relacionado con el estado de humedad del suelo, el uso de suelo y las prácticas de manejo (Riccardi, 2004).

2.10.2 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración, también conocido como tiempo de respuesta o tiempo de equilibrio se define según Vélez & Adriana (2011) como el tiempo requerido para que, durante una tormenta, se alcance el estado estacionario; es decir, el tiempo necesario para que todo el sistema (toda la cuenca) contribuya de manera eficaz a la generación de flujo en el sitio de desagüe. Se puede calcular mediante varias ecuaciones, entre ellas las ecuaciones empíricas 7, 8 y 9, cuyos autores formularon a partir de características morfológicas y geométricas de una cuenca (Villón, 2022).

a) Fórmula de Kirpich

$$T_c = 0.0195 \left(\frac{L_r}{H} \right)^{0.385} \quad (7)$$

Donde T_c es Tiempo de concentración en minutos, L_r es la longitud del cauce principal en metros, y H : es la diferencia de elevación en metros.

b) Fórmula Californiana

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L_r}{J^{1/2}} \right)^{0.77} \quad (8)$$

Donde T_c es Tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal en kilómetros y J es la pendiente del cauce principal en metros sobre metros.

c) Fórmula Giandotti

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{25.3\sqrt{JL}} \quad (9)$$

Donde T_c es tiempo de concentración en horas, L es la longitud del cauce principal en kilómetros, J es la pendiente del cauce principal en metros sobre metros y A es la superficie de la cuenca (km^2).

2.10.3 Tiempo de retardo

El tiempo de retardo es una variable estimada a partir del tiempo de concentración y se calcula por medio de la ecuación 10 (Villón, 2014).

$$T_{lag} = 0.6 * T_c \quad (10)$$

Donde T_{lag} es tiempo de retardo en horas y T_c es tiempo de concentración en horas.

2.10.4 HEC-HMS

Según (Villón, 2014) el sistema de modelado hidrológico HEC-HMS (“Hydrologic Modeling System”) es un software para el modelado hidrológico desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (“Hydrologic Engineering Center – US Army Corps). Con este modelo se puede simular la respuesta de una cuenca de un río en su escurrimiento superficial como resultado de una precipitación, por medio de la representación de la cuenca de como un sistema interconectado de componentes hidrológicos e hidráulicos.

2.10.4.1 Componentes de un proyecto en HEC-HMS

Un proyecto realizado en HEC-HMS cuenta con varios componentes, que en su conjunto forman el modelo completo de la cuenca. Varona (2018) describe los componentes de la siguiente forma:

- a) Modelo de la cuenca (*Basin Model*): Es una representación física de la cuenca, el usuario desarrolla el modelo de la cuenca agregando y conectando elementos hidrológicos como la subcuenca (*Subbasin*), tramo del cauce (*Reach*), la salida o punto de aforo (*Sink*), entre otros elementos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos que ocurren en la cuenca.
- b) Modelo meteorológico (*Meteorological Model*): En este componente se asocian los registros de las estaciones meteorológicas con las subcuencas correspondientes, también se introducen los datos de precipitaciones, ya sean reales, teóricos o tormentas de diseño.
- c) Especificaciones de control (*Control Specifications*): En este componente se indica cuando se inician y terminan los cálculos, además de los incrementos de tiempo con los que se realizan los cálculos. En otras palabras, en este componente se indican los tiempos de simulación y optimización.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Recursos usados

Para realizar la caracterización de las cuencas de los ríos Caño Seco y Corredor mediante SIG se hizo uso de Qgis. Para ello se requiere de una importante cantidad de información espacial de la zona, como un modelo de elevación digital e información ríos y cuencas. Para efectos de este proyecto se optó por utilizar el Atlas digital de Costa Rica 2014 como la fuente más reciente y con datos propios del país, el cual es de acceso público en la red, y se trata de un repositorio que posee una gran cantidad de información espacial del país en formatos ráster y vectorial.

En el cuadro 3.1 se muestran el nombre de los archivos utilizados de dicho repositorio y una breve descripción de su contenido.

Cuadro 3.1 Recursos utilizados del Atlas Digital de Costa Rica

Nombre	Formato	Descripción
Cuenca_CRTM05	Vectorial	Delimitación de 22 cuencas y subcuencas hidrográficas en el territorio nacional.
Ríos_CostaRica_CRTM05	Vectorial	Capa temática de los principales ríos y quebradas de Costa Rica
Estaciones_meteor_crtm05	Vectorial	Ubicación de las principales estaciones meteorológicas de temperatura y precipitación.
Suelos_Subordenes_CostaRica2013	Vectorial	Mapa digital de suelos, órdenes y subórdenes de Costa Rica.
Cober2005crtm05	Vectorial	Capa de la cobertura de Costa Rica.

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al modelo de elevación digital (MED), sabiendo que la elevación, cobertura, y uso de suelo es muy variable se optó por el uso de un MED proveniente de satélite, específicamente descargado de la plataforma de Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del satélite SRTM cuya resolución es aproximada de 30 metros (EROS, 2018).

3.2 Caracterización de las cuencas en estudio

Los parámetros morfométricos fueron calculados en su mayoría haciendo uso del software Quantum Gis o como se conoce actualmente, Qgis. Este software es de descarga libre y de código abierto, el cual permite la edición, manipulación y creación de archivos ráster y vectorial que contenga información espacial además permite la creación de mapas con datos de interés.

3.2.1 Delimitación de las cuencas

Es importante aclarar que la caracterización morfométrica se realiza tanto para la Cuenca del Río Caño Seco como para la Cuenca del Río Corredor, sin embargo, dado que el procedimiento de caracterización y delimitación es el mismo, se describe a continuación el procedimiento solamente para la Cuenca del Río Caño Seco.

Inicialmente se descargaron del Atlas digital de Costa Rica, las capas de interés necesarias para desarrollar el trabajo, en este caso fueron las capas Cuencas_CRTM05 y Ríos_CostaRica_CRTM05 además se descargó de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos un modelo de elevación digital (MED) de la zona de estudio.

Posteriormente se cargaron las capas de Cuencas_CRTM05 y Ríos_CostaRica_CRTM05 al software Qgis mediante la opción *Open Data Source Manager* y seleccionando la opción de *vector*. Una vez que se cargaron las capas, se requirió conocer en cual cuenca están ubicados los ríos de estudio, para ello, estando posicionados sobre la capa de ríos, se busca la opción de *Open Attribute Table* y se seleccionó la opción *Select features using an expression* de esta forma, se abre una ventana donde se escribió una expresión, en este caso "NOMBRE" = 'RIO CANO SECO' y se seleccionó el botón *Select Features*. Una vez realizado el procedimiento anterior, se guardó la selección del río que se hizo dando clic derecho sobre la capa de ríos, seleccionado la opción *Export* y *Save Selected Features As*.

En este punto, se desactivó la capa de Ríos_CostaRica_CRTM05 y se dejaron activas las capas de Cuencas_CRTM05 y la de los ríos generadas anteriormente. De esta forma permitió visualizar la cuenca en la que están contenidos los ríos en estudio. Mediante la opción *Identify Features* se conocieron los datos de dicha cuenca. Haciendo uso de la opción *Select Features*

by area or single click se seleccionó la cuenca de interés y se guardó como una nueva capa mediante el método de exportación antes explicado.

Una vez obtenida la cuenca de interés, fue posible delimitar el modelo de elevación digital a esta cuenca. Para ello mediante la opción *open data source manager* y seleccionando *Raster* se cargó el MED descargado. La delimitación del modelo de elevación digital (MED) se logró mediante la herramienta *Clip raster with polygon* (figura 3.1) que se encuentra en la opción *Processing/Toolbox*, la cual permite un recorte de una capa ráster por medio de una capa vectorial.

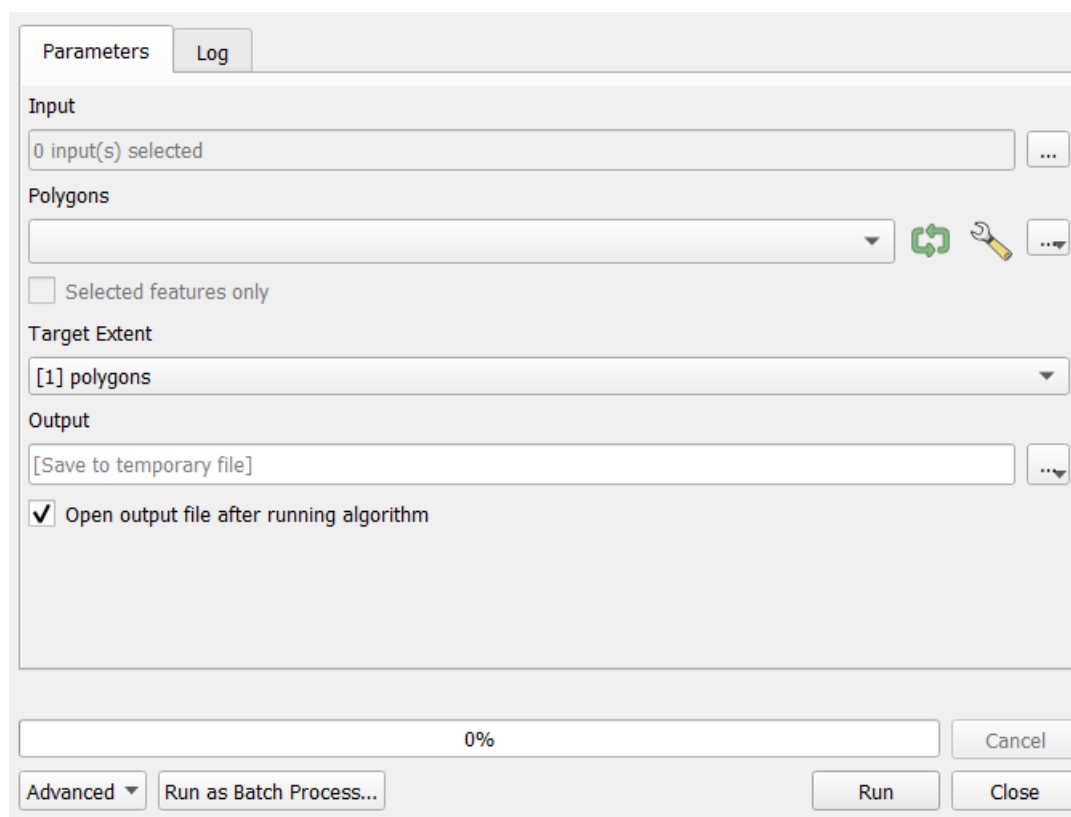


Figura 3.1 Herramienta Clip Raster With Polygon

Fuente: Elaboración Propia

Según la figura 3.1 para el *Input* se seleccionó la capa MED, en *Polygon* la capa de la cuenca donde se encuentra contenidos los ríos de interés y el *Output*, en la opción de los tres puntos, la ubicación de la capa del MED recortada a esa cuenca cuya extensión es *.sdatt*.

Una vez que se obtuvo la capa MED recortada, se tuvo que procesar mediante la herramienta *r.fill.dir* para generar una capa de elevación sin depresiones (figura 3.2). Esta herramienta se encuentra en la opción *Processing/Toolbox*.

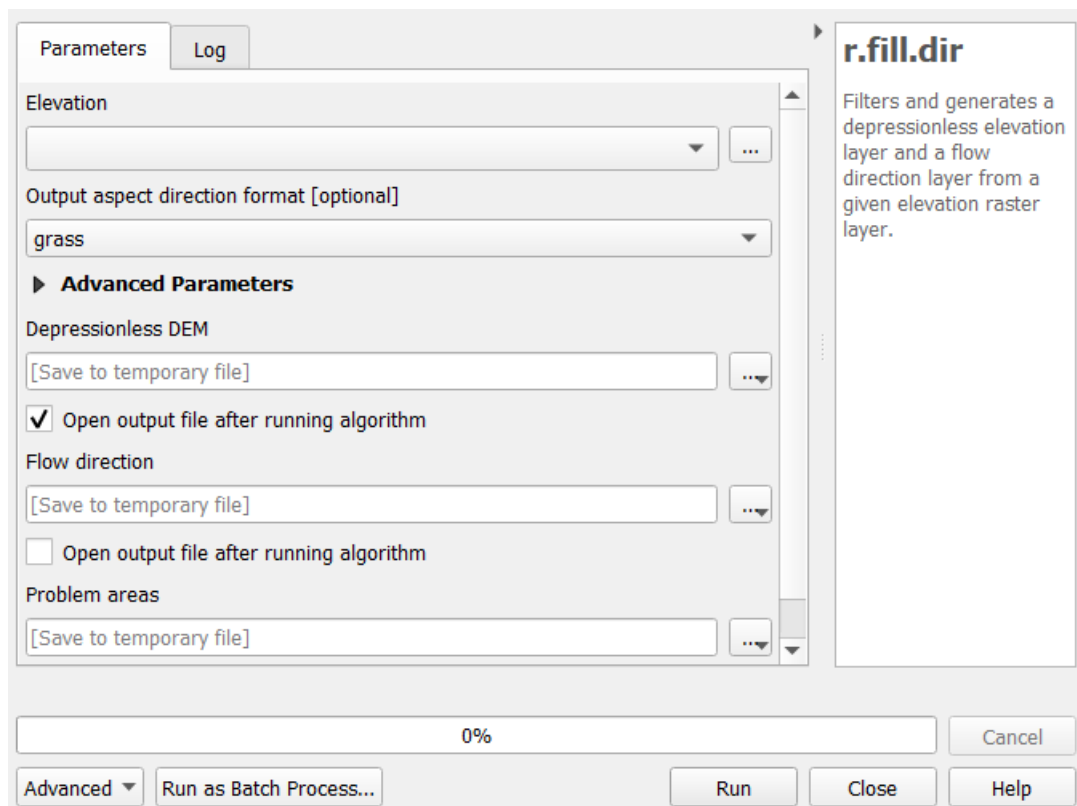


Figura 3.2 Herramienta *r.fill.dir*

Fuente: Elaboración propia

En la opción *Elevation* se ingresó la capa recortada del MED de la cuenca, para *Depressionless DEM* se seleccionó la opción de los tres puntos suspensivos y se busca una carpeta para guardar el archivo MED sin depresiones de la cuenca, la cual es la capa de salida. Las demás funciones como la dirección del flujo y áreas con problemas no son requeridas, por lo que se procedió a desmarcarlas.

Seguidamente haciendo uso de otra herramienta, está llamada *r.watershed* (figura 3.3) se busca crear una serie de archivos útiles a lo largo de todo el proyecto y para delimitar las cuencas

propias de los ríos de interés. Al igual que las herramientas anteriores, está contenida en las opciones *Processing/Toolbox*.

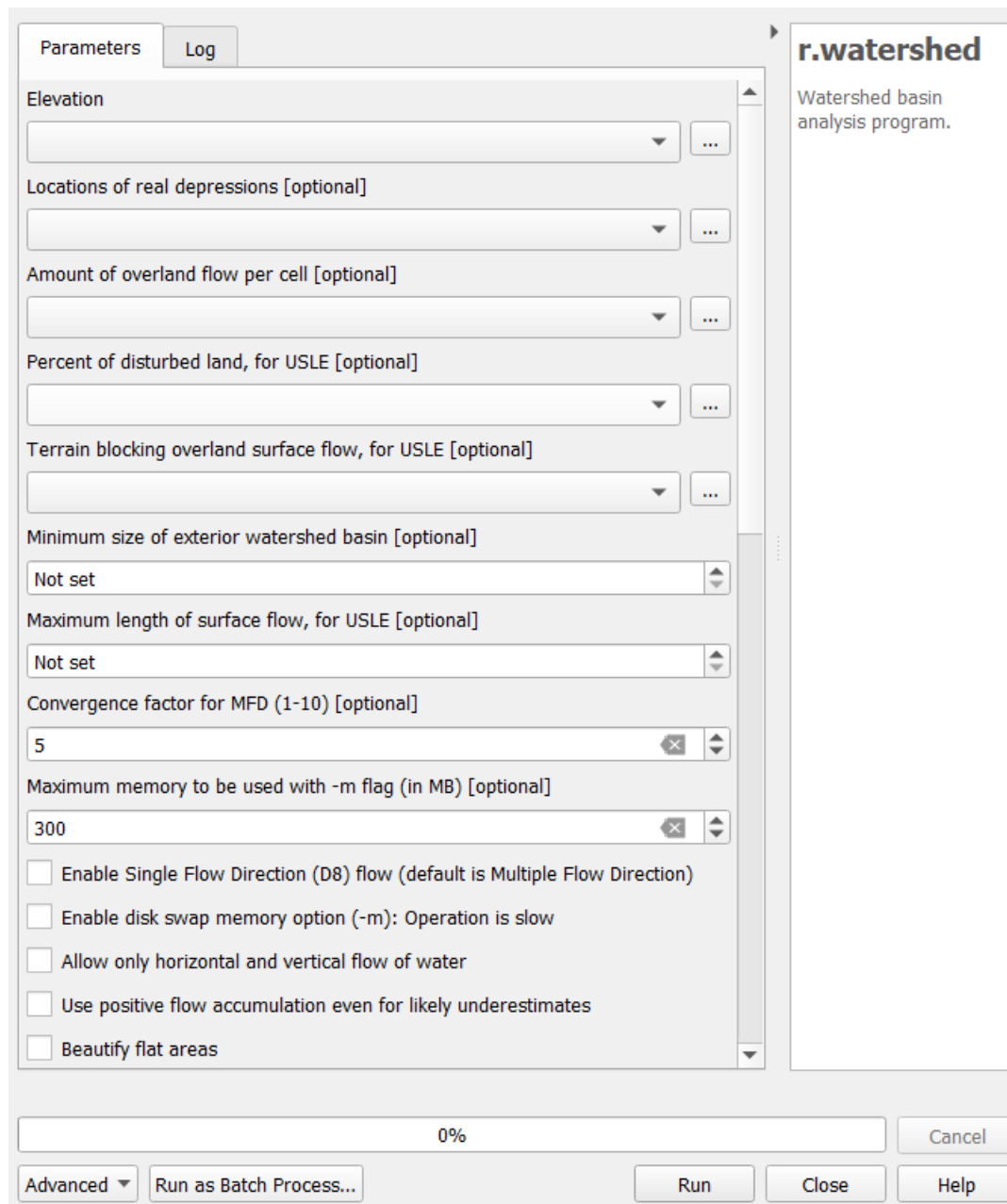


Figura 3.3 Herramienta r.watershed

Fuente: Elaboración propia

En esta primera mitad de opciones que ofrece la herramienta, se seleccionó en *Elevation* el MED sin depresiones de la cuenca. En *Minimum size of exterior watershed basin* se ingresó el valor de 10000, dicho valor refleja la cantidad de píxeles que delimitan la cuenca el cual, puede variar según la necesidad del usuario. Todas las demás pestañas son opcionales y para efectos de este proyecto no son requeridas por lo que se dejaron por defecto, únicamente la opción *Allow only horizontal and vertical flow water* fue activada.

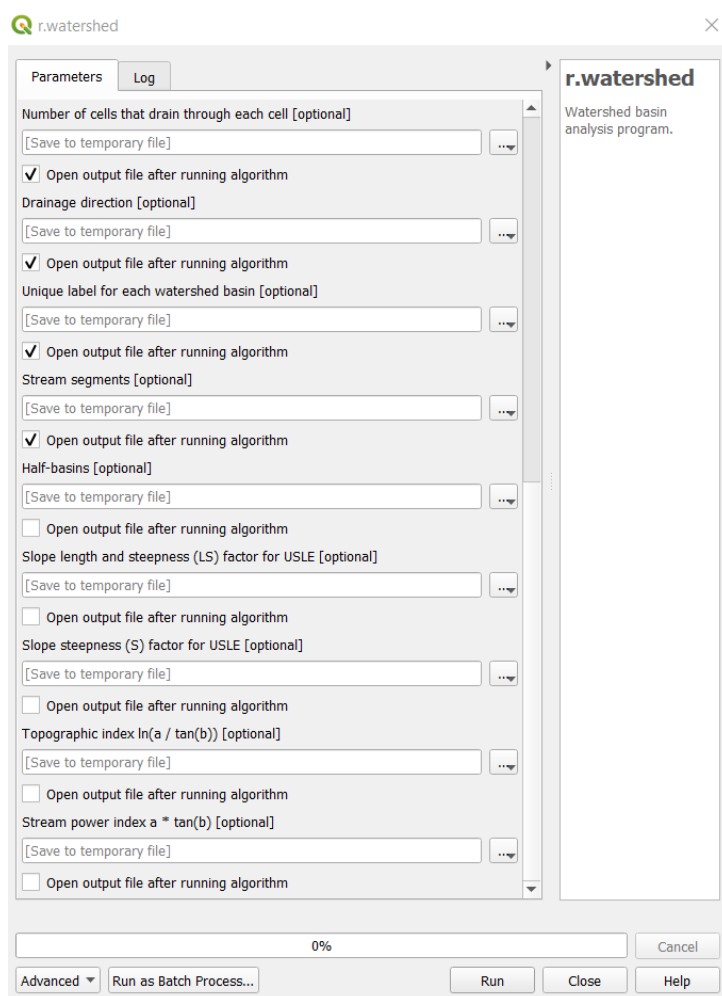


Figura 3.4 Herramienta r.watershed

Fuente: Elaboración propia

Por último, se desmarcaron las opciones según la figura 3.4 y para las demás se seleccionó una ruta para guardar los archivos que se querían generar. Dichos productos son

requeridos para finalizar la delimitación de las cuencas de interés por medio de la herramienta `r.water.outled` (figura 3.5).

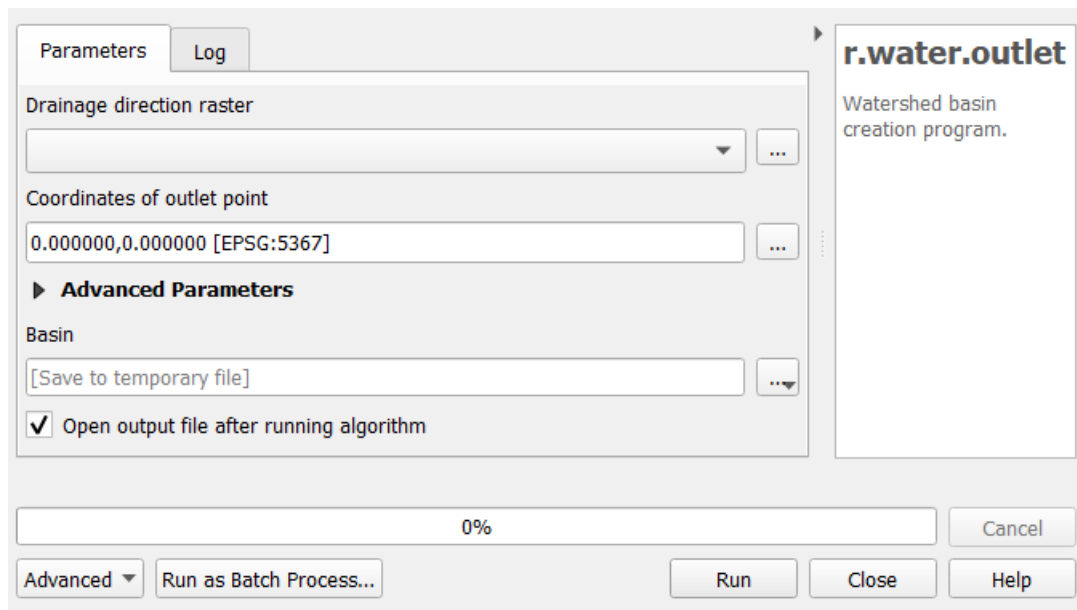


Figura 3.5 Herramienta `r.water.outled`

Fuente: Elaboración propia

Para la opción *Drainage dirección raster* se seleccionó el archivo generado con la herramienta anterior en la opción *Drainage direction*. En *Coordinates of outlet point*, en el botón de tres puntos, es posible seleccionar en la red de drenaje el punto de aforo para el río, se hace un aumento sobre la red y se seleccionan las coordenadas del píxel haciendo un clic sobre él. Por último, en la opción *Basin* se seleccionó la ubicación del archivo generado, dicho producto corresponde finalmente a un archivo tipo ráster de la cuenca delimitada.

3.2.2 Cálculo del área, perímetro, índice de forma (f) e índice de compacidad (Kc)

Dado que mediante la delimitación de la cuenca por el proceso anterior se obtuvo un archivo en formato ráster, se realizó un procedimiento para convertirlo en un vector, mediante la herramienta `r.to.vect` (figura 3.6).

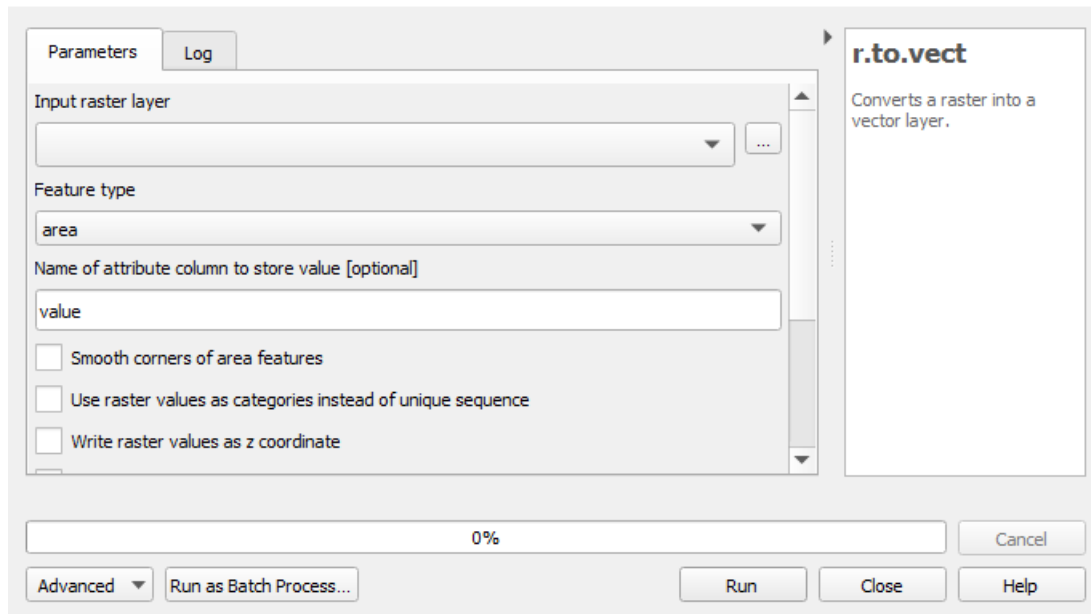


Figura 3.6 Herramienta r.to.vect

Fuente: Elaboración propia

En *Input raster layer* se seleccionó la capa ráster, en *Feature type* el tipo de objeto, el cual corresponde a área y el resto de las opciones para efectos de la operación se pueden dejar por defecto hasta en la opción *vectorized* se seleccionó la ubicación del archivo de salida vectorizado.

Una vez terminado el proceso anterior, se seleccionó en la ventana de *layers* la capa que se creó anteriormente. Posterior a esto se abrió la opción de *Open field calculator* (figura 3.7) después de haber seleccionado la opción *Toggle editing*.

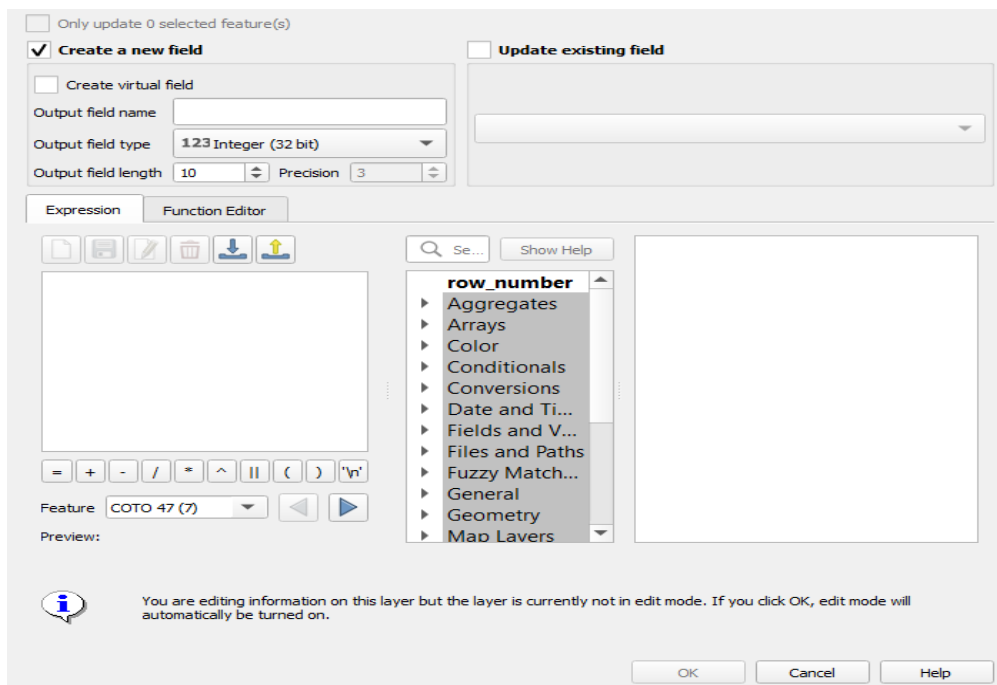


Figura 3.7 Herramienta Field Calculator

Fuente: Elaboración propia

Esta herramienta permitió el cálculo de varias variables, en este caso, el área. Para que este dato apareciera en la tabla de atributos se mantuvo seleccionada la opción *Create a new field*, y en el campo *Output field name* el nombre de la variable que se está calculando. En la opción *Output field type* se seleccionó *Decimal number*. En la ventana que se encuentra debajo de estas opciones se escribió la expresión usada para calcular el área de la cuenca en km^2 , en este caso la expresión fue $\$area / 1000000$.

El perímetro fue calculado siguiendo los mismos pasos para el cálculo del área, mediante la herramienta *field calculator*. La única diferencia fue la expresión utilizada, la cual es representada en km mediante $\$perimeter / 1000$.

Para el cálculo del índice de forma de la cuenca de estudio, fue necesario primero el cálculo del ancho (*B*) y la longitud (*L*) de esta. Estos valores se estimaron mediante la herramienta *Measure line* seleccionando la mayor longitud y el mayor ancho de la cuenca. Los valores fueron anotados para luego pasarlos a la tabla de atributos seleccionando la opción *Open attribute table*, donde se seleccionó la opción *Toggle editing mode*, lo que activo la opción *New*

field donde se escribió el nombre (*B* o *L*), tipo (Decimal) y el tamaño (10). De esta forma se ingresó el valor de *B* y *L* a la tabla de atributos de la cuenca.

Después, realizando el mismo procedimiento que el usado anteriormente por medio de la herramienta *Field calculator* para el cálculo de área y perímetro, se ingresó la expresión $(L * B) / (L ^ 2)$ esto según la ecuación 4.

Al igual que los parámetros anteriores, el índice de compacidad (*Kc*) fue calculado mediante la herramienta *field calculator* por medio de la expresión $0.28 * \$perimeter / sqrt(\$area)$ siguiendo la ecuación 3.

3.2.3 Elevación promedio, mínima y máxima

Una vez que se obtuvo el MED sin depresiones en formato vectorial de la cuenca por medio de la herramienta r.to.vect, se procede a utilizar la herramienta llamada *Zonal Statistics* (figura 3.8) disponible en *Processing/Toolbox*.

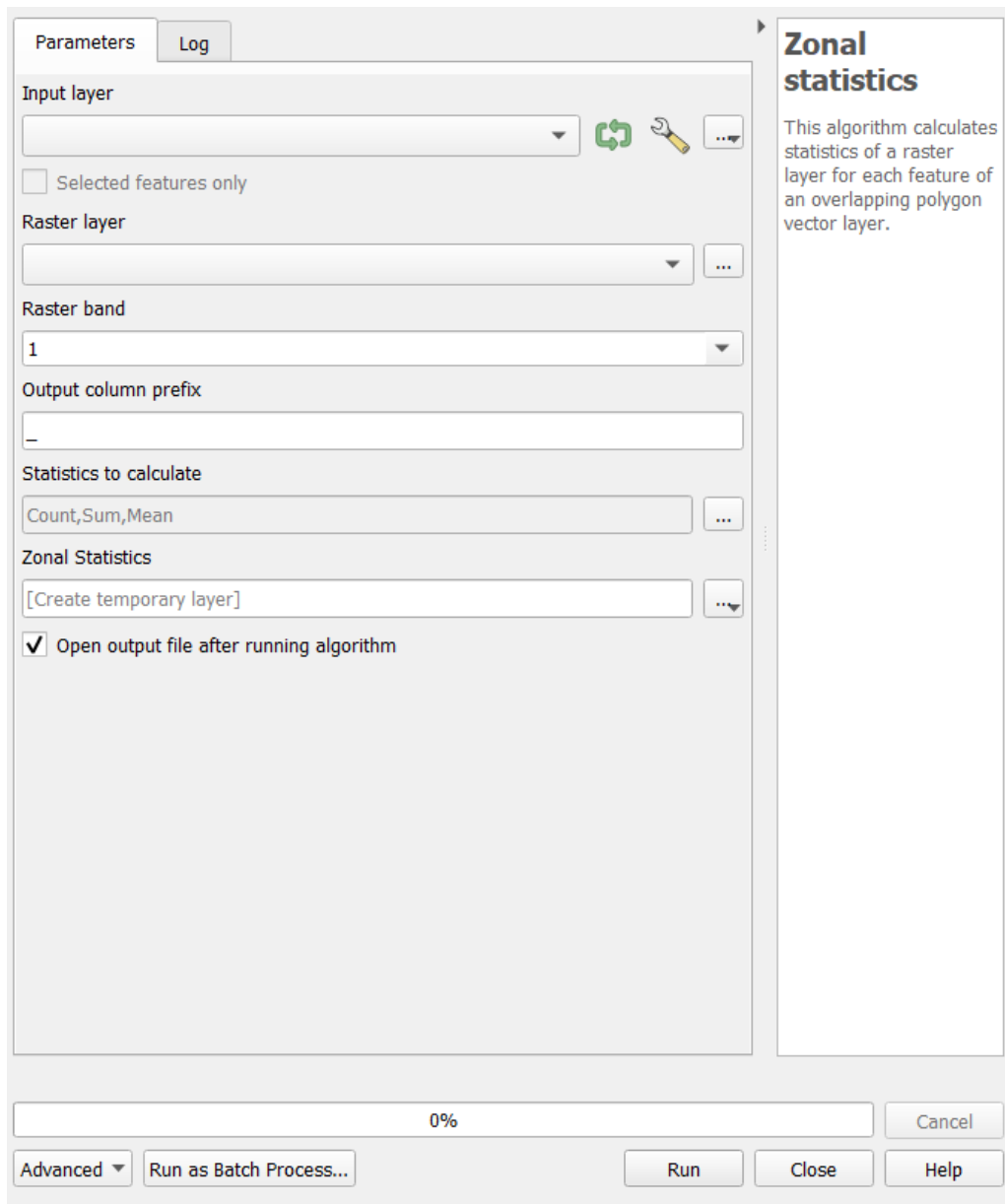


Figura 3.8 Herramienta Zonal Statistics

Fuente: Elaboración propia

En la opción *Input layer* se seleccionó la capa vectorial de la cuenca, en *raster layer* el MED de la cuenca sin depresiones realizado anteriormente en formato ráster, en *Output column prefix* se colocó Elev_ y en *Statistics to calculate*, se seleccionaron las opciones de *Mean*,

Maximum y *Minimum*. Por último, en *Zonal statistics* se buscó la ubicación para el archivo generado.

3.2.4 Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes

Para el cálculo de los valores para la construcción del gráfico de la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes, se utilizó la herramienta *Hypsometry* (figura 3.9) disponible en la opción de *Processing/toolbox*.

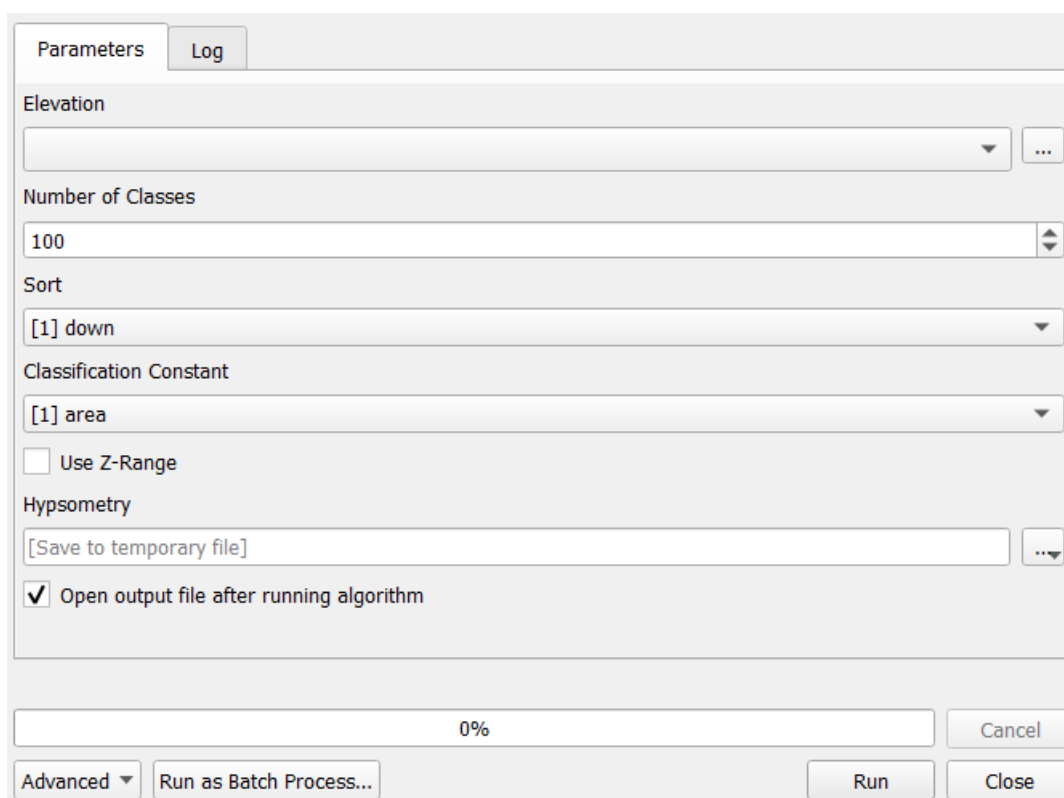


Figura 3.9 Herramienta Hypsometry

Fuente: Elaboración propia

En la opción de *Elevation* se seleccionó el MED para la cuenca de estudio recortado anteriormente. En *Number of classes* se digita la cantidad de clases en que se dividirá la cuenca, para este caso se utilizaron 100, pero esto puede depender de la precisión deseada. *Sort* se refiere al orden de los resultados de salida, en este proyecto se utilizó *down*. Para la pestaña

Classification Constant, se seleccionó una variable de referencia para ordenar los resultados, en este caso, se clasificó mediante la opción *height*. La opción *Use Z-Range* se mantuvo activada. Por último, en la opción *Hypsometry* se buscó la ubicación para guardar el archivo dbf resultante. Dicho archivo posee información de áreas parciales y altitudes de la cuenca, dicha información se trabajó en la herramienta de Excel mediante la construcción del cuadro 3.2.

Cuadro 3.2 Construcción del gráfico de la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes

Altitud (m.s.n.m)	Área parcial (km ²)	Área acumulada (km ²)	Áreas sobre las altitudes (km ²)	Porcentaje del área total (%)	Porcentaje del total sobre la altitud (%)
----------------------	------------------------------------	---	--	----------------------------------	---

Fuente: Elaboración propia

Las columnas de altitud y área parcial se obtuvieron del archivo generado anteriormente. El área acumulada corresponde a la suma sucesiva de áreas parciales. El área sobre las altitudes corresponde a la resta del área total y cada una de las áreas acumuladas. La columna del porcentaje del total se obtiene al dividir cada área sobre el área total y multiplicando el resultado por cien. Finalmente, el porcentaje del total sobre la altitud se calcula mediante la división de cada valor de área sobre la altitud entre el total del área y multiplicando el resultado por cien.

Una vez completado el cuadro 3.2, se graficó para la curva hipsométrica, la altitud en el eje de las ordenadas y las áreas sobre las altitudes en el eje de las abscisas. En el mismo gráfico y en el eje de las abscisas, se graficó el porcentaje del total para obtener las frecuencias de altitudes.

3.2.5 Pendiente de la cuenca

Inicialmente, para el cálculo de la pendiente de la cuenca, fue necesario utilizar la herramienta *Slope* (figura 3.10) disponible en la opción *Processing/Toolbox*.

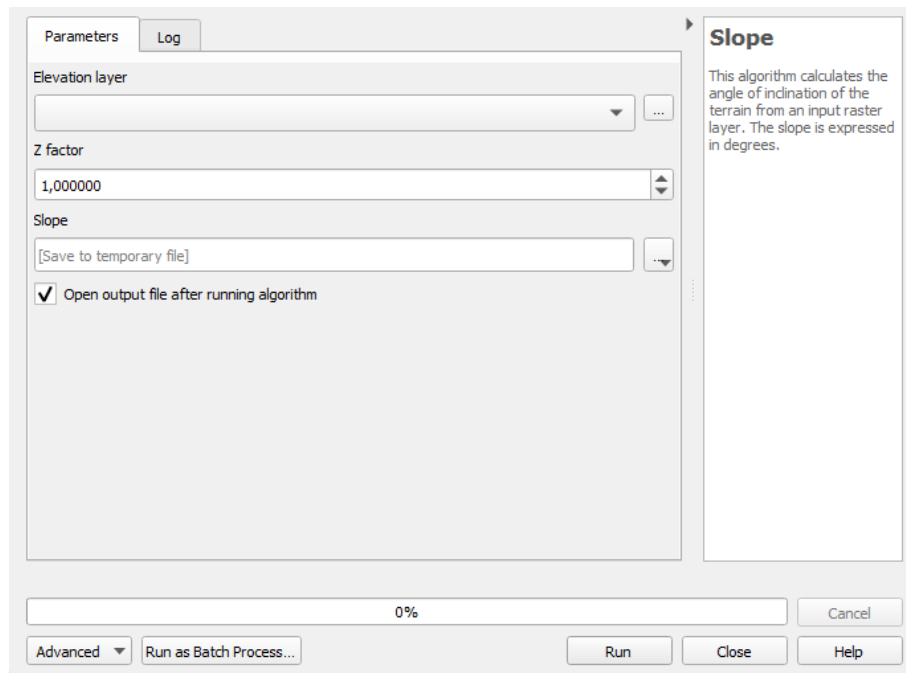


Figura 3.10 Herramienta Slope

Fuente: Elaboración propia

En *Elevation layer* se ingresó el MED de la cuenca de estudio y en la opción *Slope* la ubicación del archivo ráster de salida. Posteriormente, mediante el uso de la herramienta *Zonal Statistics* y siguiendo los mismos pasos anteriormente mencionados en el cálculo de elevaciones, utilizando el archivo ráster generado, se calculó la pendiente media, máxima y mínima.

3.2.6 Red de drenaje

Para determinar este parámetro se utilizó el módulo de geoprocésamiento para el análisis de terreno *Fill sinks* (Wang & Liu) (figura 3.11) disponible en la opción *Processing/Toolbox*.

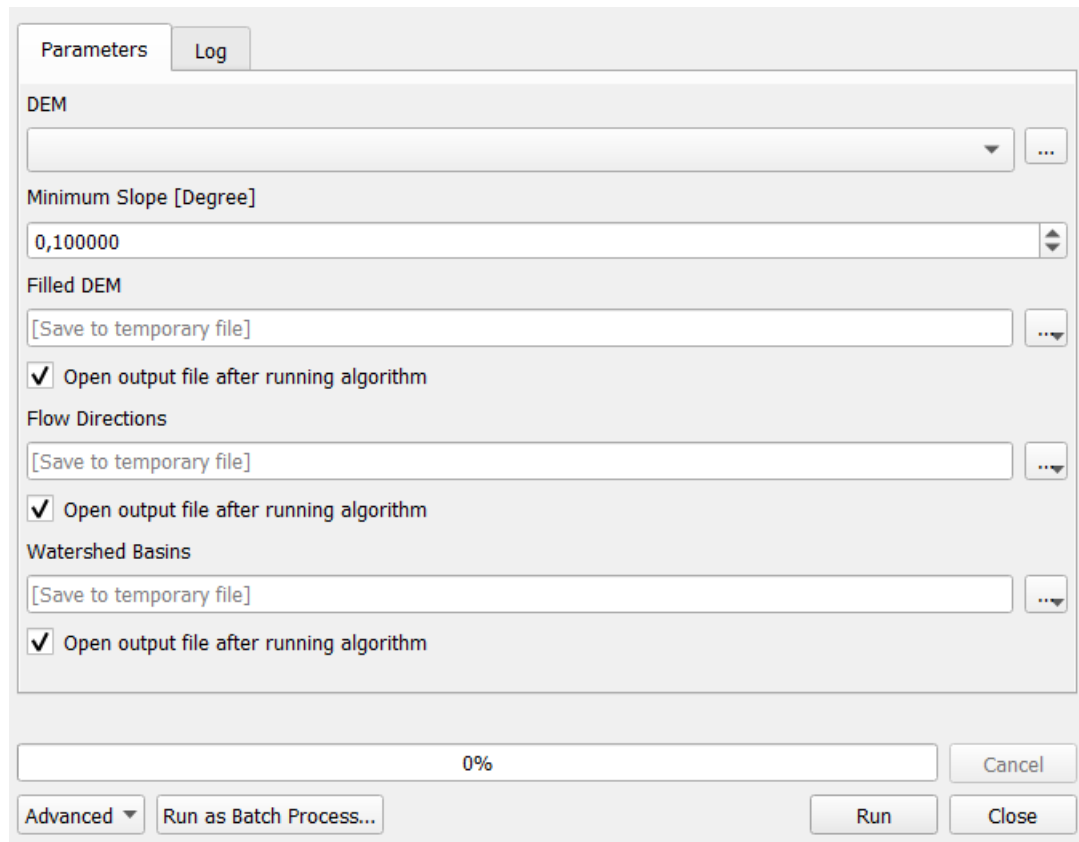


Figura 3.11 Fill Sinks (Wang & Liu)

Fuente: Elaboración propia

En la pestaña *DEM* se seleccionó el MED de la cuenca en estudio. La opción *Filled DEM* se dejó activada mientras el resto de las opciones se desactivaron pues no son necesarias en este caso. Posteriormente para la creación de la red de drenaje se hizo uso de la herramienta llamada *Channel network and drainage basins* (figura 3.12) que se encuentra en la opción de *Processing/Toolbox*.

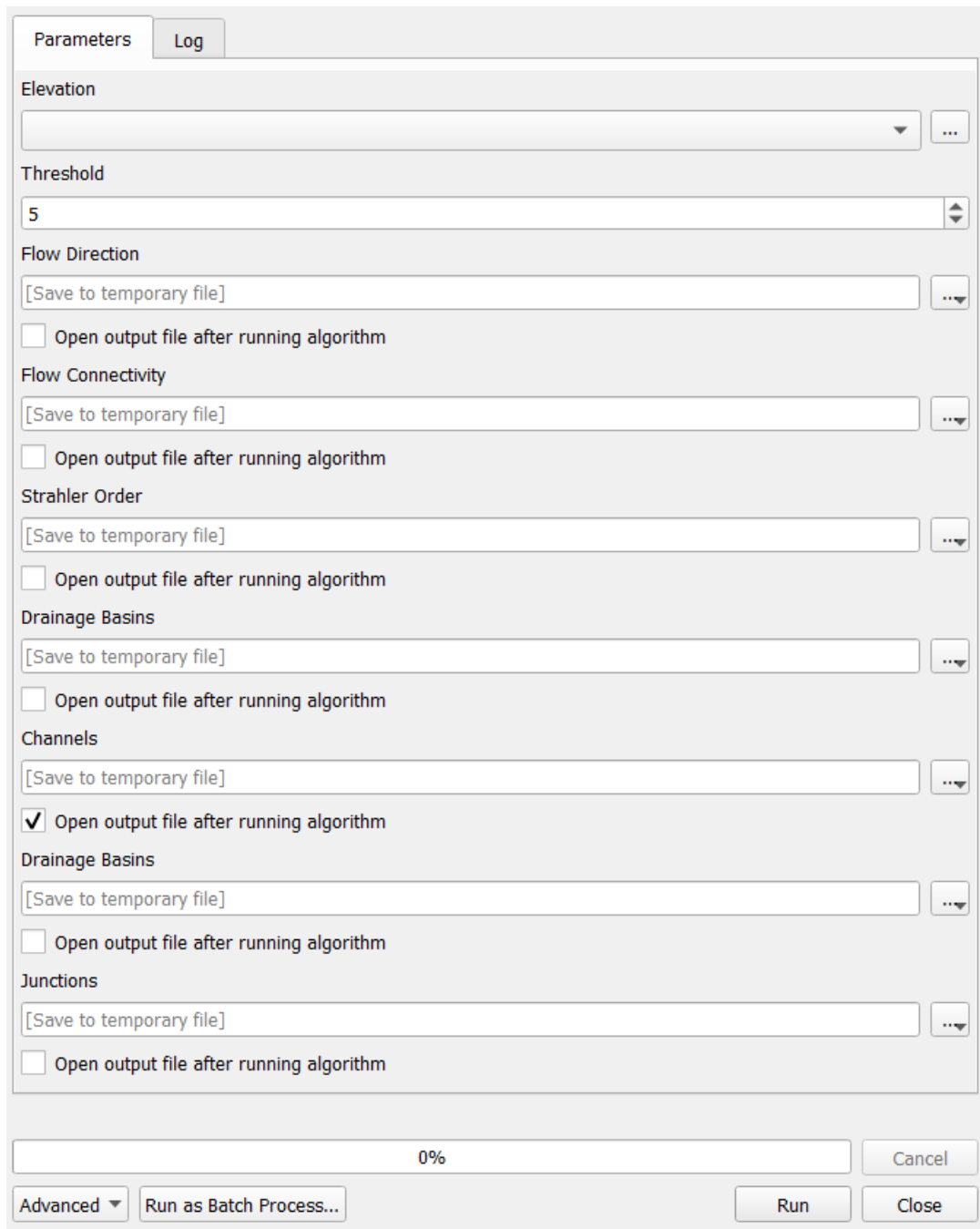


Figura 3.12 Channel network an drainage baisins

Fuente: Elaboración propia

En la pestaña *Elevation* se seleccionó el archivo ráster creado en anteriormente por medio de la herramienta *Fill Sinks*. Todas las demás opciones se desactivaron excepto *Channels*

puesto que es la capa que contiene la información de la red de drenaje. Si se quiere diferenciar por colores y números el orden de los contribuyentes se puede modificar haciendo clic derecho sobre la capa generada y en la opción *Properties* se pueden modificar los colores y las etiquetas con el número de orden.

3.2.7 Perfil longitudinal

Para lograr visualizar el perfil longitudinal del curso del agua se hizo uso de la herramienta *Terrain Profile*, sin embargo, fue necesario inicialmente definir el cauce del que se quiere obtener el perfil. Para ello se hizo una selección de características en la capa de red de drenaje obtenida por el método anterior mediante la opción *Select features by expression* utilizando la expresión “*ORDER*” = 3, de esta forma se seleccionaron solamente los cauces de del mayor orden que están contenidos en la red de drenaje (la cuenca presenta un orden máximo de 3). Esta selección de elementos se guardó por el método de exportación antes mencionado obteniendo una capa del cauce la cual se unió por medio de una polilínea mediante la herramienta *Dissolve* (figura 3.13).

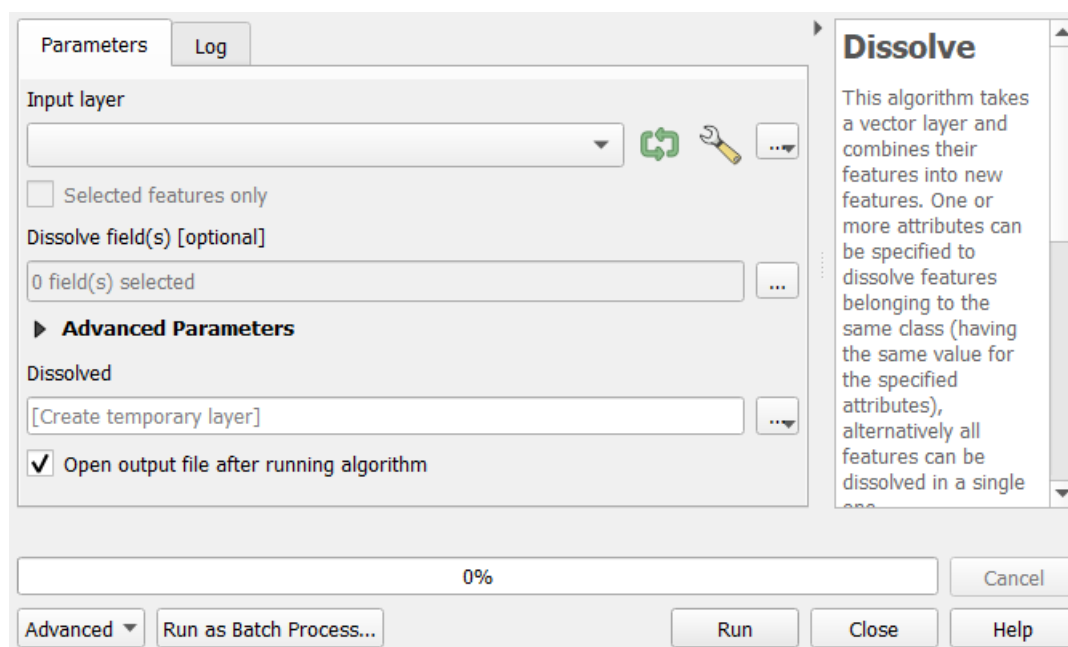


Figura 3.13 Herramienta Dissolve

Fuente: Elaboración propia

En la pestaña *Input layer* se seleccionó la capa que contiene los elementos del cauce segmentado exportados anteriormente. En *Dissolved* se buscó la ubicación del archivo de salida y se corrió la herramienta.

Ya con el cauce definido en una sola polilínea en una capa, se utilizó la herramienta *Terrain Profile* (figura 3.14) para obtener el perfil longitudinal.

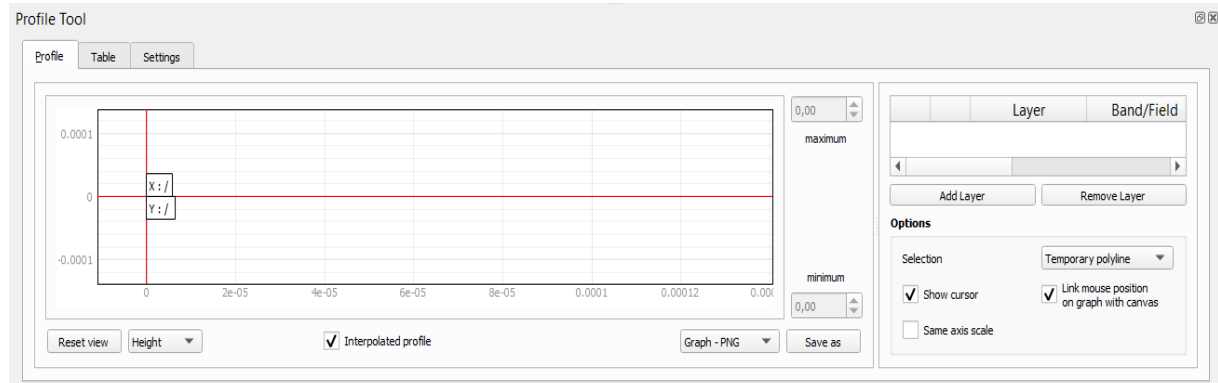


Figura 3.14 Herramienta Terrain Profile

Fuente: Elaboración propia

Para usar la herramienta, se debe estar posicionado inicialmente en la capa MED creada por medio de la herramienta *Fill sinks* (Wang & Liu) (figura 3.11). Este archivo .tif contiene la información de altitudes del río. Una vez que se seleccionó en el panel de capas, se presionó el botón *Add layer* en la herramienta, la capa deberá aparecer cargada en la parte superior. En la opción *Selection* se marcó la opción *Selected Layer* y se seleccionó en el panel de capas de Qgis la capa que contiene el cauce principal, de esta forma aparece el perfil de este. La imagen fue exportada mediante la opción *Save as*.

Para el cálculo de la longitud del cauce se utilizó la herramienta *Field calculator* (figura 3.7) sobre la capa que contiene el cauce principal, para ello se utilizó la expresión $\$length / 1000$.

3.3 Precipitación

Los datos de precipitación del área de estudio marcarán el punto de partida para realizar un buen modelo hidrológico, es por ello, la importancia de que sean datos correctos y de fuentes confiables. Para el análisis de precipitación, se hizo uso de la capa del Atlas digital de Costa Rica 2014 y el Software Qgis para estimar la precipitación media de la cuenca en estudio, además determinar las zonas de influencia de las estaciones meteorológicas para solicitar las series de precipitación máxima diaria al Instituto Meteorológico Nacional (IMN).

3.3.1 Polígonos de Thiessen

Para la aplicación de este método por medio de Qgis, se tuvo que descargar la capa Estaciones_meter_crtm05 del Atlas Digital. Una vez descargada esta capa fue cargada al software. Las capas de la delimitación de las cuencas creadas en la sección 3.2.1 también se cargaron al software. De este modo, por medio de la herramienta *Select Features* se seleccionaron las estaciones cercanas a la cuenca en estudio. Una vez hecha la selección se procede a exportar estos elementos como una capa nueva.

Por medio de la herramienta llamada *Voronoi Polygons* disponible en la opción *Processing/Toolbox* se realizó el método de los Polígonos de Thiessen (figura 3.15).

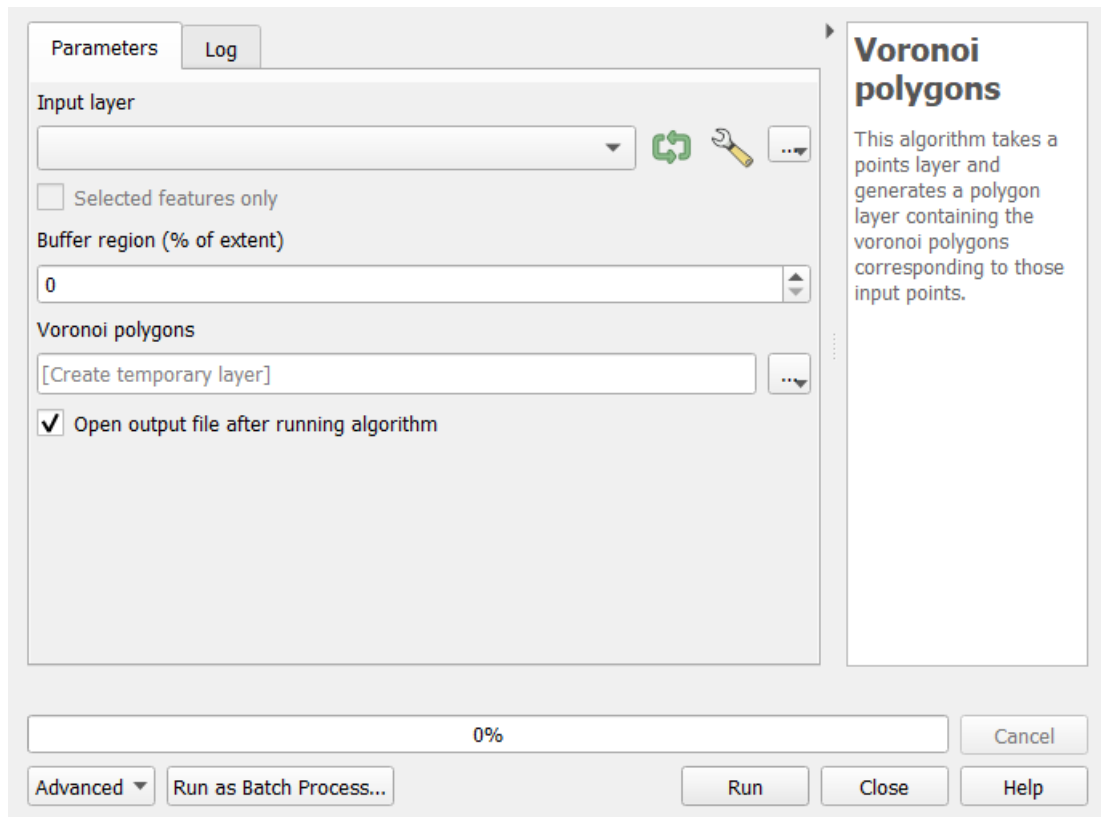


Figura 3.15 Herramienta Voronoi Polygons

Fuente: Elaboración propia

En *Input layer* se seleccionó la capa de estaciones cercanas creada anteriormente. En *buffer region* se seleccionó el porcentaje de cuanto se extenderán los polígonos más allá de los puntos del perímetro, en este caso se usó un valor de 20. Finalmente, en la opción *Voronoi polygons* se seleccionó la ubicación para guardar el archivo generado, de esta forma se visualizaron las estaciones de influencia sobre la cuenca.

Por medio de la herramienta *Clip* (figura 3.16) se recortó la capa creada de los Polígonos de Thiessen con la capa de las cuencas para una mejor visualización.

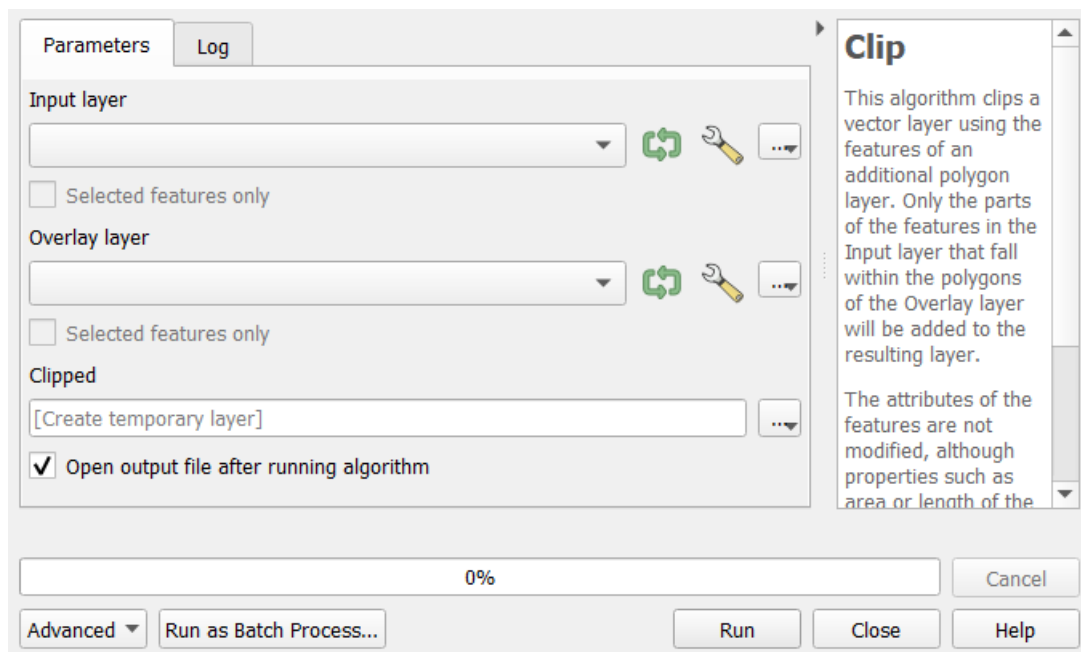


Figura 3.16 Herramienta Clip

Fuente: Elaboración propia

En *Input layer* se debe seleccionar la capa que contiene los polígonos de Thiessen mientras que en *Overlay layer* las capas de la cuenca correspondiente. En la opción *Clipped* se buscó la ubicación donde se guardará el nuevo archivo. Posteriormente, mediante el archivo shape que se generará con la herramienta *Clip*, se crearon los mapas de zonas de influencia por medio del software Qgis (figuras 3.17 y 3.18).

Dichos elementos fueron creados por medio de la opción disponible en *Project, New Print Layout*. Esta herramienta permite la creación y edición de mapas donde se pueden incorporar todos sus elementos (grilla de coordenadas, ubicación al norte, escala, simbología, etcétera).

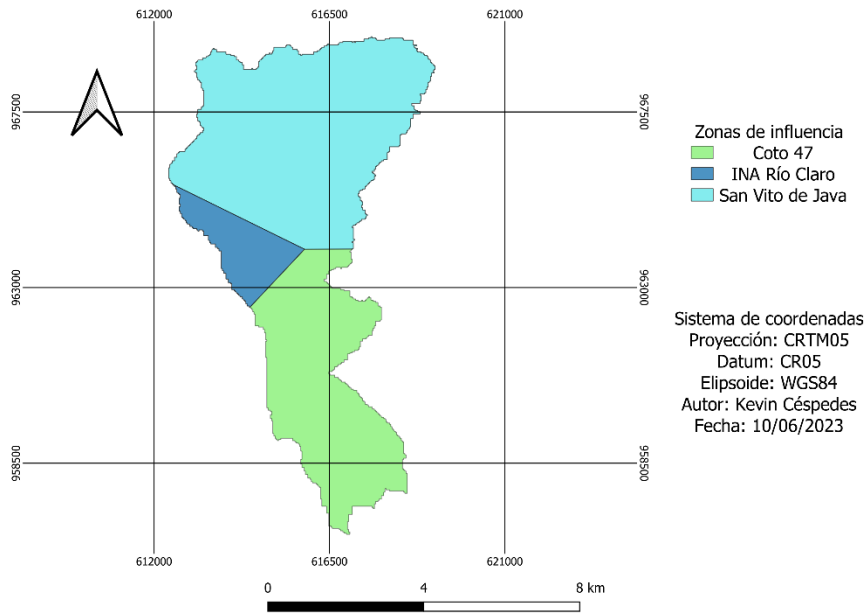


Figura 3.17 Zonas de influencia para la Cuenca del Río Caño Seco

Fuente: Elaboración propia

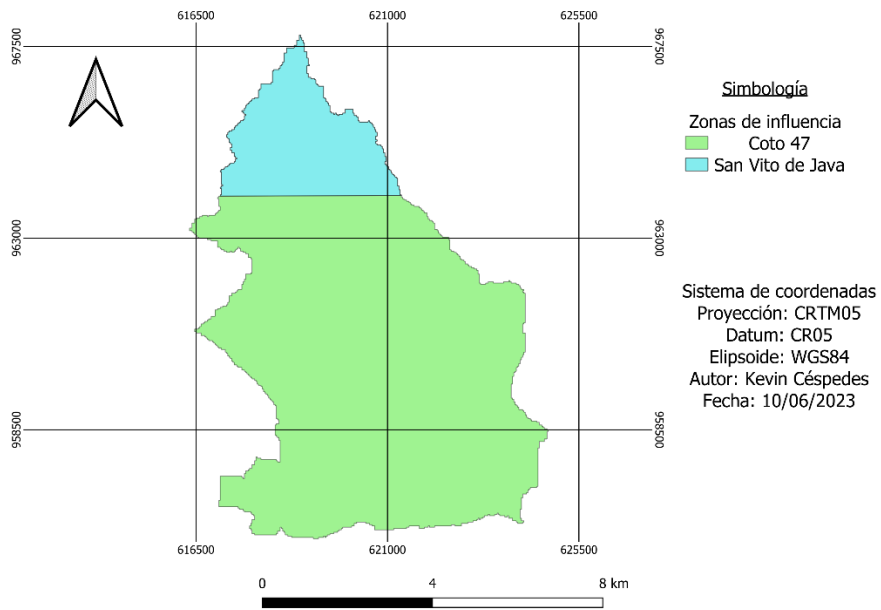


Figura 3.18 Zonas de influencia para la Cuenca del Río Corredor

Fuente: Elaboración propia

Las figuras 3.17 y 3.18 permiten conocer que las estaciones Coto 47, San Vito de Java e INA Río Claro son las que tienen influencia sobre las cuencas del Río Corredor y Cuenca del Río Caño Seco, lo que permite el cálculo de la precipitación promedio anual para cada cuenca.

3.3.2 Cálculo de la precipitación promedio anual

Para el cálculo de la precipitación promedio se utilizó los datos de la capa Estaciones_meteor_crtm05 del Atlas digital de Costa Rica, y por medio de la herramienta *field calculator* (figura 3.7) sobre la capa resultante al usar la herramienta *clip* (figura 3.16) se creó un nuevo campo llamado “Peso”, dicha variable refleja el área de influencia de cada estación dentro de la cuenca, para ello se usó la expresión $\$area / 1000000$. Luego se utilizó nuevamente la herramienta *field calculator* con el nombre de *prec_promed* y haciendo uso de la expresión (“Peso” * PROMEDIO_A) / sum(“Peso”). La precipitación promedio sería entonces la sumatoria de la columna *prec_promed*.

3.3.3 Análisis de representación de datos de precipitación

Como se determinó anteriormente, las estaciones que tienen influencia según las figuras 3.17 y 3.18, sobre las cuencas son las estaciones de San Vito de Java, Coto 47 e INA Río Claro. Sin embargo, los datos (series de precipitación) de la Estación San Vito de Java son de difícil acceso, ya que es una estación que pertenece al Instituto Costarricense de Electricidad y se requiere de un papeleo adicional para hacer uso de sus datos, fuera de los límites temporales del proyecto. En cuanto a los datos de la estación del INA Río Claro es poco representativa pues influye solo en un 4% (figura 3.19) del área comprendida por ambas cuencas.

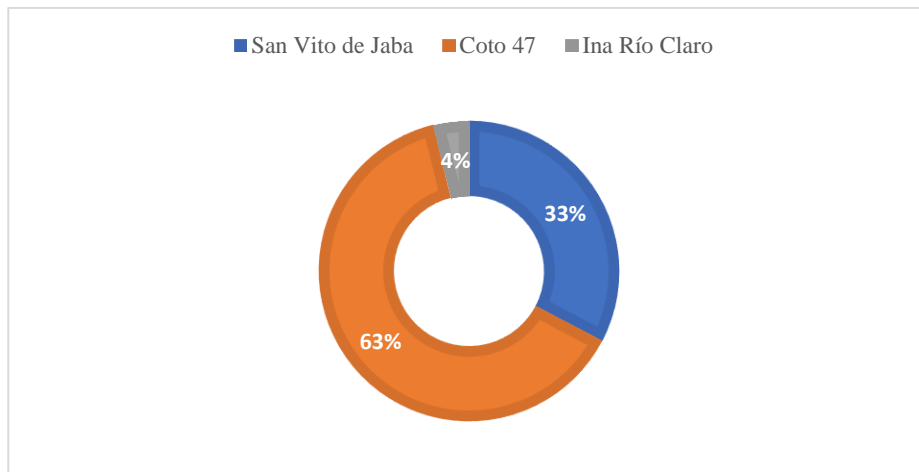


Figura 3.19 Área comprendida entre las cuencas cubiertas por cada estación

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 3.19, la estación Coto 47 del Instituto Meteorológico nacional cubre un 63% del área comprendida entre la Cuenca del Río Corredor y la Cuenca del Río Caño Seco, si bien, la estación San Vito de Java tiene una representación considerable del 33%, la estación Coto 47 representa la mayoría del área, por lo que se generalizan sus datos para ambas cuencas al no contar con la serie de precipitación de la estación San Vito de Java.

3.3.4 Serie anual de precipitación diaria

En el cuadro 3.3 se presenta la serie anual de precipitación máxima diaria proporcionadas por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de la estación Coto 47, y comprende un periodo de 31 años que van desde 1991 hasta el 2021.

Cuadro 3.3 Serie de precipitación máxima anual para un periodo de 24 horas de la estación Coto 47

Año	P_{max} anual para 24 horas (mm)	Año	P_{max} anual para 24 horas (mm)
1991	112,5	2007	127,2
1992	122,3	2008	102,0
1993	175,0	2009	125,1
1994	136,2	2010	120,0
1995	148,0	2011	137,8
1996	217,4	2012	121,7
1997	158,0	2013	115,4
1998	201,3	2014	107,4
1999	135,0	2015	158,6
2000	150,4	2016	219,4
2001	155,0	2017	247,6
2002	81,5	2018	173,6
2003	140,1	2019	145,2
2004	134,7	2020	249,6
2005	173,0	2021	109,2
2006	119,5		

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Estimación de eventos extremos de precipitación

Al igual que los parámetros morfométricos, el análisis estadístico que se le realizaban a los datos de precipitación eran muy manuales, aplicando ecuaciones, apoyados en el mejor de los casos por una herramienta como Excel. Actualmente, además de existir plantillas ya programadas para software de hojas de cálculo, existen programas especializados para realizar un análisis estadístico aplicado a la hidrología, como Hydrognomon. Este software es de acceso libre, y fue el que se usó para el cálculo de eventos extremos de precipitación para diferentes

periodos de retorno, esto, evaluando el ajuste de los datos de precipitación obtenidos con las distribuciones teóricas más usadas (Normal, LogNormal, Gamma, Pearson III, LogPearson III y Gumbel). El programa permitió hacer la selección del modelo que mejor se ajustó por medio del método gráfico y método estadístico aplicando alguna prueba de bondad de ajuste.

Inicialmente para ingresar la información de precipitación en el programa Hydrognomon se seleccionó la opción *Create new time series*. Esta opción abrirá una ventana emergente (figura 3.20) la cual se completó de la siguiente manera.

Figura 3.20 New time series - General information

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se seleccionó la opción *next* para seguir con la ventana de intervalo de tiempo o *Time Step* (figura 3.21). En el programa se trabajan 2 opciones para intervalos de tiempo. Indefinidos (variables) o definidos. En el caso de ser intervalos definidos, se selecciona el intervalo de precipitación en el que se esté trabajando (en minutos, horas, diarias, mensuales,

anuales, etcétera). Dado que para este proyecto se trabajó con series máximas anuales, se seleccionó esta opción.

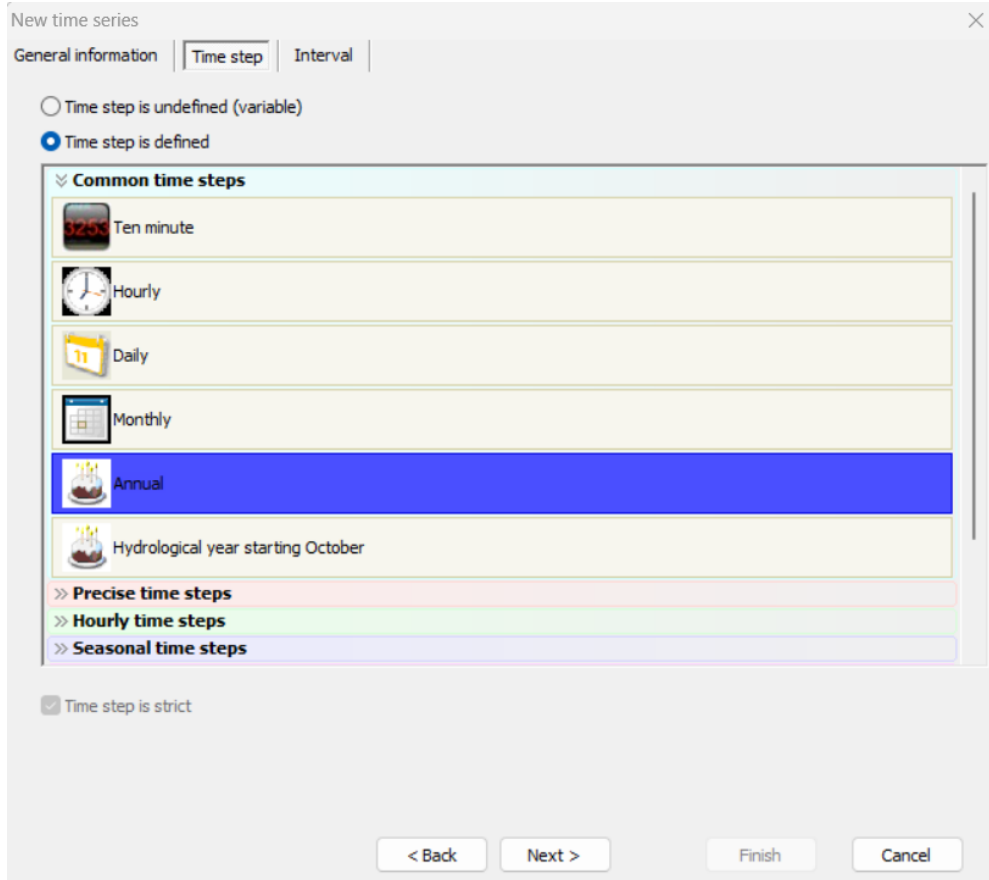


Figura 3.21 New time series - Time Step

Fuente: Elaboración propia

Finalmente se pasa a la siguiente ventana por medio del botón *next*, en la cual se debe seleccionar el tipo de variable (figura 3.22). Pueden ser variables de tipo instantánea o variables de series, en este caso se seleccionó la opción de variables de series pues están referidas a un intervalo. También se debe seleccionar el tipo de intervalo y dado que se está trabajando con series máximas de precipitación, se seleccionó la opción *Maximun*. Para terminar la configuración, se selecciona la opción de finalizar o *finish*.

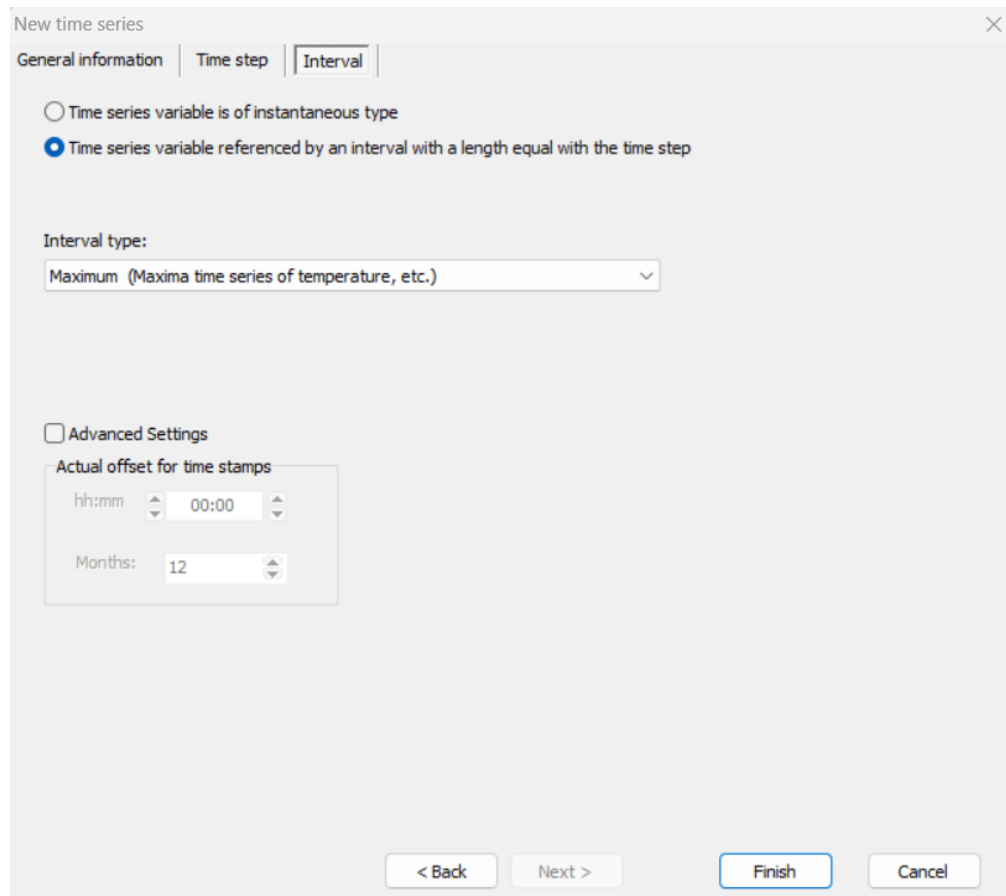


Figura 3.22 New time series – Interval

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida la configuración para ingresar año y precipitación máxima, se seleccionó entre la barra de herramientas la opción *insert a new record on specified date*. En la ventana que se abrió, se especificó el año en el que inicia el registro de datos de precipitación. Esta opción solo habilita el año que se especifica, para ingresar los demás se presionó *Shift + Ctrl + I* y en la ventana que se abrió, se especificó la cantidad de datos (años en este caso) que conforman el registro. Por último, se agregan los datos de precipitación máxima correspondiente a cada año.

Mediante la opción *Hydrology y Pythia – Statistical* análisis del programa es posible determinar gráficamente y mediante pruebas estadísticas (Smirnov-Kolgomorov y Chi-

Cuadrado), cuáles fueron las distribuciones teóricas que mejor se ajustaron a la serie de datos para determinar los eventos extremos de precipitación para cada periodo de retorno.

Inicialmente se realizó una prueba de bondad de ajuste mediante el método gráfico (figura 3.23) donde se observó que la serie de datos de precipitación (valores observados) se ajustan más a las distribuciones teóricas (valores esperados) Log Pearson III, Gumbel y Pearson III. Si se desea observar con más detalle en las figuras 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5 y 7.6 se encuentra el ajuste individual para cada distribución teórica (Anexos).

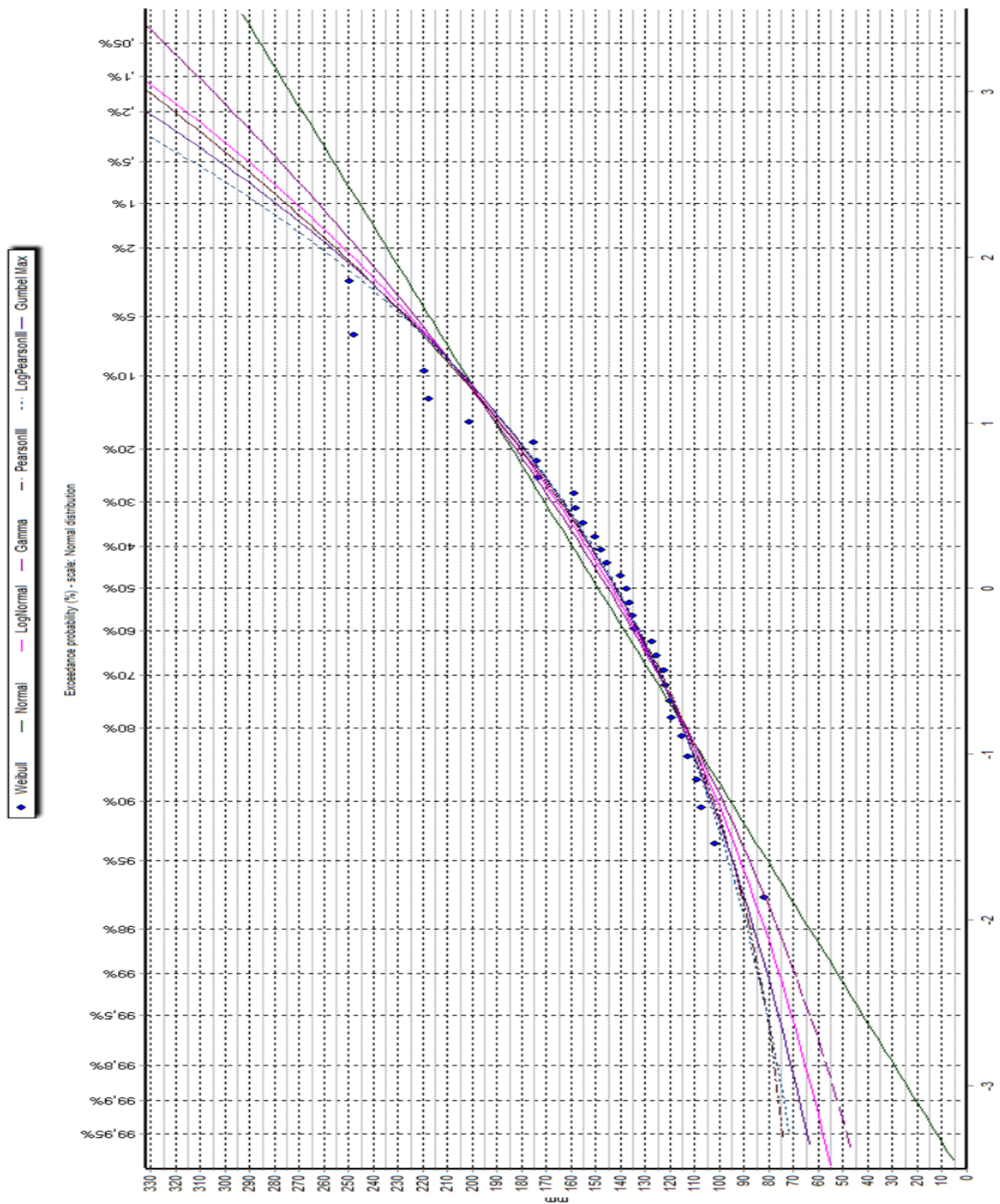


Figura 3.23 Ajuste de series de precipitación a las distribuciones teóricas

Fuente: Elaboración propia

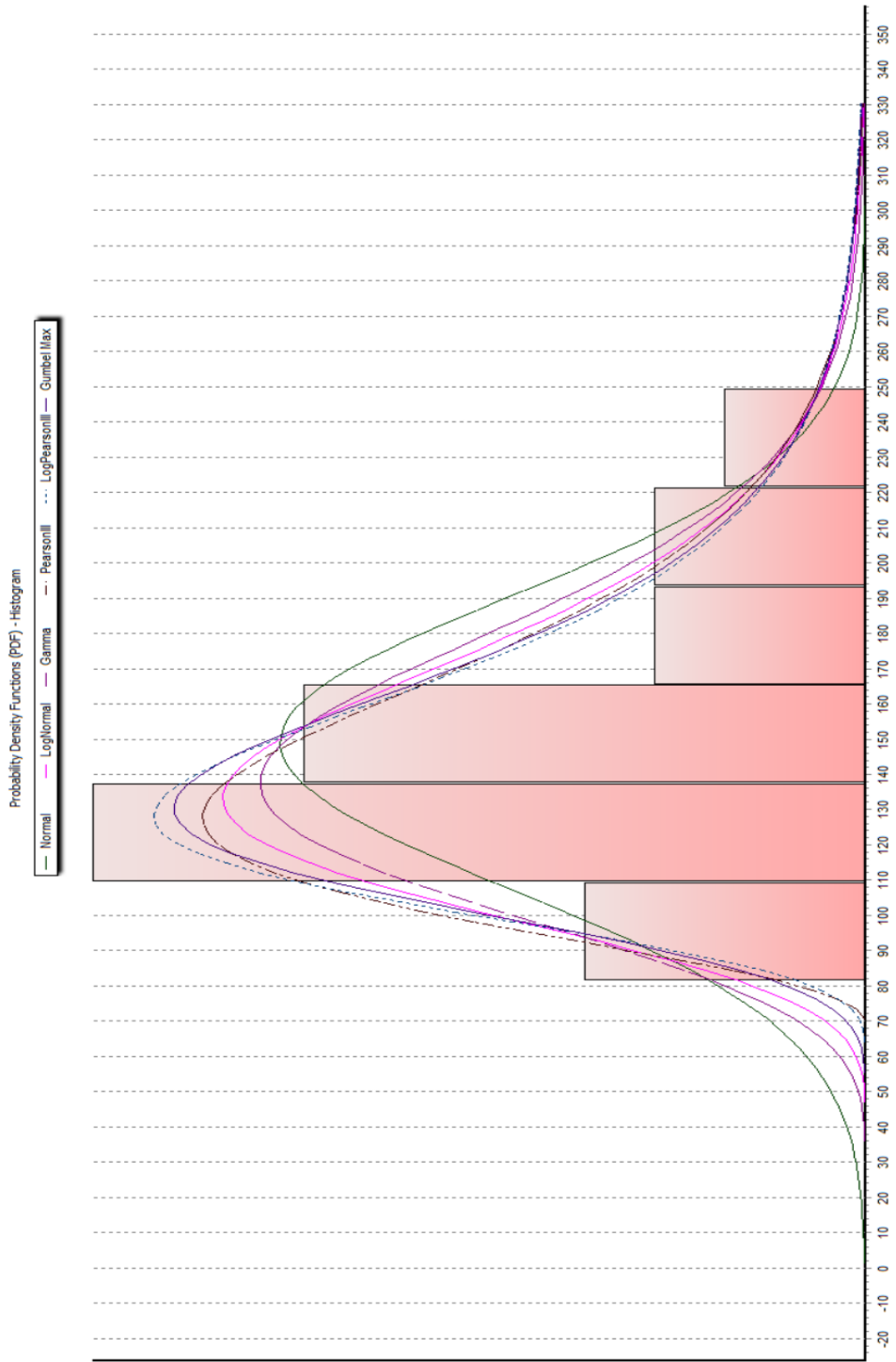


Figura 3.24 Histograma densidad de probabilidad por distribución teórica

Fuente: Elaboración propia

El histograma de la figura 3.24, permitió visualizar de mejor manera que la función de probabilidad que mejor se ajustó a la serie de datos es Log Pearson III, sin embargo, Gumbel también presentó un buen ajuste.

Posterior al ajuste gráfico, se realizó un ajuste estadístico para determinar cuantitativamente la función de probabilidad que presenta el mejor ajuste. En este caso se aplicó solamente la prueba de Smirnov – Kolmogorov. Los resultados de la prueba Chi – Cuadrado no fueron considerados para seleccionar la función de probabilidad que mejor se ajusta ya que los datos de precipitación no se ajustan a una distribución normal.

Cuadro 3.4 Prueba de bondad de ajuste Smirnov-Kolgomorov

	a = 1%	a = 5%	a = 10%	Ajuste	D_{MAX}
Log Pearson III	Aceptado	Aceptado	Aceptado	99,96%	0,05719
Gumbel	Aceptado	Aceptado	Aceptado	99,90%	0,06029
Pearson III	Aceptado	Aceptado	Aceptado	99,67%	0,06589
LogNormal	Aceptado	Aceptado	Aceptado	98,24%	0,07652
Gamma	Aceptado	Aceptado	Aceptado	91,17%	0,09387
Normal	Aceptado	Aceptado	Aceptado	62,95%	0,12763

Fuente: Elaboración Propia

De esta forma se logró determinar que, tanto en el ajuste gráfico como el ajuste estadístico, con un ajuste del 99,96% (cuadro 3.4), la función de probabilidad Log Pearson III es la que mejor se ajusta a la serie de datos de precipitación, por lo tanto, fue la función utilizada para la estimación de los eventos extremos de precipitación.

3.3.6 Curvas IDT

Para la construcción de estas curvas, se empleó el modelo de Grobe o también conocido como el modelo Dyck y Peschke, ya que la familia de curvas IDT, se construyen a partir de datos de precipitaciones máximas de 24 horas para diferentes periodos de retorno. La ecuación que se utilizó para el cálculo de precipitaciones para las diferentes duraciones es la misma que indica en método en la ecuación 6.

Posteriormente para el cálculo de la intensidad máxima de precipitación para el modelo de Dyck y Peschke, se utilizó la precipitación discretizada anteriormente y las duraciones, mediante la ecuación (11).

$$I = \frac{P_d}{D} \quad (11)$$

Donde I es Intensidad de precipitación en mm/hr, P_d es precipitación máxima de duración en mm y D es duración de la precipitación en horas.

3.3.7 Hietograma

Los hietogramas para cada periodo de retorno fueron realizados por medio del método del bloque alterno a partir de las curvas IDT desarrolladas en la sección 3.3.6. Para ello, por medio de Excel se desarrolló el cuadro 3.5.

Cuadro 3.5 Método del bloque alterno

Duración min (1)	Intensidad mm/hr (2)	Profundidad Acumulada mm (3)	Profundidad Incremental mm (4)	Tiempo min (5)	Precipitación mm (6)
------------------------	----------------------------	---------------------------------------	---	----------------------	----------------------------

Fuente: Elaboración propia

En la columna (1), ya que se están trabajando con series de precipitación máxima diaria, se utilizó de 60 a 1440 minutos, con incrementos de 60 minutos. La intensidad (2) estará dada por la ecuación de la curva IDF según cada periodo de retorno. La profundidad acumulada (3) es la intensidad por la duración entre 60.

La profundidad incremental (4) es la diferencia de la profundidad acumulada para cada hora y el tiempo (5) se refiere al tiempo transcurrido de un dato al siguiente (cada hora). Por último, la precipitación (6) será igual a la columna de profundidad incremental, pero con una variación en el orden de los datos según el método el bloque alterno. De esta forma el hietograma se obtuvo de graficar la columna (6) contra la columna (5).

3.4 Modelación hidrológica

3.4.1 Número de curva

El número de curva para las cuencas del Río Caño Seco y Río Corredor, fueron calculados por medio de varias herramientas. Inicialmente se descargaron los datos necesarios, disponibles en el Atlas digital de Costa Rica, los cuales fueron las capas de tipos de suelo y la capa de cobertura vegetal, además del MED descargado de la plataforma del USGS.

Posterior a esto, las capas fueron procesadas por medio del software ArcGis, y haciendo uso de la Herramienta Hec-Geo HMS se determinaron los números de curva con sus respectivas áreas para ambas cuencas. Finalmente, por medio de la herramienta Excel se aplicó la ecuación 12 para el número de curva promedio correspondiente a cada cuenca.

$$CN = \frac{\sum CN_i * A_i}{A_{Total}} \quad (12)$$

Donde CN corresponde al número de curva, $\sum CN_i * A_i$ es la sumatoria de cada número de curva por el área que abarca dentro de la cuenca y A_{Total} es el área total de la cuenca.

3.4.2 Tiempo de concentración

El tiempo de concentración fue calculado mediante las ecuaciones 7,8 y 9 donde el tiempo de concentración de cada cuenca sería el promedio de los resultados de dichas ecuaciones.

3.4.3 Tiempo de retardo

Tiempo de retardo ocurre en función del tiempo de concentración y se calculó para cada cuenca mediante la ecuación 10.

3.4.4 HEC – HMS

En este software se realizaron las simulaciones correspondientes para un periodo de retorno de 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años. Inicialmente en la barra de herramientas, se seleccionó la opción *Create a New Project*, donde se especificó el nombre del proyecto y la ubicación donde se guardará. Posteriormente en la opción de *Components*, se seleccionó la opción *Basin Model Manager* (figura 3.25) para agregar los archivos .shp de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco.

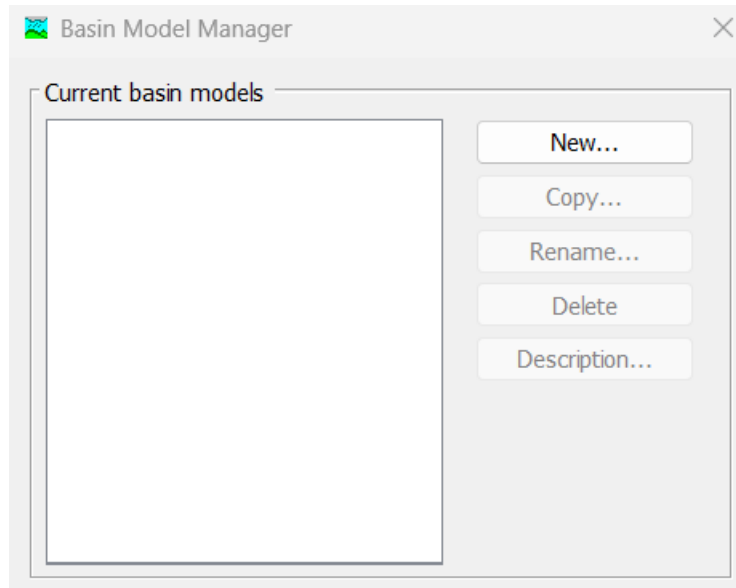


Figura 3.25 Basin Model Manager

Fuente: Elaboración propia

Sobre ese nuevo elemento, se dio clic derecho y se seleccionó la opción *Maps layer* (figura 3.26) donde se agregaron los archivos de las cuencas Río Caño Seco y Río Corredor, delimitadas en la sección 3.2.1.

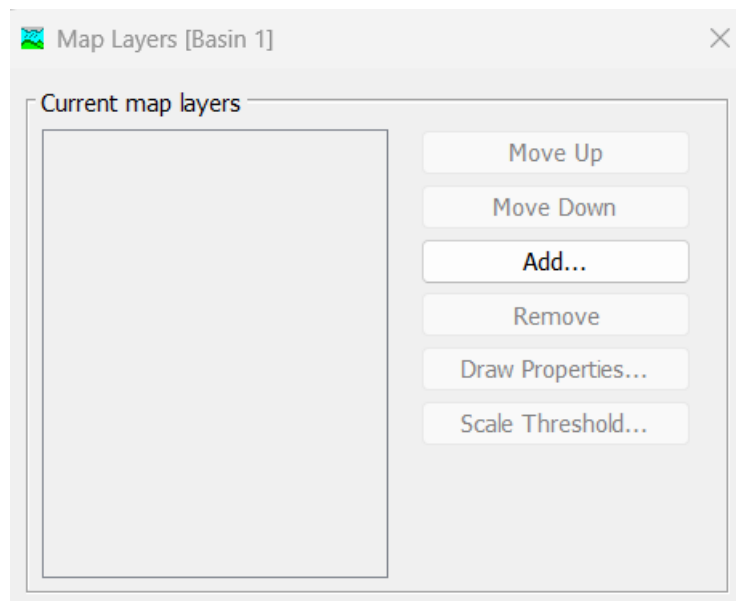


Figura 3.26 Map Layers

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se agregaron los elementos correspondientes a las cuencas. En este caso un elemento de aporte por medio de la opción *subbasin creation tool* utilizada para representar la cuenca física y un punto de descarga o aforo por medio de *sink creation tool* ubicada en la confluencia de los ríos Caño Seco y Corredor, ambas herramientas están disponibles en la barra de herramientas (figura 3.27).



Figura 3.27 Barra de herramientas HEC-HMS

Fuente: Elaboración propia

Para unir ambos elementos se da un clic derecho sobre el elemento *subbasin* (figura 3.28) y se seleccionó la opción *Connect Downstream*. Seguidamente se vuelve a seleccionar el elemento *subbasin* y se completó la información de la figura 3.28.

Figura 3.28 Elemento Subbasin

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.28, se agregó el área de la cuenca y se seleccionó el método de pérdidas que separa de la lluvia total, la lluvia neta o efectiva, en este caso se utilizó el modelo del número de curva (*SCS Curve Number*) y para transformar la precipitación neta generada por el modelo del número de curva, se utilizó el modelo del hidrograma unitario sintético (*SCS Unit Hydrograph*). Basado en la selección de estos modelos, en la pestaña *Loss* se agregó el número de curva (*curve number*) correspondiente y en *Transform* el tiempo de retardo en minutos (*Lag time*).

Una vez finalizado lo anterior se pasó al siguiente componente en la opción *Components* y seleccionó *Time-series data manager* (figura 3.29).

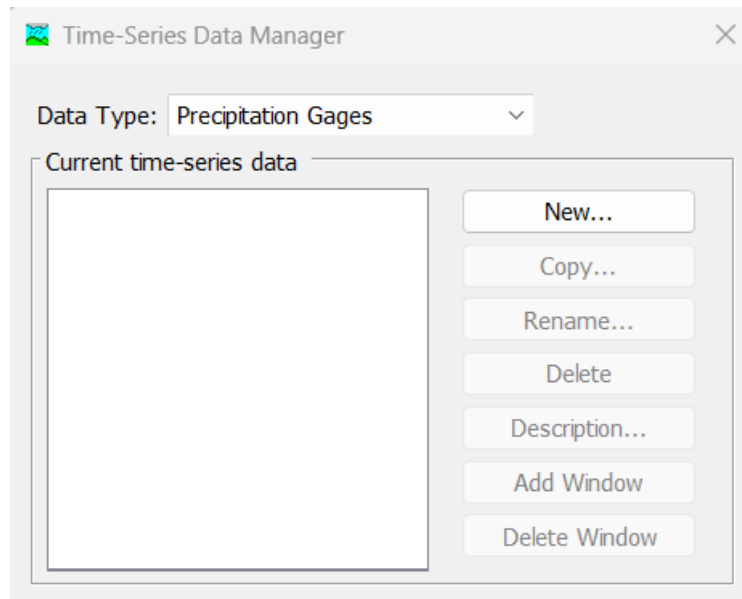


Figura 3.29 Time- Series Data Mananger

Fuente: Elaboración propia

Este elemento se configuró para introducir los datos del hietograma realizado por medio del bloque alterno, por ello, en la opción de *time Interval* (figura 3.30) se seleccionó una hora, ya que es el intervalo de incrementos con el que se diseñó el hietograma.

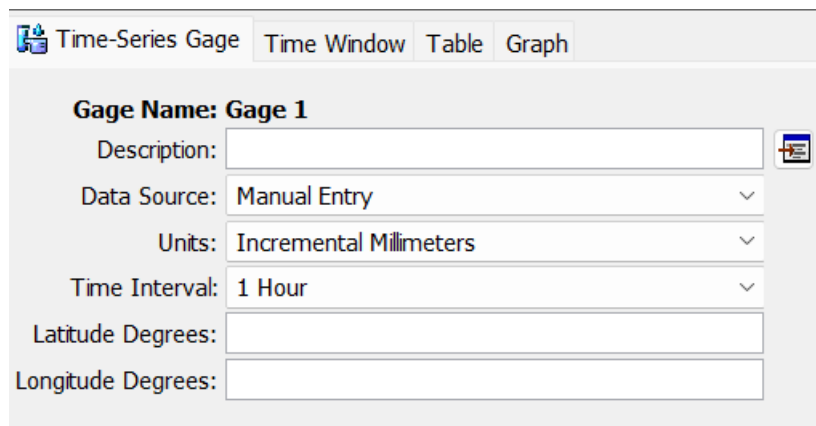


Figura 3.30 Componente Time-Series Gage

Fuente: Elaboración propia

En *time window* (figura 3.31) se configuró un día completo, de esta forma en *table* se pueden ingresar los datos de precipitación del hietograma para 24 horas.

Gage Name: Gage 1	
*Start Date (ddMMYYYY)	05sep.2022
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMYYYY)	06sep.2022
*End Time (HH:mm)	00:00

Figura 3.31 Time window

Fuente: Elaboración propia

El tercer componente se generó en la opción *components, Meteorologic model mananger* (figura 3.32) donde únicamente se debe mantener el sistema métrico de unidades y que la precipitación sea especificada por el hietograma. Las demás variables no son de interés para el proyecto.

Met Name: Met 1	
Description:	<input type="text"/>
Unit System:	Metric
Shortwave:	--None--
Longwave:	--None--
Precipitation:	Specified Hyetograph
Temperature:	--None--
Windspeed:	--None--
Pressure:	--None--
Dew Point:	--None--
Evapotranspiration:	--None--

Figura 3.32 Meteorologic model mananger

Fuente: Elaboración propia

En la figura 3.33 se especificó en *Specified Hyetograph* cuales son los datos de precipitación, hietograma que debía utilizar.

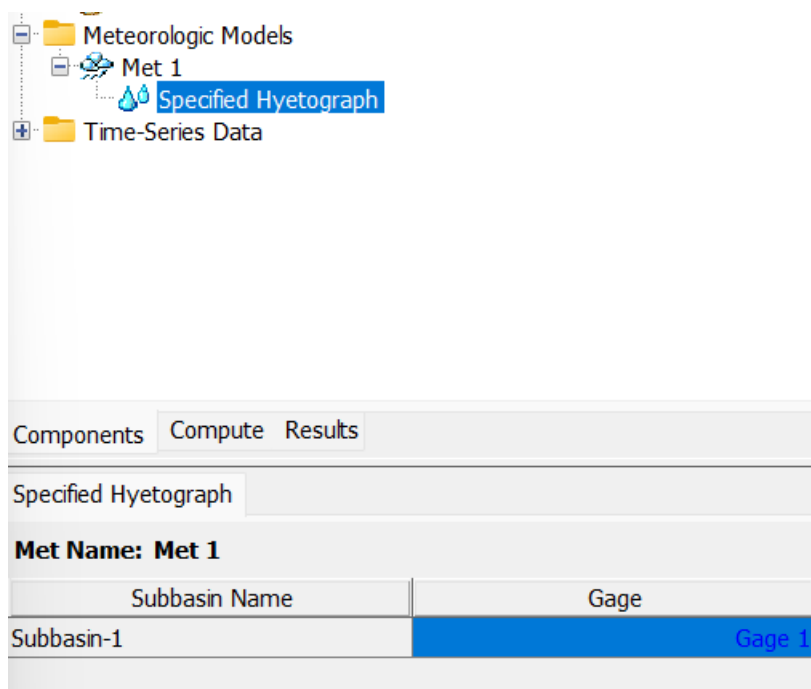


Figura 3.33 Specified Hyetograph

Fuente: Elaboración propia

Para finalizar se agregó el último componente desde la opción *components* (figura 3.34), *Control Specifications Manager*. En este caso se puso la misma fecha y hora de inicio que en la opción *time window*, pero la hora final aumento 3 horas, ya que se debe permitir que el caudal de las 00:00 generado por la lluvia llegue a la estación de aforo de la cuenca. En cuanto al Time Interval, se recomienda que sea menor o igual que el 29% del tiempo de retardo (Villón, 2014) por lo que se utilizó un intervalo de 10 minutos.

Name: Control 1	
Description:	<input type="text"/>
*Start Date (ddMMMYYYY)	05sep.2022
*Start Time (HH:mm)	00:00
*End Date (ddMMMYYYY)	06sep.2022
*End Time (HH:mm)	3:00
Time Interval:	10 Minutes

Figura 3.34 Control Specifications

Fuente: Elaboración propia

De esta forma se configuraron todos los elementos que debía tener la simulación para correrla. En la opción *compute, create compute, simulation run* y se seleccionaron todos los elementos creados anteriormente (Cuenca, modelo meteorológico y especificaciones de control).


Run: Run 1	
------------	---

Figura 3.35 Iniciar Simulación

Fuente: Elaboración propia

En la barra de herramientas, se selecciona la simulación a la que se le asignaron todos los elementos anteriores y se presiona *Compute all elements* (figura 3.35).

3.5 Descarga de datos satelitales de precipitación

Con el fin de realizar una comparación y determinar si pueden ser los datos de precipitación satelital una alternativa cuando no se disponen de registros de precipitación en tierra, fueron descargados datos de precipitación directamente de la página de la NASA Giovanni. En el buscador de la página se escribió el acrónimo TRMM 3B42, y entre los resultados, se seleccionó la variable *Precipitation Rate (TRMM 3B42 Daily v7)* la cual contiene información de precipitación diaria con una resolución de 0.25° con datos desde 1998 hasta el 2019. Esta serie fue analizada y convertida a una serie de precipitación máxima diaria para un periodo de 1998 al 2019.

Para descargar dichos datos dentro de la página por medio de la opción *select plot* se eligió la opción *time series, area-averaged* para un rango del 1 de enero del 1998 hasta el 12 de diciembre del 2019. En la opción *select region* por medio del botón *draw a bounding box on the map*, se buscó por medio de la opción de acercamiento, las coordenadas de la estación Coto 47 (figura 3.36) y mediante el botón *click and drag to draw region of interest* se estima el sitio de interés.

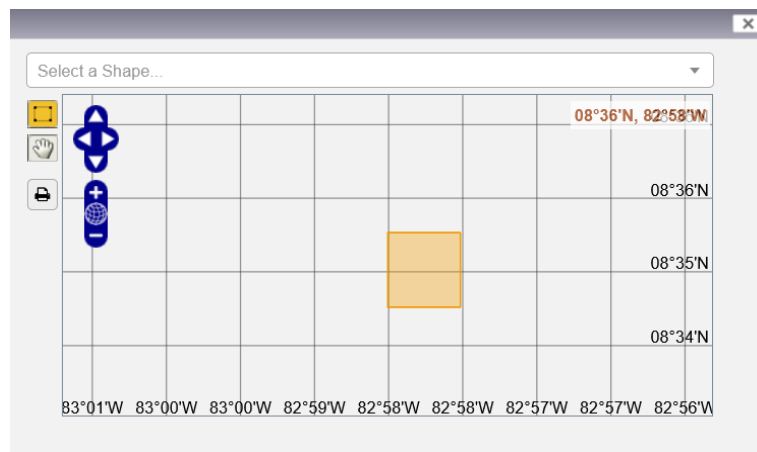


Figura 3.36 Selección punto de interés

Fuente: Elaboración propia

Por último, se seleccionó la opción *plot data* (figura 3.37) para obtener los datos de precipitación requeridos.

The screenshot shows the NASA Giovanni web interface. At the top, it says "EARTHDATA Find a DAAC" and "GIOVANNI The Bridge Between Data and Science v 4.38". There are links for "Feedback", "Help", and "Log out (kevoce98)".

The main search area includes:

- Select Plot:** "Time Series, Area-Averaged"
- Select Date Range (UTC):** "1998 - 01 - 01 00 : 00" to "2019 - 12 - 31 23 : 59". Below it, "Valid Range: 1998-01-01 to 2019-12-31".
- Select Region (Bounding Box or Shape):** "-82.9801,8.5852,-82.9703,8.5953".

Under "Select Variables", there are two sections:

- Observations:**
 - Model (1260)
 - Observation (744)
- Disciplines:**
 - Aerosols (266)
 - Atmospheric Chemistry (232)
 - Atmospheric Dynamics (772)
 - Cryosphere (18)
 - Hydrology (646)
 - Ocean Biology (43)
 - Oceanography (73)
 - Water and Energy Cycle (798)

Below these are expandable sections: "Measurements", "Platform / Instrument", "Spatial Resolutions", "Temporal Resolutions", and "Wavelengths".

A search bar shows "Number of matching Variables: 0 of 2004" and "Total Variable(s) included in Plot: 1". A "Keyword:" field is present with "Search" and "Clear" buttons.

A table lists the selected variable:

Variable	Units	Source	Temp Res.	Spat Res.	Begin Date	End Date
<input checked="" type="checkbox"/> Precipitation Rate (TRMM_3B42_Daily_v7)	mm/day	TRMM	Daily	0.25°	1998-01-01	2019-12-31

At the bottom, there is a footer with "Responsible NASA Official: Angela Li", "Web Curator: M. Hegde", "Privacy", "Powered By", and "Contact Us". On the right, there are buttons for "Reset", "Plot Data", and "Go to Results".

Figura 3.37 Pagina Giovanni NASA

Fuente: Elaboración propia

3.6 Comparación estadística de datos

De la sección 3.5 se obtuvo la serie de precipitación máxima diaria del año 1998 al 2019 para la zona donde se encuentra la estación meteorológica con la que se desean contrastar los datos. Para esta serie se determinó la precipitación máxima diaria para cada año (cuadro 3.6).

Cuadro 3.6 Serie de precipitación máxima satelital de 24 horas

Año	P_{max} anual para 24 horas	Año	P_{max} anual para 24 horas
1998	123,19	2009	133,22
1999	86,35	2010	152,53
2000	86,98	2011	121,46
2001	92,88	2012	99,96
2002	91,44	2013	115,33
2003	91,82	2014	108,82
2004	115,79	2015	98,67
2005	119,79	2016	176,69
2006	121,46	2017	97,29
2007	113,22	2018	104,16
2008	141,26	2019	94,56

Fuente: Elaboración propia

Como se menciona anteriormente, los datos del cuadro 3.6 se compararon con los datos de la estación Coto 47 (cuadro 3.3), ambos para un periodo de 1998 al 2019.

Para realizar la comparación de las series satelital y de estación meteorológica se optó por aplicar la prueba Wilcoxon-Mann-Whitney o conocido como la prueba de la U de Mann-Whitney, dado que los datos no se ajustan a la condición de una prueba paramétrica donde requieren ajustarse a una distribución normal. También, es una prueba aplicada cuando se tienen dos conjuntos de datos y que presentan muestras pequeñas.

Al aplicar dicha prueba, los datos de ambas series fueron ordenados de menor a mayor asignando un valor a cada uno según su posición. Al realizar este procedimiento, entre mayor similitud hay entre las muestras, mejor intercalados quedan los datos en su posición. El cuadro XX refleja el rango (R) de cada dato de precipitación (*Valor P*).

Finalmente fueron calculados los valores de U_1 y U_2 por medio de las ecuaciones 1 y 2 donde se utilizó el menor valor de U resultante y se contrastó con el valor crítico U tomado de la tabla 7.1 (anexos).

CAPITULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Parámetros morfométricos de las cuencas Río Corredor y Río Caño Seco

Se realizó la caracterización morfológica de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco determinando parámetros importantes de relieve, forma y drenaje de las cuencas. Inicialmente se realizó una delimitación de las cuencas a trabajar, así como la ubicación del punto de aforo, las cuales se encuentra representadas en la figura 4.1.

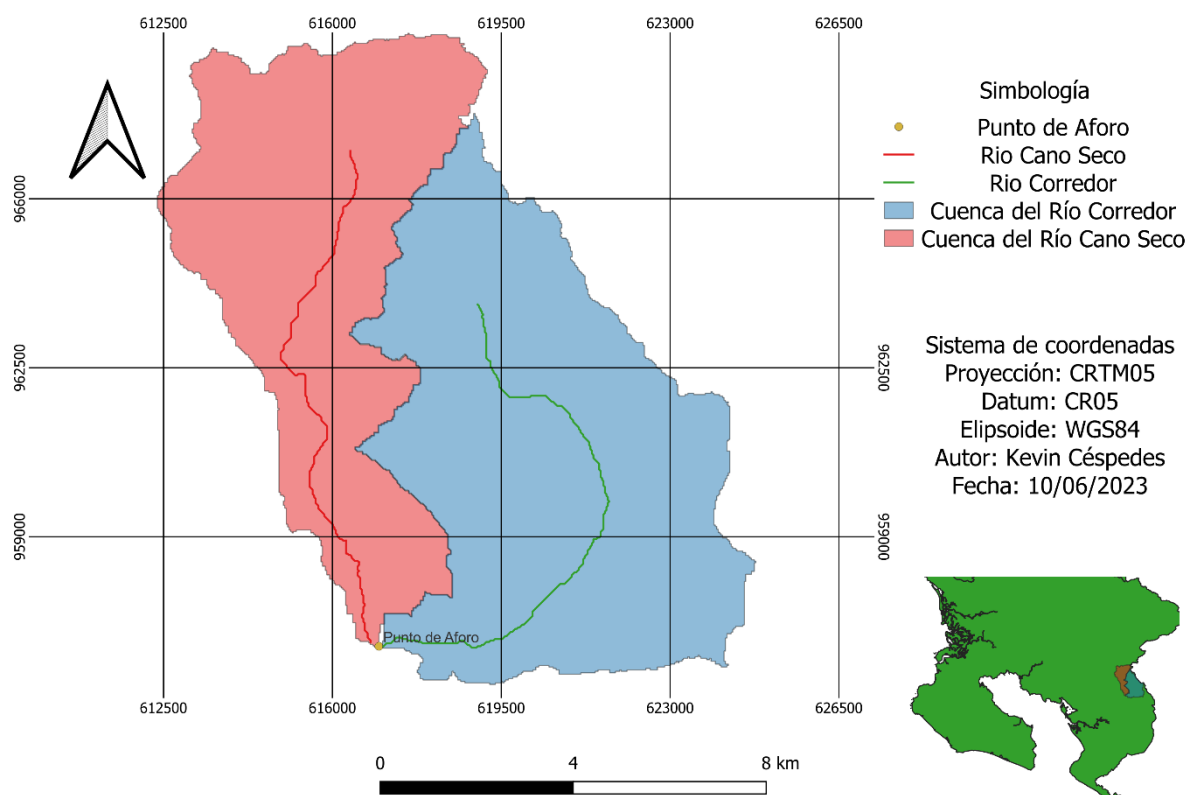


Figura 4.1 Delimitación de la cuencas y punto de aforo

Fuente: Elaboración propia

4.1.1 Parámetros de forma

Parte de realizar un análisis de la respuesta hidrológica de las cuencas de estudio es indispensable determinar inicialmente los diferentes factores que intervienen, por ejemplo, la

forma de estas. Los parámetros calculados en el cuadro 4.1 ayudaran a comprender el comportamiento de las cuencas.

Cuadro 4.1 Parámetros de forma de las Cuencas del Río Corredor y del Río Caño Seco

Parámetro	Unidad	Valor	
		Cuenca Río Corredor	Cuenca Caño Seco
Área	km ²	57,62	43,82
Perímetro	km	51,91	52,32
Longitud máxima	km	11,83	12,61
Ancho	km	7,71	7,33
Índice de Compacidad	-	1,91	2,21
índice de forma	-	0,66	0,57

Fuente: Elaboración propia

Las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco, están conformadas por un área total de 57,62 km² y 43,82 km² respectivamente según el cuadro 4.1, dado que la Cuenca Río Corredor posee una mayor área de escurrimiento, es probable que sea la que aporte un mayor caudal en la confluencia de los ríos. Las cuencas se encuentran sobre los cantones de Corredores y Coto Brus (figura 4.2). El perímetro de la Cuenca del Río Corredor es de 51,91 km mientras que el de la Cuenca del Río Caño Seco es de 52,32 km.

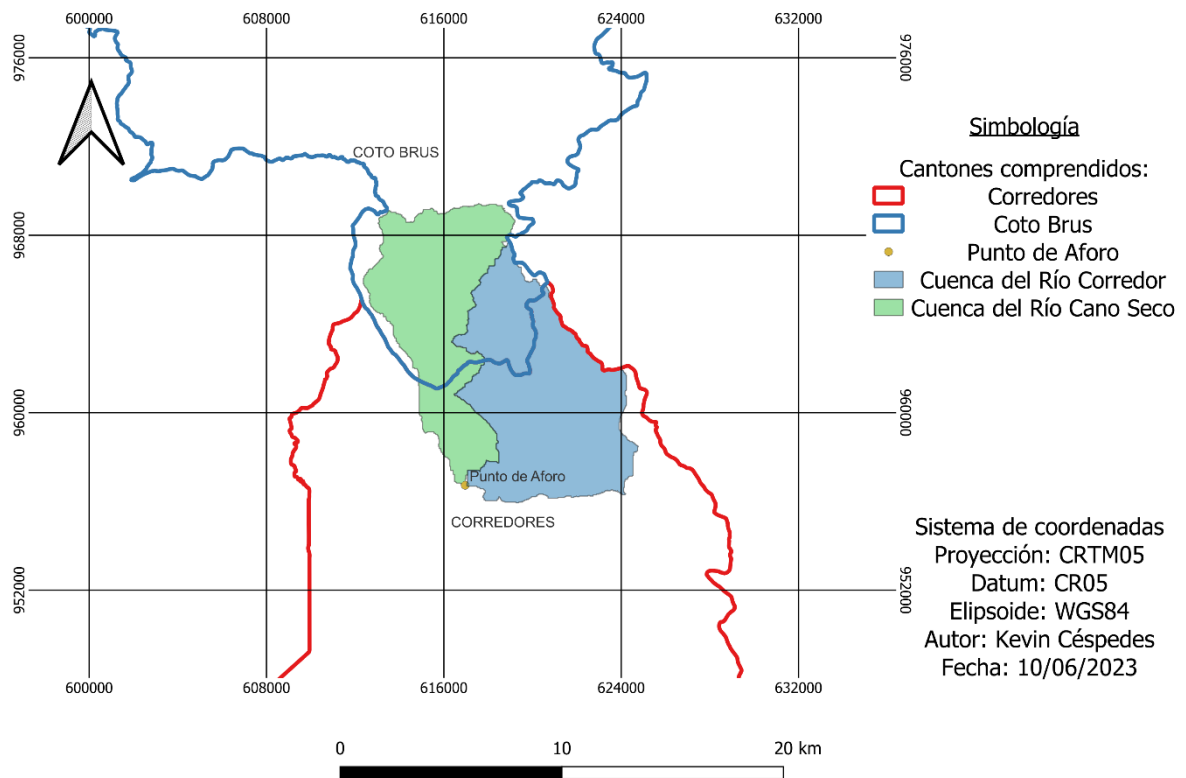


Figura 4.2 Ubicación de las cuencas y punto de aforo

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al índice de forma (f) que expresa la relación entre el ancho promedio y la longitud de la cuenca, para la Cuenca del Río Corredor se obtuvo un valor de 0,66. Esto indica, según el cuadro 2.3, que la cuenca al encontrarse entre los valores de 0,60 y 0,80, posee una forma ensanchada, por lo que es propensa a presentar crecidas rápidas cuando se presentan lluvias intensas en toda su área o parte de ella. De igual manera, el índice de compacidad (Kc) para esta cuenca, tiene un valor de 1,91 por lo que según la figura 2.2 tiene una forma rectangular oblonga.

Para el caso de la Cuenca del Río Caño Seco, se obtuvo un valor de índice de forma (f) de 0,57 siendo un poco más bajo que el de la Cuenca del Río Corredor, sin embargo, hay una diferencia en su clasificación, pues al estar entre 0,45 y 0,60 resulta que es una unidad ligeramente ensanchada, por lo tanto, es menos propensa a presentar problemas por crecidas

súbitas cuando se presentan lluvias intensas en su territorio. En cuanto al índice de compacidad (K_c) se obtuvo un valor de 2,21 y si bien tiene la misma clasificación en su forma (Rectangular oblonga) según la figura 2.2, la Cuenca del Río Corredor, al tener un valor de K_c más próximo a 1, es un poco más propensa a concentrar altos volúmenes de agua de escurrimiento.

4.1.2 Parámetros asociados al relieve

El relieve es otro factor que influye directamente en el comportamiento de las cuencas. En el cuadro 4.2 se muestran las características del relieve presentes en las cuencas.

Cuadro 4.2 Parámetros asociados al relieve

Parámetros	Unidad	Cuenca Río Corredor	Cuenca Río Caño Seco
Pendiente media	%	13,14	10,59
Cota máxima	msnm	1140,00	1414,00
Cota media	msnm	577,28	907,81
Cota mínima	msnm	57,00	57,00

Fuente: Elaboración propia

Según el cuadro 2.4 donde se relaciona la pendiente media de la cuenca con el tipo de relieve presente, la Cuenca del Río Corredor presenta un relieve clasificado como accidentado, ya que la pendiente media se encuentra el 12% y 20% mientras la Cuenca del Río Caño Seco presenta un relieve mediantemente accidentado, pues se encuentra entre el 7% y 12%.

También se calcularon las curvas hipsométricas y las curvas de frecuencia de altitudes para ambas cuencas. La curva hipsométrica permitió de forma gráfica visualizar la relación de la altitud de la cuenca y la superficie sobre esa altitud. La curva de frecuencia de altitudes es un complemento de la curva hipsométrica y permite observar gráficamente la superficie ocupada por cada altitud.

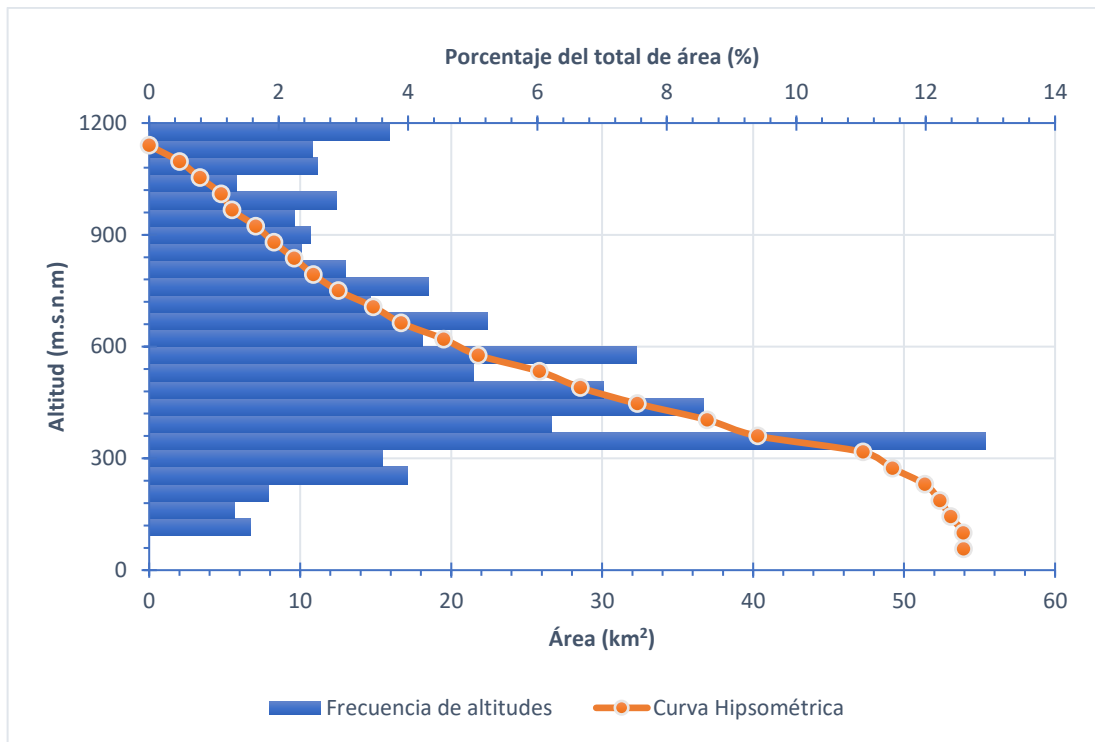


Figura 4.3 Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la Cuenca del Río Corredor

Fuente: Elaboración propia

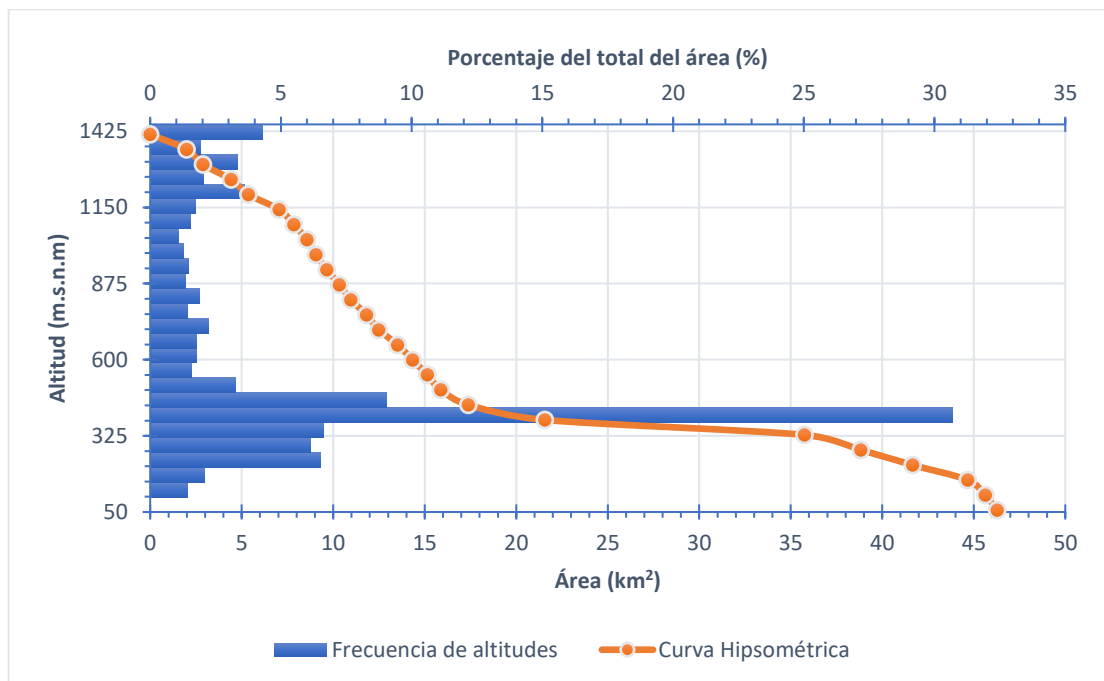


Figura 4.4 Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes de la Cuenca del Río Caño Seco

Fuente: Elaboración propia

Según la figura 2.5, las curvas hipsométricas para ambas cuencas corresponden a las de una cuenca en equilibrio, o sea se encuentran en fase de madurez. La Cuenca del Río Corredor va de los 1140 msnm hasta los 57 msnm. La altura media de dicha cuenca es de 577,28 msnm mientras la altura más frecuente es de 360 msnm cerca de un 13% del total del área mientras la que menos se presentó fue de 100,32 msnm con menos de un 1% del total del área.

Por otra parte, la Cuenca del Río Caño Seco se encuentra comprendida entre los 1414 msnm y los 57 msnm. La mayor parte del área de la cuenca se encuentra por debajo de los 1000 msnm. Presenta una elevación media de 907,81 msnm y la altura más frecuente es de 383 msnm con poco más de 30% del total del área. La altura menos frecuente es de 1034 msnm con un 1% del total.

4.1.3 Parámetros asociados a la red de drenaje

El conocer las características de la red de drenaje de las cuencas es de gran importancia pues son las que condicionan las descargas hidrológicas en estas. En el cuadro 4.3 se muestran algunos de estos parámetros.

Cuadro 4.3 Parámetros de drenaje en cuencas

Parámetro	Unidad	Cuenca Río Corredor	Cuenca Río Caño Seco
Orden de corrientes	-	3	3
Densidad de drenaje	km/km ²	0,22	0,28
Longitud de red de drenaje	km	44,43	36,07
Elevación máxima del cauce principal	msnm	838	1057
Elevación mínima del cauce principal	msnm	57	57
Longitud cauce principal	km	12,53	12,38
Pendiente cauce principal	%	6,21	8,08

Fuente: Elaboración propia

La longitud de la red de drenaje para la Cuenca del Río Corredor es de 44,43 km mientras que para la Cuenca del Río Caño Seco 36,07 km. Del orden de una cuenca se pueden inferir varias características como el tamaño de esta o el tamaño de su red de drenaje y sus características, en este caso, se obtuvo un orden de 3 para ambas cuencas (figura4.5), por lo tanto, se tratan de redes de drenaje poco ramificadas, sin demasiados tributarios para el cauce principal. De igual manera se obtuvo un bajo valor para la densidad de drenaje, menor a 1, por lo que ambas cuencas, se clasifican como una red de drenaje baja.

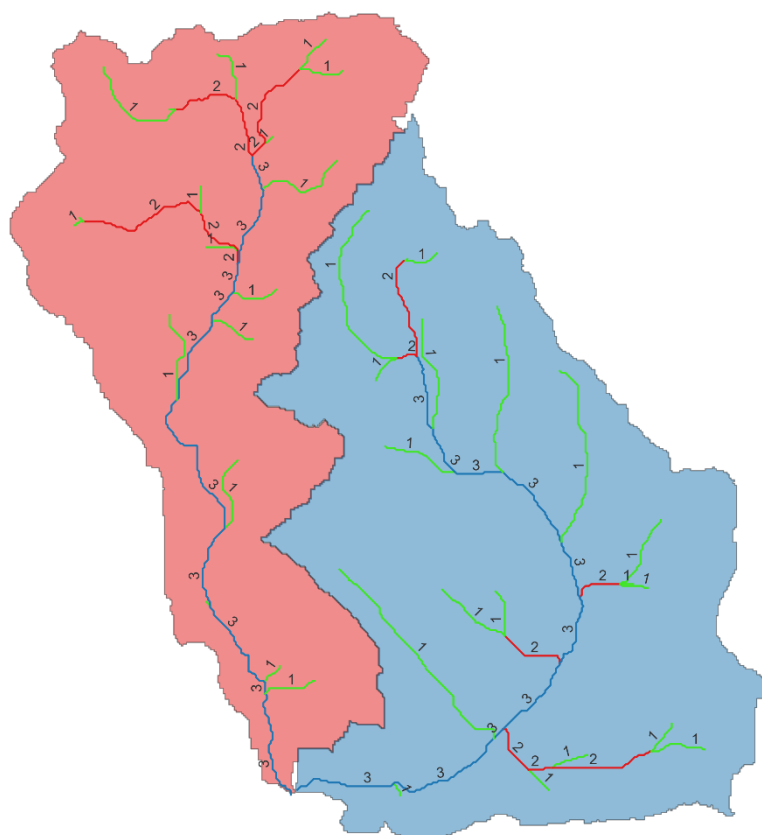


Figura 4.5 Orden de drenajes de la Cuenca del Río Corredor (Der) y la Cuenca del Río Caño Seco (Izq)

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al cauce principal, para la Cuenca del Río Corredor, tiene una longitud de 12,53 km con una elevación máxima de 838 msnm y una elevación mínima de 57 msnm por lo tanto presenta un desnivel de 781 msnm y una pendiente de poco más del 6%.

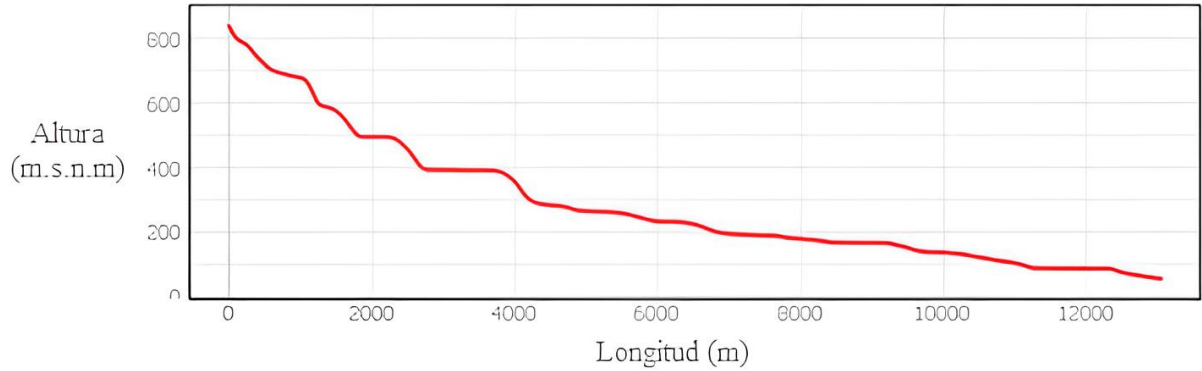


Figura 4.6 Perfil longitudinal del Río Corredor

Fuente: Elaboración propia

Según la figura 4.6 el Río Corredor presenta una pendiente más pronunciada en los primeros 4 kilómetros de longitud, es decir, en su curso alto, mientras en su curso medio y bajo el río presenta una pendiente más moderada. De igual manera, el potencial erosivo de este río se encuentra en esos primeros 4 kilómetros donde la pendiente se encuentra cerca del 11%, muy superior a la pendiente promedio del cauce que es de 6%.

Por otra parte, el cauce principal, para la Cuenca del Río Caño Seco, presenta una longitud de 12,38 km con una elevación máxima de 1057 msnm y una elevación mínima de 57 msnm, por lo que presenta un desnivel de 1000 msnm y una pendiente de poco más de 8%.

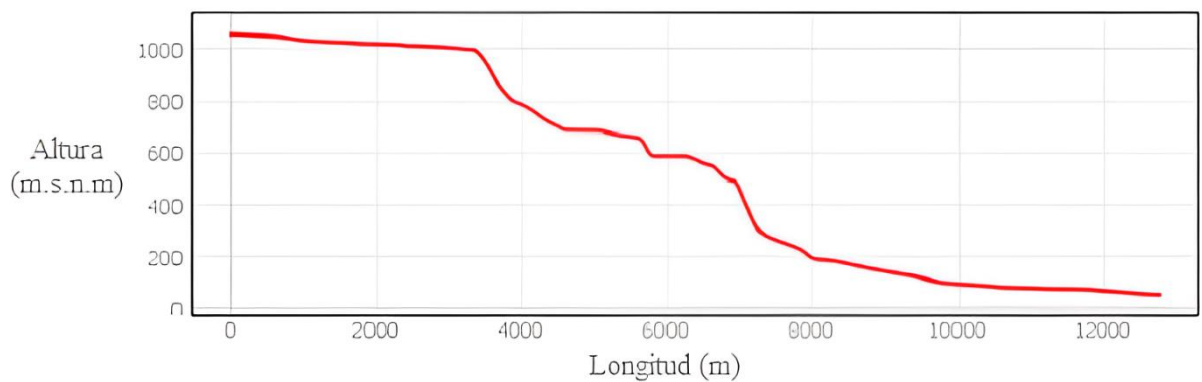


Figura 4.7 Perfil longitudinal del Río Caño Seco

Fuente: Elaboración propia

La figura 4.7 presenta el perfil longitudinal del cauce del Río Caño Seco. En este caso la pendiente más fuerte se encuentra cerca de los 4000 m hasta los 8000 m, en su curso medio, mientras en su curso alto y bajo se pueden observar pendientes moderadas. Se evidencian pendientes de hasta el 20% en el cauce, muy por encima de la pendiente promedio del cauce que es del 8%.

4.2 Análisis de precipitación

Por medio del método de los Polígonos de Thiessen se calculó la precipitación anual promedio de las cuencas de estudio, cuyos resultados se observan en el cuadro 4.4 y 4.5.

Cuadro 4.4 Precipitación anual promedio de la Cuenca del Río Caño Seco

Estación	Precipitación promedio anual (mm)
Coto 47	1490,73
San Vito de Java	2028,92
INA Río Claro	429,20
TOTAL	3948,85

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.5 Precipitación anual promedio de la Cuenca del Río Corredor

Estación	Precipitación promedio anual (mm)
Coto 47	3554,07
San Vito de Java	557,55
TOTAL	4111,62

Fuente: Elaboración propia

Los cuadros 4.4 y 4.5 permiten reconocer que tanto en la Cuenca del Río Corredor como la del Río Caño Seco la cantidad de agua que precipita es considerable, y puede, algún momento ocasionar un riesgo. Para el país, la precipitación tiene una media anual de 2926 mm (Banco Mundial, 2020), por lo que se evidencia que ambas cuencas están cerca de 1000 mm anuales por encima del promedio para el país. Sin embargo, es importante considerar que la precipitación

anual promedio calculada se basó en información del año 2014, lo que puede tener variaciones respecto a datos actuales.

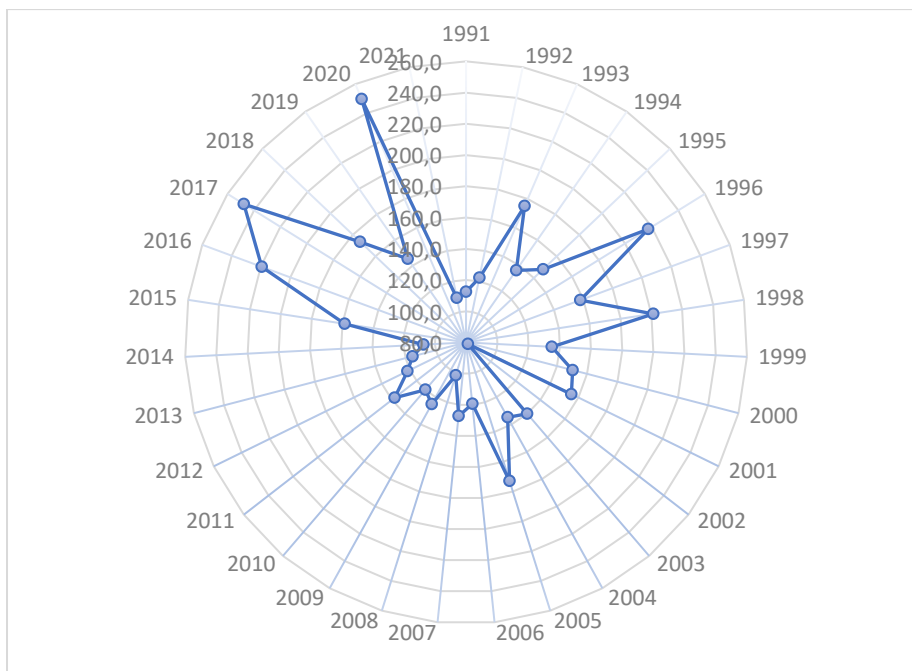


Figura 4.8 Registro de precipitaciones máximas diarias en los últimos años de la estación Coto 47

Fuente: Elaboración propia

La figura 4.8 muestra la variación de la precipitación en la zona a lo largo de los años, sin embargo, los eventos más fuertes se presentaron en la última década superando hasta 3 veces los 200 mm de precipitación anual en 24 horas. Estos datos permitieron determinar los eventos de precipitación máxima para diferentes periodos de retorno mediante la función de probabilidad Log Pearson III, donde se obtuvieron los resultados presentes en el cuadro 4.6.

Cuadro 4.6 Precipitación máxima de 24 horas para diferentes periodos de retorno para una distribución Log Pearson III

Periodo de retorno (años)	Probabilidad de excedencia $P = F(x)$	Probabilidad de no excedencia $P = 1-F(x)$	Precipitación máxima en 24 horas (mm)
2	0,50	0,50	141,44
5	0,20	0,80	178,43
10	0,10	0,90	203,57
15	0,07	0,93	218,01
25	0,04	0,96	236,18
50	0,02	0,98	261,14
100	0,01	0,99	286,71

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 4.8, para los años 2016, 2017 y 2020 se han registrado precipitaciones máximas diarias de 219,4 – 247,6 – 249,6 mm respectivamente, según la estación Coto 47, dichos valores superan las precipitaciones máximas diarias estimadas para incluso periodos de retorno de 25 años.

Asimismo, los resultados del cuadro 4.6 permitieron la elaboración de las curvas intensidad, duración y periodo de retorno por medio del modelo Dick y Peschke, En la figura 4.9 se muestra la Curva IDF únicamente para un periodo de retorno para 50 años, sin embargo, las demás Curvas IDF para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 25 y 100 años pueden ser consultadas en las figuras 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11 y 7.12 respectivamente, en la sección de anexos.

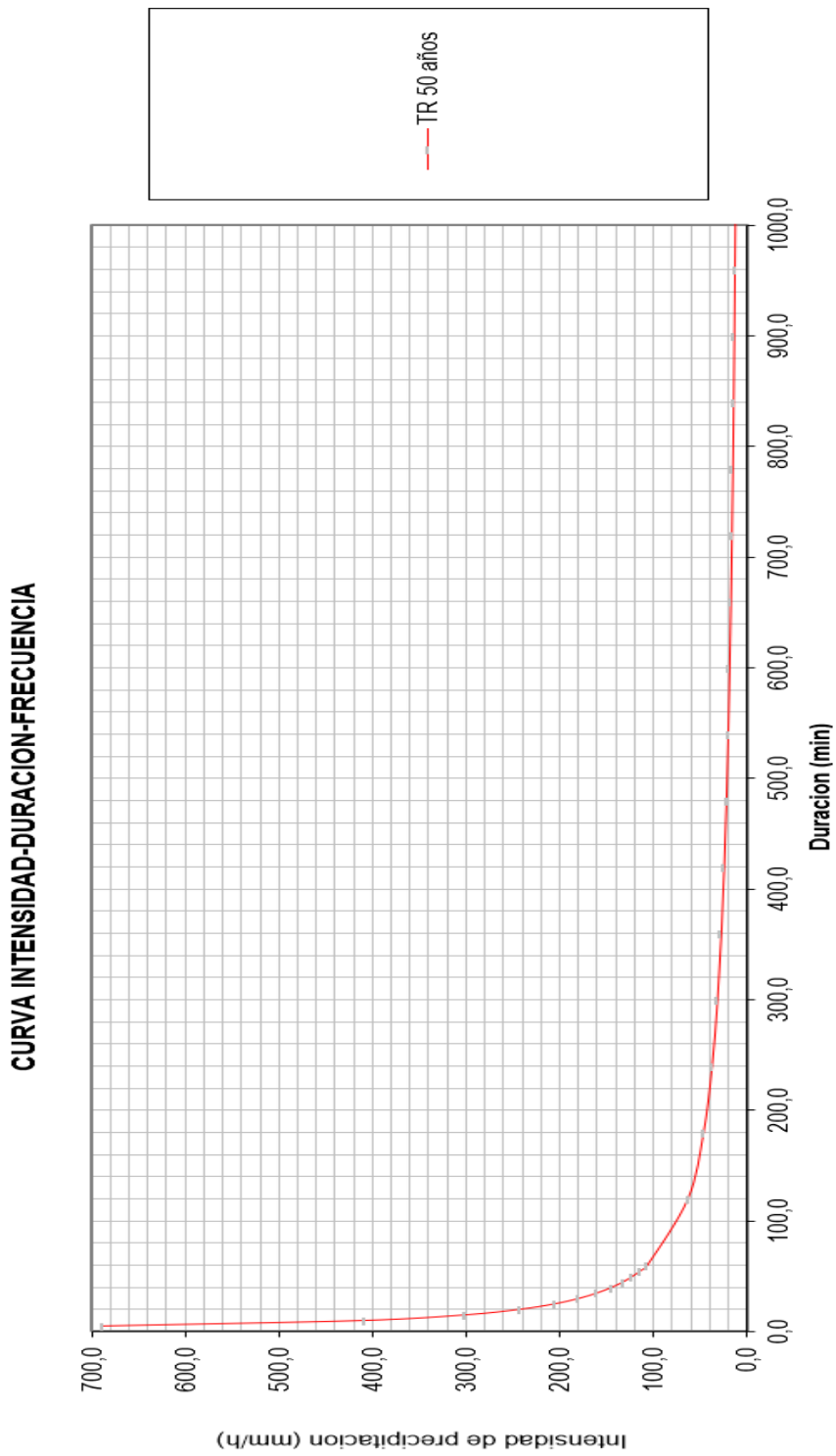


Figura 4.9 Curvas Intensidad - Duración - Periodo de retorno

Fuente: Elaboración propia

Estas curvas están elaboradas para una duración de 24 horas, por lo que se puede observar que la mayor intensidad de precipitación ocurre en las primeras dos horas de iniciado el evento.

Asimismo, se determinó la ecuación de intensidad máxima de lluvia para la zona de estudio (ecuación 5). Los parámetros K , a y b fueron calculados mediante una regresión múltiple.

$$I = \frac{1295.858 * T^{0.1796}}{D^{0.750}} \quad (5)$$

A partir de las curvas IDF se generaron hietogramas que permiten representar el comportamiento de las precipitaciones máximas durante un periodo específico. Los hietogramas son necesarios para realizar modelaciones hidrológicas y fueron generados a partir del método del bloque alterno para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. En la figura 4.10, se muestra el hietograma para un periodo de retorno de 50 años. Los hietogramas para 2, 5, 10, 15, 25 y 100 años pueden ser consultados en la sección de anexos, en las figuras 7.13, 7.14, 7.15, 7.16, 7.17 y 7.18 respectivamente.

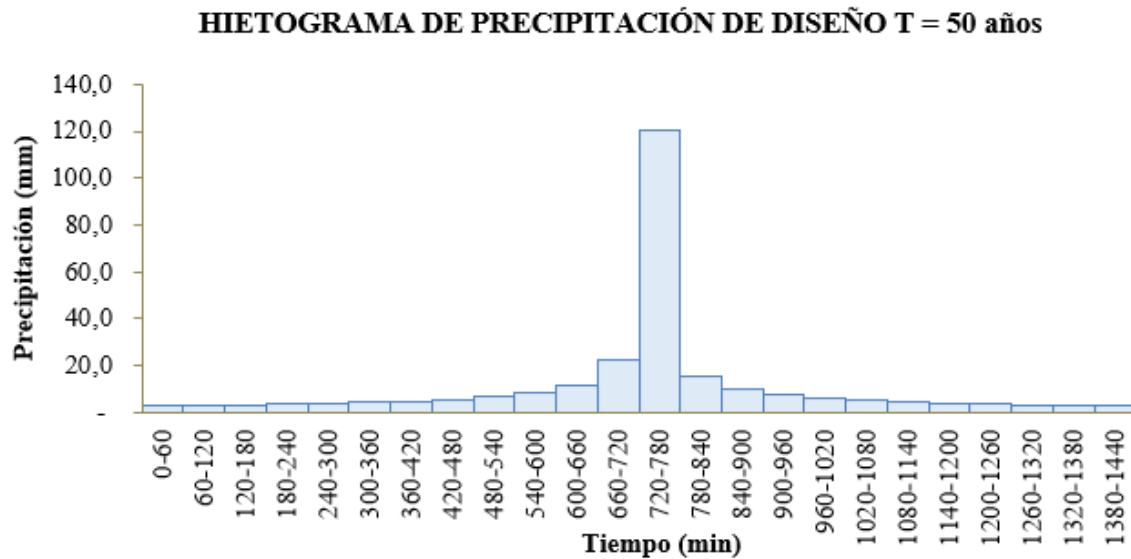


Figura 4.10 Hietograma para un periodo de retorno de 50 años

Fuente: Elaboración propia

Según la figura 4.10 para un periodo de retorno de 50 años, la precipitación máxima que podría caer es de 120mm en 60 minutos aproximadamente.

Finalmente, como parte de los datos necesarios para generar la modelación hidrológica se estimó el número de curva (cuadro 4.7) tanto para la cuenca del Río Corredor como para la Cuenca del Río Caño Seco, así como el tiempo de concentración (cuadro 4.8) y el tiempo de retardo (cuadro 4.9).

Cuadro 4.7 Número de curva calculado para las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco

Cuenca	Número de curva
Río Corredor	82,06
Río Caño Seco	73,15

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.8 Tiempo de concentración para las cuencas Río Corredor y Río Caño Seco

Nombre de la ecuación empírica	Tiempo de concentración (hr)	
	Cuenca del Río Corredor	Cuenca del Río Caño Seco
Kirpich	1,19	1,08
Californiana	1,19	1,07
Giandotti	1,87	1,53
Promedio	1,42	1,23

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 4.9 Tiempo de retardo para las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco

Tiempo de retardo (hr)	
Río Corredor	Río Caño Seco
0,85	0,74

Fuente: Elaboración propia

El número de curva fue calculado para una condición de humedad antecedente promedio (AMC II) donde se obtuvo 82,06 y 73,15 para la Cuenca del Río Corredor y la Cuenca del Río Caño Seco respectivamente. En cuanto al tiempo de concentración, se realizó un promedio de las principales ecuaciones empíricas para su cálculo, obteniendo un resultado de 1,42 horas y un tiempo de retardo de 0,85 horas para la Cuenca del Río Corredor. Para la Cuenca del Río Caño Seco, se obtuvo un tiempo de concentración de 1,23 horas y un tiempo de retardo de 0,74 horas.

4.3 Modelo hidrológico

Para llevar a cabo la modelación hidrológica mediante el software HEC – HMS para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años, fue utilizado el Método de Número de Curva, el cual realiza una transformación de la precipitación máxima anual de 24 horas correspondiente a la cuenca a datos de caudales máximos.

En el cuadro 4.10, se presenta un resumen de los parámetros ingresados al software para realizar la modelación.

Cuadro 4.10 Resumen de los datos necesarios para la modelación

Parámetro	Cuenca del Río Corredor	Cuenca de Río Caño Seco
Número de Curva	82,06	73,15
Tiempo de concentración (hr)	1,42	1,23
Tiempo de Retardo (hr)	0,85	0,74

Fuente: Elaboración propia

Además de los datos del cuadro 4.10, también es necesario ingresar los hietogramas de precipitación correspondiente para cada periodo de retorno.

En el cuadro 4.11 se muestran los resultados de la modelación hidrológica para la Cuenca del Río Corredor y la Cuenca del Río Caño Seco. Cabe mencionar que el caudal máximo resultante representa el caudal en la salida de las cuencas, en este caso, el punto de confluencia de ambos cauces.

Cuadro 4.11 Resultados modelación hidrológica

Periodo de retorno (Años)	Caudal (m3/s)
2	354.6
5	455.6
10	545.2
15	603.4
25	683.5
50	805.0
100	942.8

Fuente: Elaboración propia

Además de los resultados del cuadro 4.11, se obtuvieron los hidrogramas para cada periodo de retorno y un gráfico de profundidad de la precipitación. Para un periodo de retorno de 50 años, se muestra en la figura 4.11, mientras para los demás periodos de retorno, pueden ser consultados en las figuras 7.19, 7.20, 7.21, 7.22, 7.23 y 7.24 en la sección de anexos.

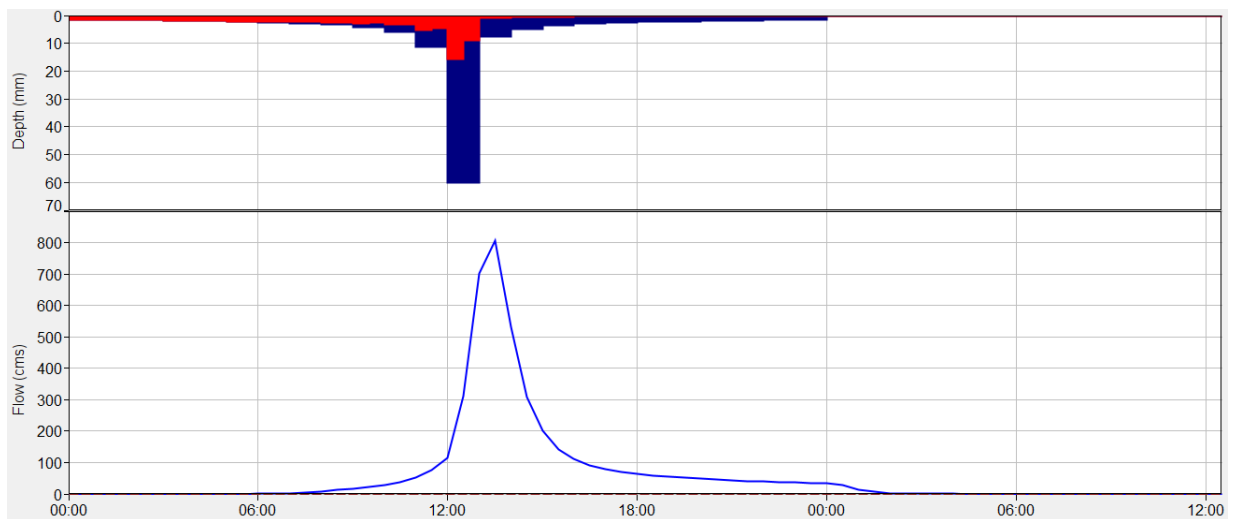


Figura 4.11 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T=50 años.

Fuente: Elaboración propia

El gráfico superior de la figura 4.11, muestra la precipitación perdida (Rojo) mientras que en azul muestra la precipitación que excede la cantidad de pérdida y que genera una escorrentía. En el punto más crítico, un evento extremo de precipitación para un periodo de retorno de 50 años puede superar en más de 40 mm la precipitación que las cuencas son capaces de asimilar.

Por otra parte, el gráfico inferior de la figura 4.11, muestra el caudal pico que puede generar un evento de precipitación máxima para un periodo de retorno de 50 años, el cual es de 805,00 m³/s.

Es importante tener en cuenta que realizar una transformación de precipitación máxima a caudal máximo tienen como resultado una estimación. Por esta razón lo más adecuado sería comprobar si los valores estimados representan el comportamiento real del río por algún método como realizar aforos y mantener un registro, sin embargo, al igual que la mayoría de los ríos en el país, no se posee un registro de caudales con los que se pueda comparar la estimación. No obstante, los resultados pueden ser comparados con otros estudios similares que se hayan realizado en el sitio o en cuencas cercanas, para de alguna forma, validar los caudales máximos obtenidos. En ese sentido, para el año 2008, Ecoplan, realizó un estudio en la zona de interés haciendo uso de los datos de la estación Coto 47 y San Vito de Java siguiendo una metodología similar a la planteada en este proyecto, donde se obtuvieron caudales máximos para diferentes periodos de retorno (cuadro 4.12).

Cuadro 4.12 Estimación de caudales máximos para las cuencas de Río Corredor y Caño Seco.

Periodo de retorno (años)	Caudal en la confluencia (m ³ /s)
2	257,00
5	396,00
10	491,00
25	611,00
50	703,50
100	796,10

Fuente: Ecoplan (2008)

Según el cuadro 4.12 para un periodo de retorno de 50 años, el caudal estimado por el mismo método tiene un valor de 703,50 m³/s mientras el resultante en la modelación realizada en este proyecto fue de 805,00 m³/s.

4.4 Comparación de datos de precipitación

Parte de los resultados de aplicar la Prueba U de Mann-Whitney se evidencian en el cuadro 4.13.

Cuadro 4.13 Cuadro de posición la Prueba U de Mann-Whitney con datos satelitales sin corregir

R	Valor P	R	Valor P
1	81,5	22,5	121,46
2	86,35	24	121,7
3	86,98	25	123,19
4	91,44	26	125,1
5	91,82	27	127,2
6	92,88	28	133,22
7	94,56	29	134,7
8	97,29	30	135
9	98,67	31	137,8
10	99,96	32	140,1
11	102	33	141,26
12	104,16	34	145,2
13	107,4	35	150,4
14	108,82	36	152,53
15	113,22	37	155
16	115,33	38	158,6
17	115,4	39	173
18	115,79	40	173,6
19	119,5	41	176,69
20	119,79	42	201,3
21	120	43	219,4
22,5	121,46	44	247,6

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 4.13 muestra la polarización que hay entre los datos de ambas series. Las celdas a color representan los datos de la estación meteorológica mientras las celdas en blanco

representan los datos satelitales. Como se observa los primeros 16 de los primeros 22 datos pertenecen a datos satelitales y de igual forma, 16 de los restantes 22 datos pertenecen a los datos de la estación meteorológica. Esto refleja que los datos de estación meteorológica tienden a ser mayores en su conjunto que los obtenidos por medio de un satélite. Lo anterior se confirma con los resultados de aplicar la Prueba U de Mann-Whitney (cuadro 4.14) para un nivel de significancia de 0.05.

Cuadro 4.14 Resultado de la Prueba U de Mann-Whitney con datos satelitales sin corregir

Parámetro	Valor
U	105
Valor crítico	158
U < Valor crítico	

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 4.14 como se menciona anteriormente, presenta los resultados de aplicar la prueba de comparación estadística U de Mann-Whitney donde se obtuvo U menor al valor crítico, lo que implica el rechazo de la hipótesis nula propuesta (no hay diferencia entre las medias de los conjuntos) y por lo tanto si existe una diferencia en la media de los conjuntos y por ende son estadísticamente distintos, razón que hace que no sea posible utilizar los datos de precipitación satelital de este tipo sin realizar algún ajuste previo.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

1. Se logró determinar los parámetros necesarios mediante el uso de sistemas de información geográfica que permitieron comprender los procesos hidrológicos presentes en la Cuenca del Río Corredor y la Cuenca del Río Caño Seco y la incidencia que tienen los eventos extremos de precipitación para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años en la confluencia de los cauces principales de cada cuenca. Entre los principales resultados, la Cuenca del Río Corredor se trata de una cuenca pequeña, con un relieve accidentado, presenta una forma ensanchada, lo que la hace propensa a crecidas rápidas, según su curva hipsométrica es una cuenca que se encuentra en su fase de madurez, por lo que representa una cuenca en equilibrio, tiene un orden de drenaje igual a 3 y una densidad de drenaje menor a 1, lo que significa que posee una red de drenaje baja. En cuanto al cauce principal, se pueden observar pendientes fuertes, erosivas de hasta un 11%. En cuanto a la Cuenca del Río Caño Seco igualmente se trata de una cuenca pequeña, pero con un relieve medianamente accidentado. Su forma es ligeramente ensanchada lo que la hace una cuenca menos propensa a crecidas rápidas, es una cuenca que, según su curva hipsométrica, se encuentra en equilibrio. Al igual que la Cuenca del Río Corredor, posee un orden de drenaje igual a 3 y una densidad de drenaje menor a 1 por lo que también se trata de una cuenca con una red de drenaje baja. Posee en su cauce principal tramos con pendientes muy fuertes de hasta el 20%.
2. Los datos de precipitación máxima de la estación Coto 47, representan 63% del área comprendida entre ambas cuencas. Estos datos fueron sometidos a un análisis estadístico para determinar a cuál distribución teórica se ajustaban mejor, la cual fue la distribución Log – Pearson III la que presentó el mejor ajuste a las pruebas de bondad realizadas y la función de probabilidad empleada para la estimación de precipitación máxima de 24 horas para periodos de retorno de 2, 5, 10, 15, 25, 50 y 100 años, datos que permitieron la aplicación del modelo hidrológico en el software HEC-HMS, obteniendo como resultados los caudales máximos de 354,6 – 455,6 – 545,2 – 603,4 – 683,5 – 805,0 – 942,8 m³/s en la confluencia de los cauces principales de las cuencas de estudio, para

cada periodo de retorno respectivamente y para condiciones de humedad antecedente AMC II.

3. Dado que los datos de precipitación utilizados representan un 63% del área comprendida entre ambas cuencas se genera cierta incertidumbre en la modelación hidrológica. Lo ideal es generar modelos lo más cercanos a la realidad posible, sin embargo, en el país no se cuenta con una amplia red de estaciones, y en muchas ocasiones cuentan con faltantes de datos o incluso es muy difícil poder acceder a esa información, ya que se tratan de estaciones privadas. Dicho esto, se realizó una comparación de un conjunto de datos de precipitación satelital de descarga directa y los datos de precipitación de la estación Coto 47. Ambos conjuntos de datos fueron sometidos al método de comparación estadística denominado como Prueba U de Mann-Whitney donde se realizó una comparación sobre la media de los conjuntos y se logró determinar que se presenta una diferencia significativa en la media de los grupos, cuando los datos satelitales no tienen algún tipo de corrección.

5.2 Recomendaciones

1. Se recomienda a las municipalidades de las zonas de interés, en caso de que no se tenga, recopilar información de interés como curvas de nivel o modelos de elevación digital de la zona y en caso de contar con ellos, mantener una base de datos lo más actualizada posible. Este esfuerzo beneficiaría los proyectos futuros que se realicen y además brindaría información confiable, apegada a la realidad, para el desarrollo de los proyectos, brindando así, resultados más certeros.
2. Dado que, la información de precipitación disponible para la zona no representa el total del área comprendida, se recomienda siempre usar datos de precipitación que representen en su mayoría la zona de estudio o buscar otra fuente de datos. En caso de datos satelitales, realizar un análisis y ajuste de los datos antes de emplearse un proyecto y de ser posible, validar con investigaciones similares ya sea del lugar o de cuencas cercanas que posean características parecidas.

3. Es ideal que los resultados obtenidos de la modelación hidrológica en Hec – Hms sean sometidos a pruebas de calibración que permita la optimización de los parámetros obtenidos.
4. Se recomienda la instalación de una estación meteorológica cercana o dentro de Ciudad Neily que permitan realizar estimaciones más precisas y que permita a la Comisión Nacional de Emergencias implementar medidas necesarias para disminuir los riesgos en la población y daños a la infraestructura.
5. Finalmente, se le recomienda a la Comisión Nacional de Emergencias (CNE), realizar una modelación hidráulica con los datos resultantes en este proyecto pues los caudales máximos son mayores que los del estudio realizado en el 2008 lo que puede generar cambios importantes como zonas de inundación que no se tienen consideradas actualmente.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Angulo, M., & Saavedra, O. (2018). Hydrological Modeling of Maylanco Basin Using HEC-HMS. *UPB - Investigación y Desarrollo*, 18(1), 53–67. <https://doi.org/10.23881/idupbo.018.1-4i>
- Aparicio, F. (1987). *Fundamentos de la hidrología superficial* (1era Edici). Editorial Grupo Noruega.
- Ascencio, S., Moreno, H., & Gisbert, J. (2011). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10782/Morfologia_cuenca.pdf?sequence=1
- Banco Mundial. (2020). *Promedio detallado de precipitación (mm anuales)*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/AG.LND.PRCP.MM?end=2020&start=2020&view=bar>
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw Hill Higher Education.
- Ecoplan. (2008). *Estudio Integral de la Gestión del Riesgo de la Cuenca de los ríos Caño Seco y Corredor*. Comisión Nacional de Emergencias.
- EROS. (2018). USGS. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1>
- Estrada, E. G. (2007). *Pruebas de bondad de ajuste para distribuciones estables* [Instituto de enseñanza e investigación en ciencias agrícolas]. http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/1536/1/Gonzalez_Estrada_EDC_Estadistica_2007.pdf
- Fernández, L. R., & García, F. F. (2014). Utilidad de la precipitación obtenida por satélite en la modelación hidrológica aplicada a la cuenca del río Júcar Usefulness of satellite-estimated rainfall in hydrologic modeling. *Anales Científicos*, 75(1), 80–89. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7003400>
- Forero, N. S. (2017). *Cálculo de la precipitación media sobre la península de la guajira usando el método thiessen* [Universidad Militar Nueva Granada]. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/16671>
- Gaspari, F. J., Vagaría, A. M. R., & Senisterra, G. E. (2013). *Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas* (Priemera e). Editorial de la Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Gavilan, S., Pastore, J. I., Uranga, J., Ferral, A., Lighezzolo, A., & Aceñolaza, P. (2019). Metodología operativa para la obtención de datos históricos de precipitación a partir de la misión satelital Tropical Rainfall Measuring Mission. Validación de resultados con datos

de pluviómetros. *Revista de La Facultad de Agronomía*, 118(1), 115–125.
<https://doi.org/10.24215/16699513e011>

- Gutiérrez Caiza, C. (2014). *Hidrología básica y aplicada*. Editorial Universitaria Abya-Yala.
- Isidro, M. L., Díez-Herrero, A., & Huerta, L. L. (2009). Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: Avances recientes. *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29, 29–37.
http://transit.gencat.cat/web/.content/documents/seguretat_viaria/pesv_2014_2020.pdf%5Cnhttp://interior.gencat.cat/web/.content/home/010_el_departament/plans_i_actuacions/pla_general_de_seguretat_de_catalunya/docs/pla_seguretat_catalunya.pdf%5Cnhttp://int
- Mártinez, H. I. (2019). *Evaluación hidrológica para la determinación de caudales máximos en la Subcuenca del Río Sayacc, Vischongo -Vilcashuamán - Ayacucho*. [Universidad Nacional de San Cristobal de Huamanga].
<http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/3599>
- Ministerio de Ambiente. (2021). *Parámetros morfométricos de una cuenca*.
https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Planes_y_Programas/Planes_de_Ordenacion_y_Manejo_de_Cuencas_Hidrografica/La_Vieja_-_POMCA_en_Ajuste/Fase_Diagnostico/7_CapituloI_Diagnostico_Morfometria.pdf%3E
- Molina, R. (2022, October 9). Zona Sur epicentro de emergencias atendidas por Bomberos. *El Guardian*. <https://elguardian.cr/zona-sur-epicentro/>
- O’neal Coto, K. (2016). *Geógrafos analizaron riesgos de la cuenca del río Caño Seco*.
<https://www.ucr.ac.cr/noticias/2016/06/08/geografos-analizaron-riesgos-de-la-cuenca-del-rio-cano-seco.html>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Ordóñez, J. (2011). ¿Qué Es Cuenca Hidrológica? *Sociedad Geológica de Lima*, 1, 1–44.
http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf
- Ortega, E., Ochoa, C., & Molina, M. (2021). Fundamentos de medicina basada en la evidencia. *Evid Pediatr*, 1, 1–6. https://evidenciasenpediatria.es/files/41-14057-RUTA/37_Fundamentos_Pruebas_no_paremetricas.pdf
- Parra, K. Á., & Vide, J. M. (2013). Análisis estadístico de los eventos extremos de precipitación en la zona centro y sur de Chile continental. *Cuadernos Geográficos*, 52(1), 69–83.
<http://revistaseug.ugr.es/index.php/cuadgeo/article/view/926/1123>
- Peralta, N., Costa, J. L., Castro Franco, M., & Balzarini, M. (2013). Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. *Interciencia*, 38(6), 418–

424. <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/2242>
- Perez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería Departamento de Meteorología e Hidrología.
- Quispe, F. (2018). *Generación de intensidad máxima de precipitación pluvial con fines de diseño de infraestructura hidráulica en la localidad de Capachica - Puno* [Universidad Alas Peruanas]. <https://repositorio.uap.edu.pe/handle/20.500.12990/2149>
- Ramírez, J. L. (2015). Alternativas de manejo sustentable de la subcuenca del río Pitura, provincia de Imbabura, Ecuador. *Universidad Nacional de La Plata, Argentina*, 136. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/49801/Documento_completo.pdf-PDFA-U.pdf?sequence=3
- Reyna, S. E. (2019). *Linkedin*. Validación de Procesos 1: Test Estadísticos Para Comparar Medias / Medianas de Distintos Lotes - Inferencia Estadística. <https://es.linkedin.com/pulse/validación-de-procesos-1-test-estadísticos-para-comparar-reyna>
- Riccardi, G. (2004). *Hidrología eb Medios Antropizados*. Universidad Nacional de Rosario. <http://c-virtual.fceia.unr.edu.ar/>
- Sin Autor. (2012, June 21). Fuerte Lluvia inunda hospital de Ciudad Neily. *La Nación*. <https://www.nacion.com/sucesos/fuerte-lluvia-inunda-hospital-de-ciudad-neily/RWPNXNLG75G33JHTQOC2QBHDXQ/story/>
- Smith, R., & Campuzano, C. (2016). Análisis del ajuste de modelos de regresión en hidrología. *XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, 1–23. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7945>
- Stefanowitsch, A. (n.d.). *Valores críticos para la Prueba Mann-Whitney*. https://espanol.libretexts.org/Ciencias_Sociales/Ciencias_Sociales/Antropologia/Lingüística/Lingüística_del_corpus%3A_una_guía_para_la_metodología_%28Stefanowitsch%29/14%3A_Tablas_estadísticas/14.3%3A_Valores_críticos_para_el_texto_Mann-Whitney-Text
- Suárez-aguilar, Z. E., Sepúlveda-delgado, O., & Canaria-camargo, M. P. L. C. (2020). Modelo matemático para estimar curvas de intensidad , duración y frecuencia de lluvias extremas en Tunja , Colombia Mathematical model to estimate curves of intensity , duration and frequency of extreme rains in Tunja , Colombia. *Centro de Información Tecnológica*, 31, 193–206. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642020000100193&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- Ugarte, O. (2020, November 5). Lluvias provocan ruptura de dique e inundaciones en Ciudad Neily. *Semanario Universidad*. <https://semanariouniversidad.com/pais/lluvias-provocan->

ruptura-de-dique-e-inundaciones-en-ciudad-neily/

- Varona Alama, M. (2018). *Modelo hidrológico de la cuenca Catamayo-Chira hasta el ingreso al reservorio Poechos usando Hec-Hms*. [Universidad de Piura]. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3629>
- Vásquez, A., Mejía, A., Faustino, J., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., Vásquez, C., Castro, A., Tapia, M., & Alcántara, J. (2016). Manejo Y Gestión De Cuencas Hidrográficas. In *Universidad Nacional Agraria La Molina* (1st ed.). Fondo Editorial - UNALM. <https://acortar.link/KCyUa>
- Vélez, J. J., & Adriana, B. (2011). Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *DYNA*, 78. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000100006
- Villón, M. (2004). *Hidrología* (1st ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2006). *Hidrología Estadística* (1 ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2014). *HEC - HMS Ejemplos*. Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Villón, M. (2022). *Hidrología* (2nd ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Zucarelli, G. V. (2017). Regionalización Hidrológica Con Métodos Estadísticos Multivariados. *Programa de Doctorado En Ciencias y Tecnología Ambiental*, 1–89. <https://core.ac.uk/reader/95054330>

ANEXOS

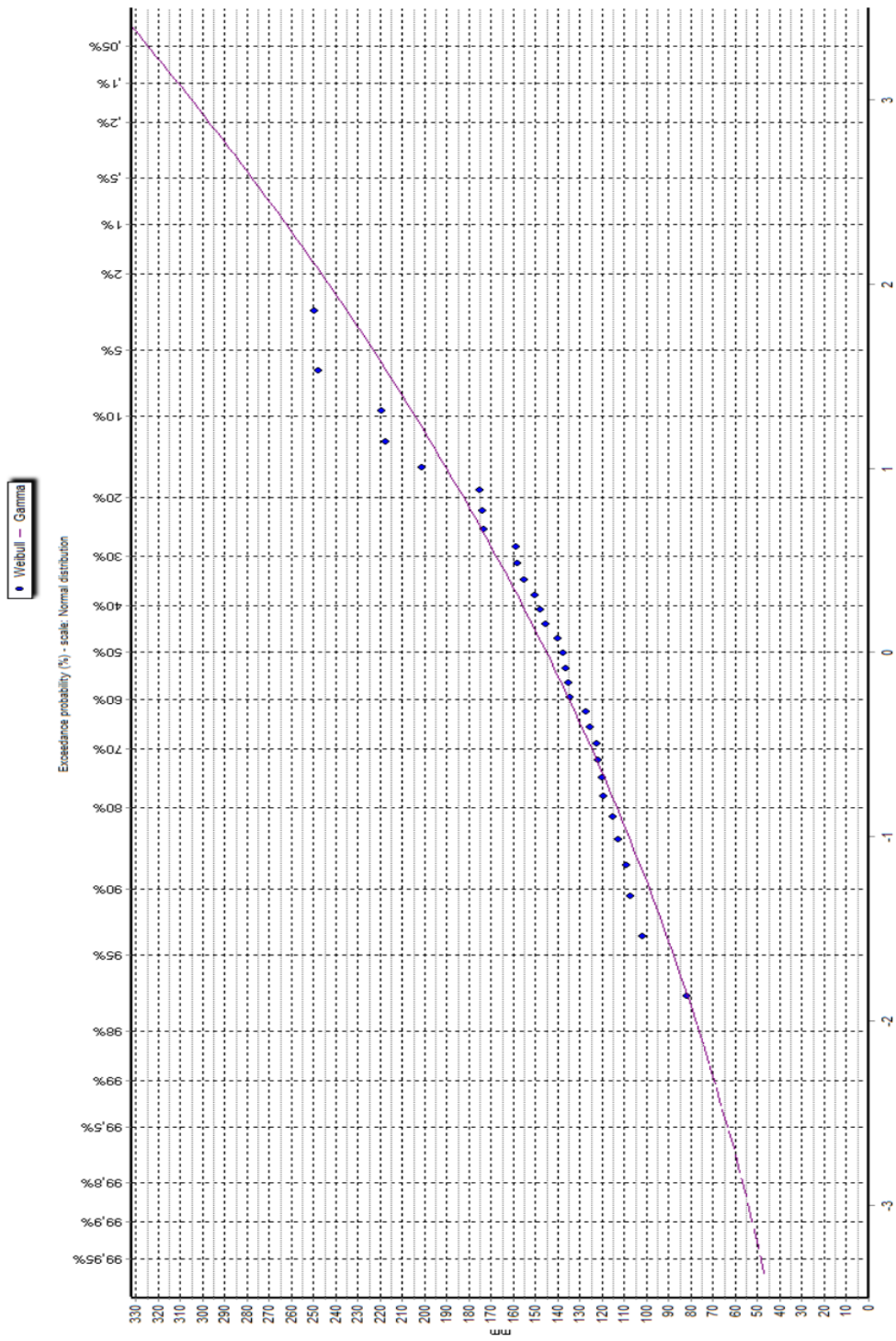


Figura 7.1 Ajuste gráfico de datos a la distribución Gamma.

Fuente: Elaboración propia

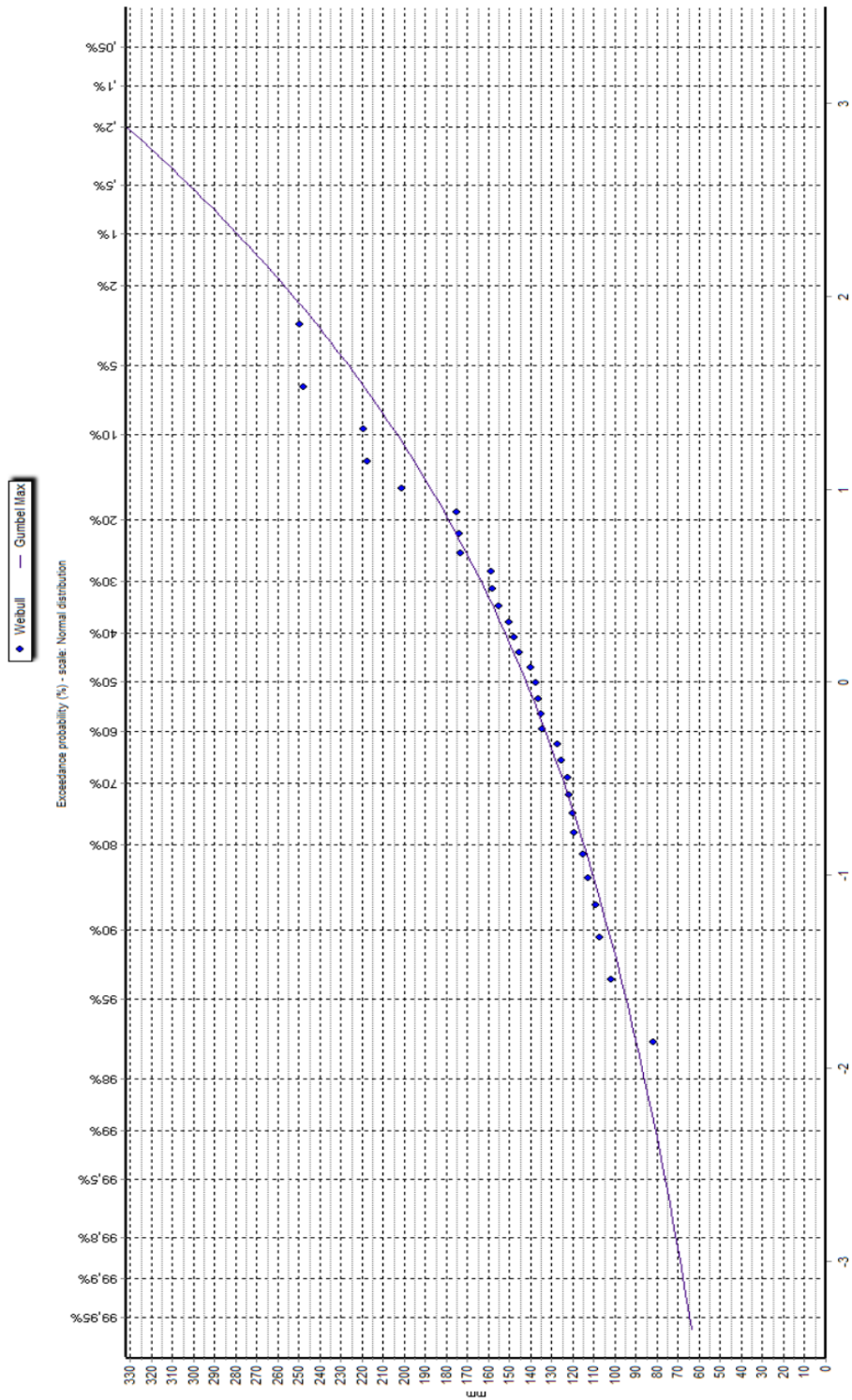


Figura 7.2 Ajuste gráfico de datos a la distribución Gumbel.

Fuente: Elaboración propia

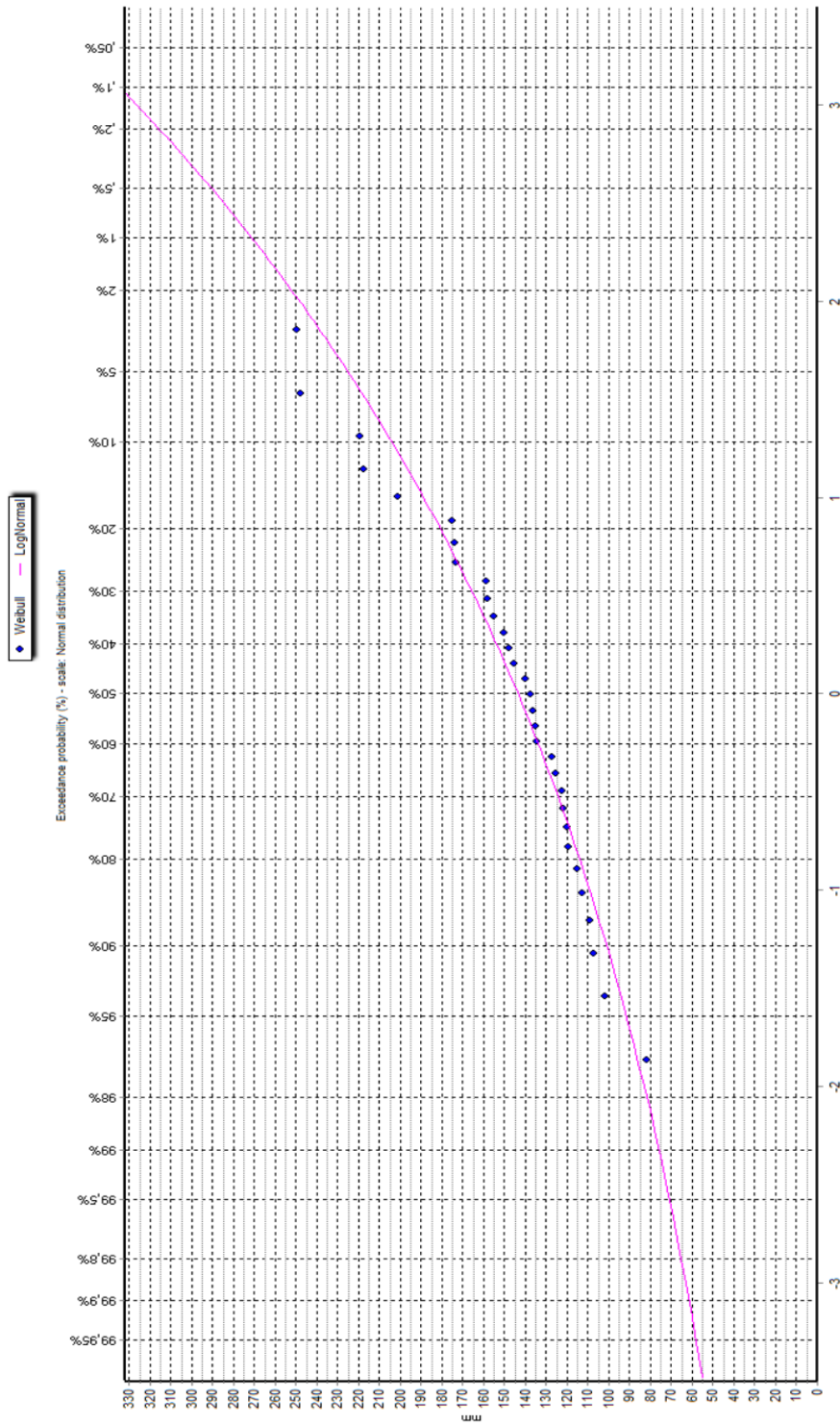


Figura 7.3 Ajuste gráfico de datos a la distribución Log Normal.

Fuente: Elaboración propia

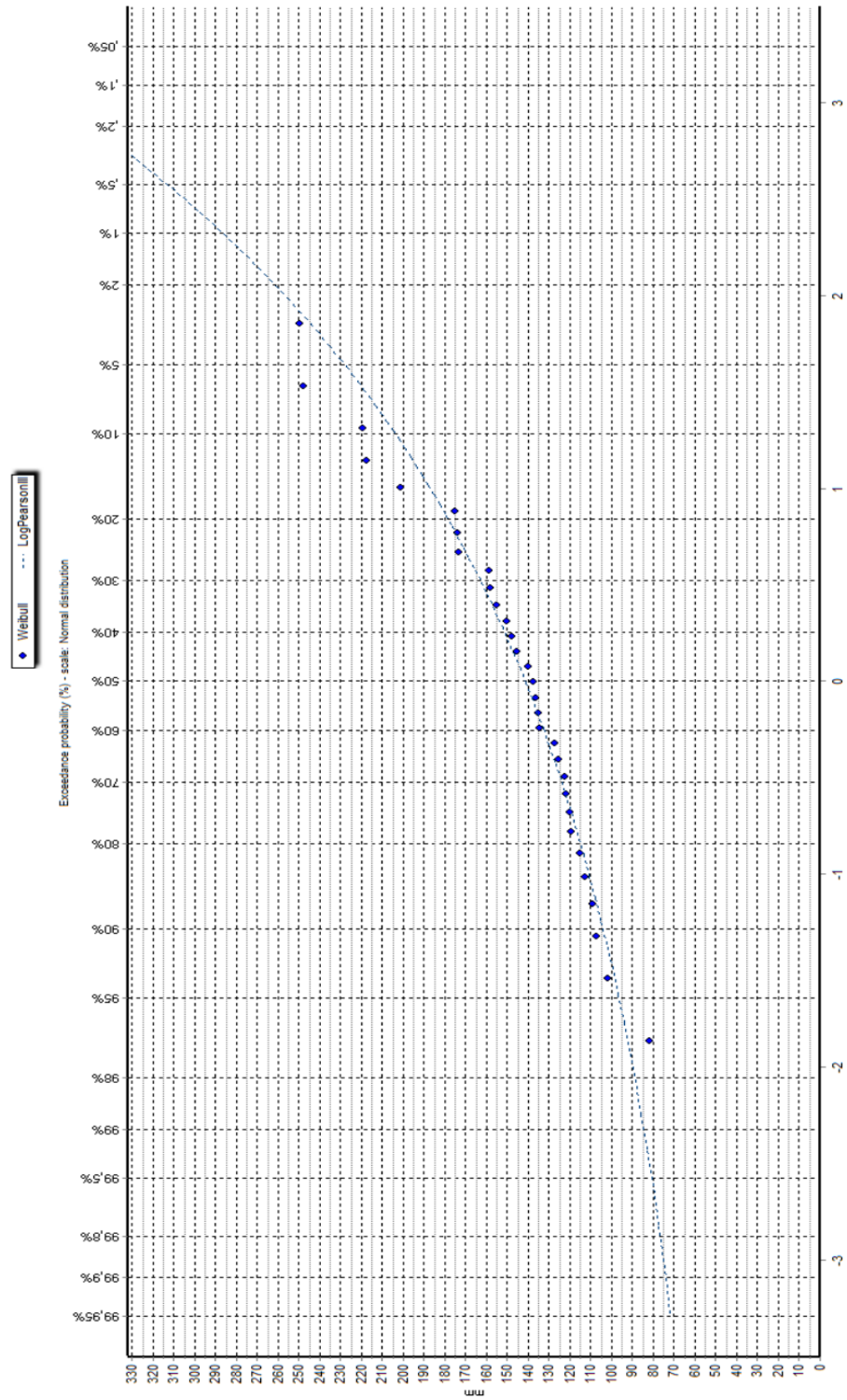


Figura 7.4 Ajuste gráfico de datos a la distribución Log Pearson III.

Fuente: Elaboración propia

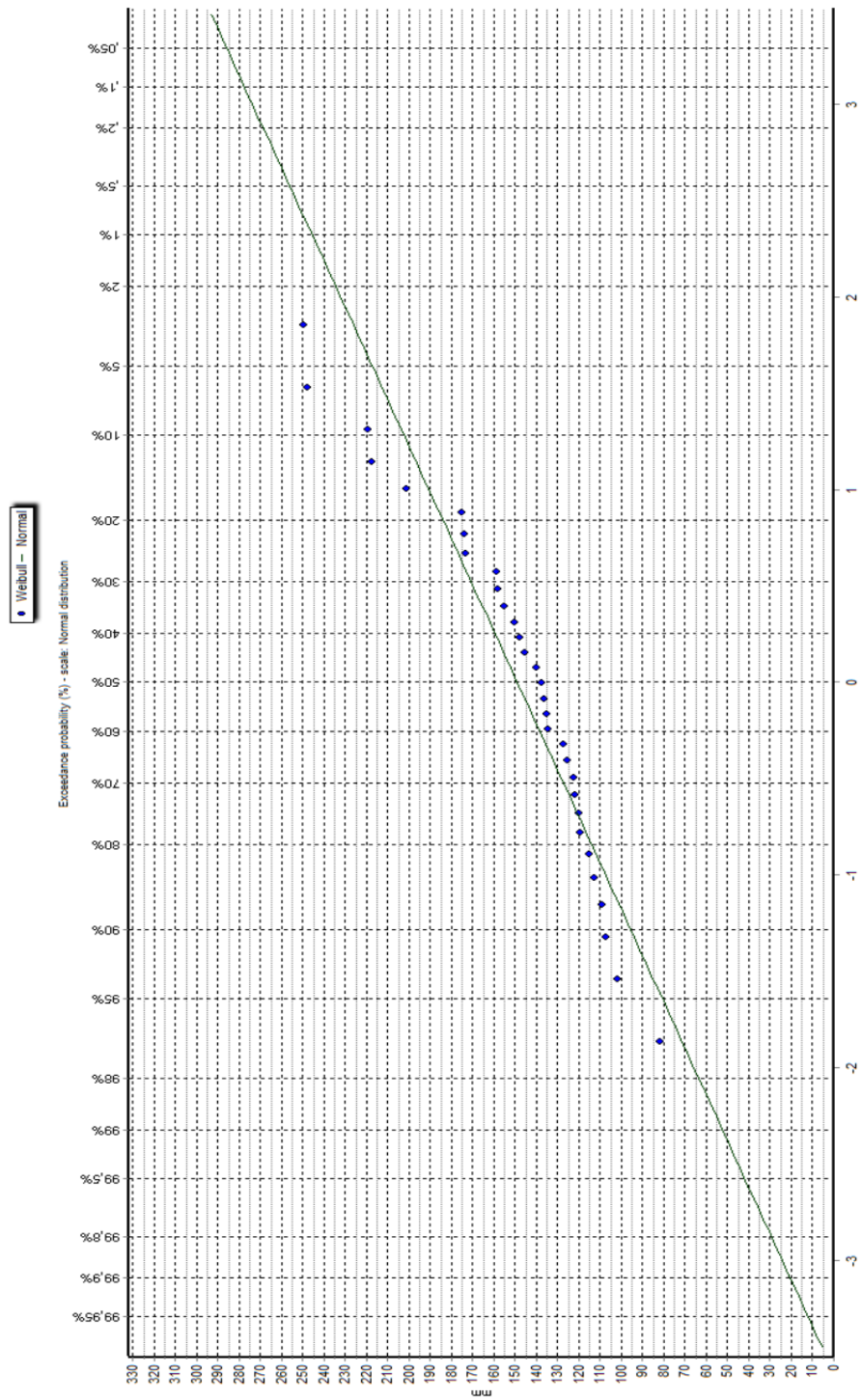


Figura 7.5 Ajuste gráfico de datos a la distribución Normal.

Fuente: Elaboración propia

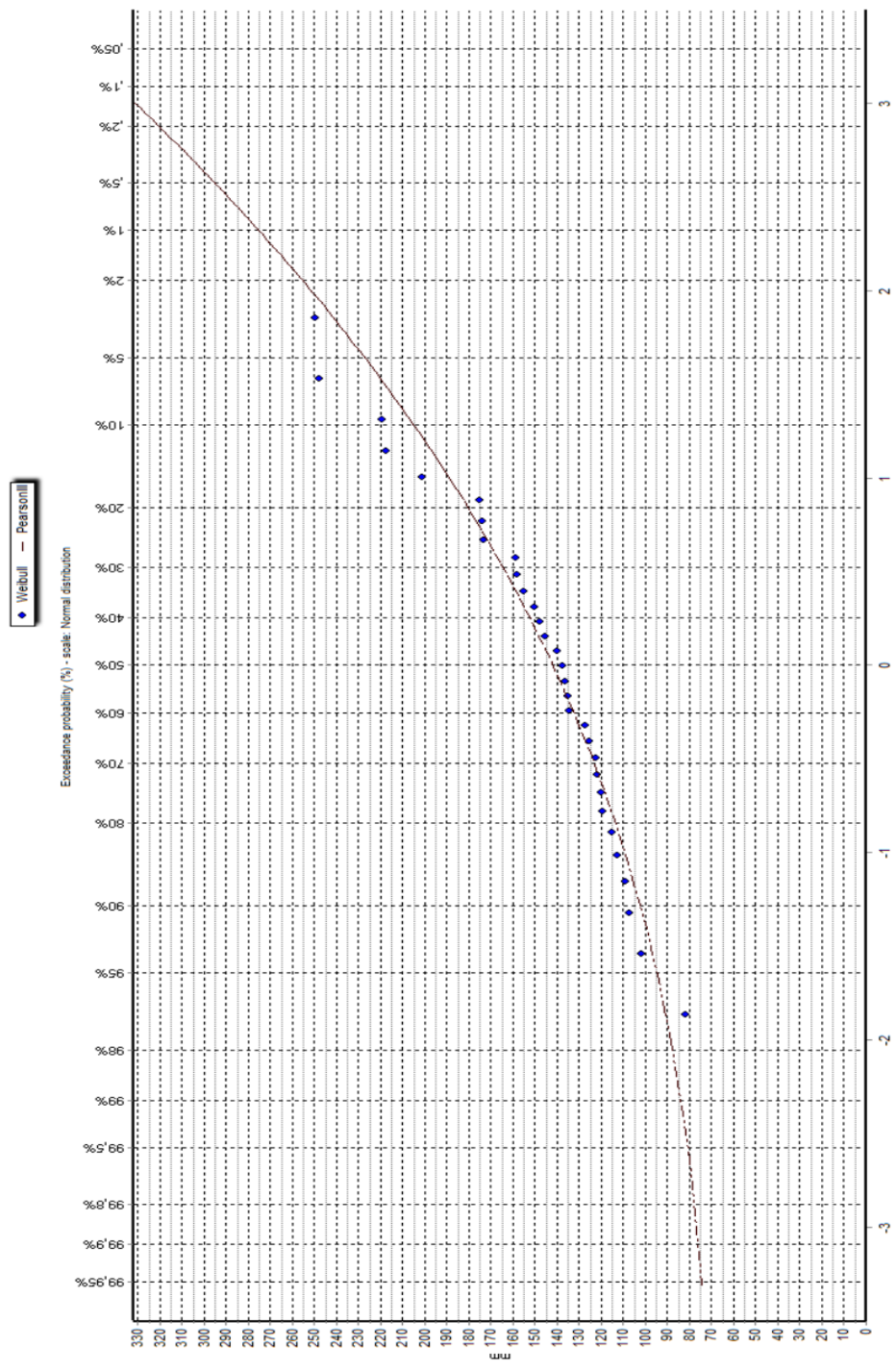


Figura 7.6 Ajuste gráfico de datos a la distribución Pearson III.

Fuente: Elaboración propia

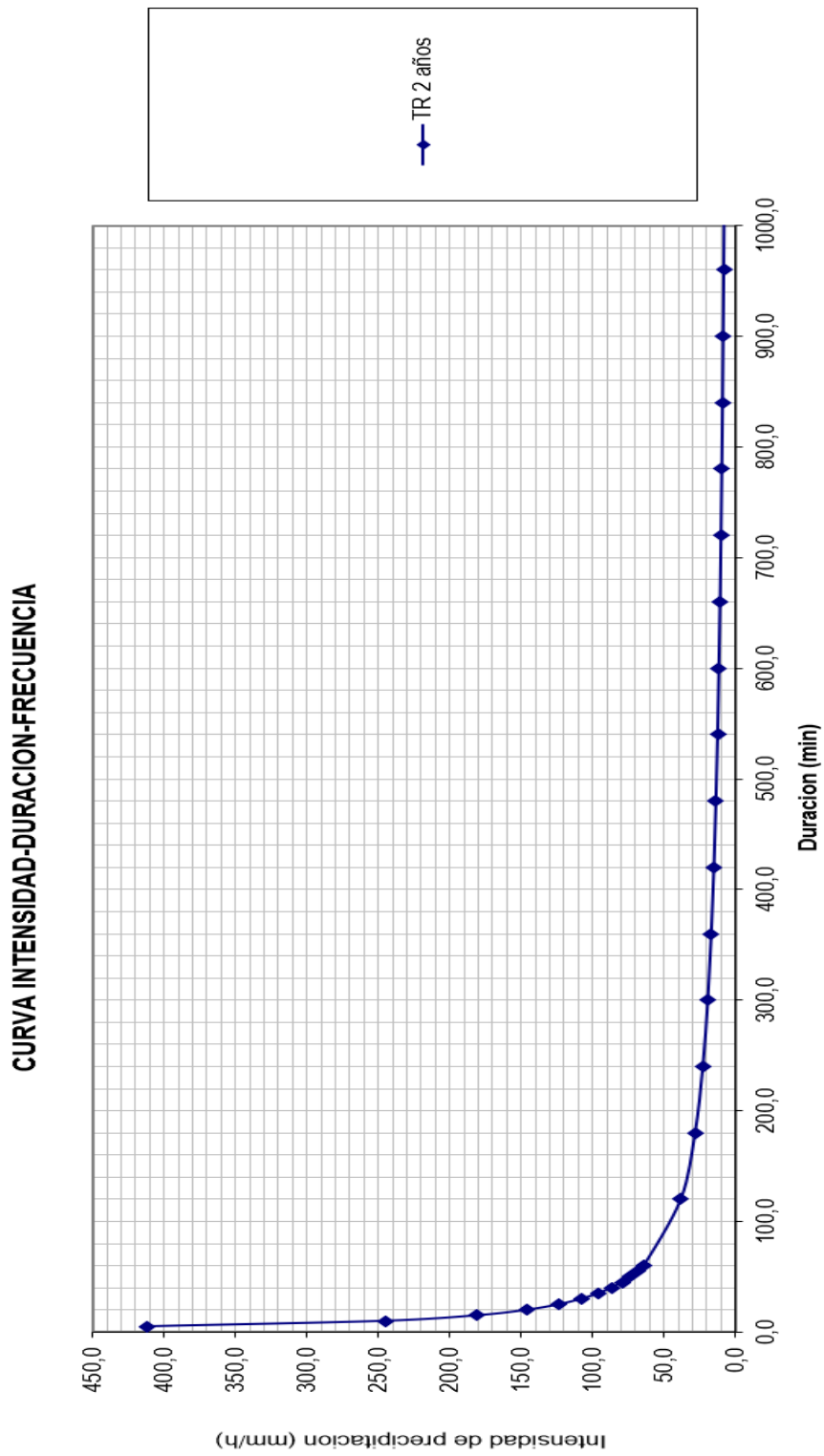


Figura 7.7 Curva IDF para T = 2 años
 Fuente: Elaboración propia

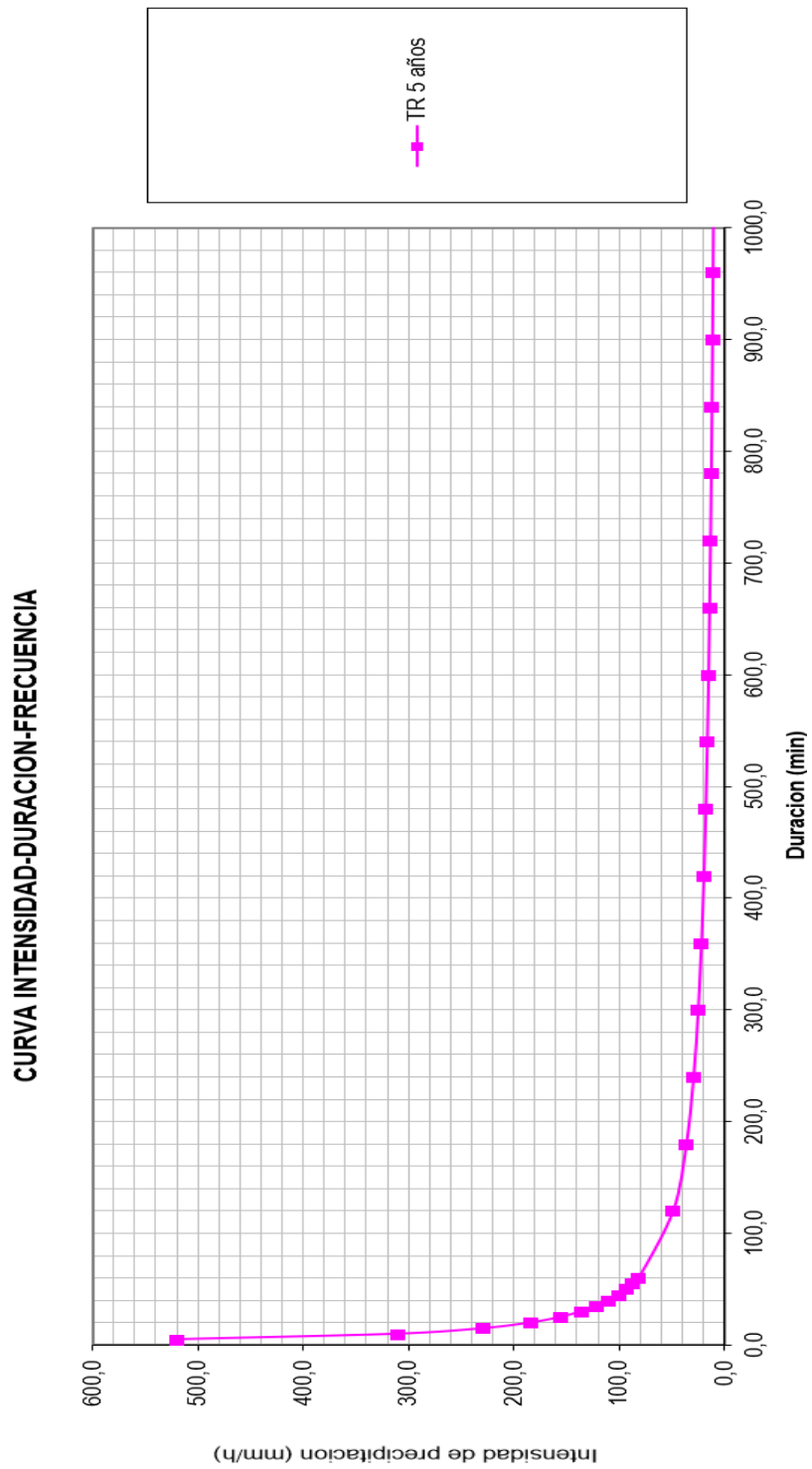


Figura 7.8 Curva IDT para T = 5 años
 Fuente: Elaboración propia

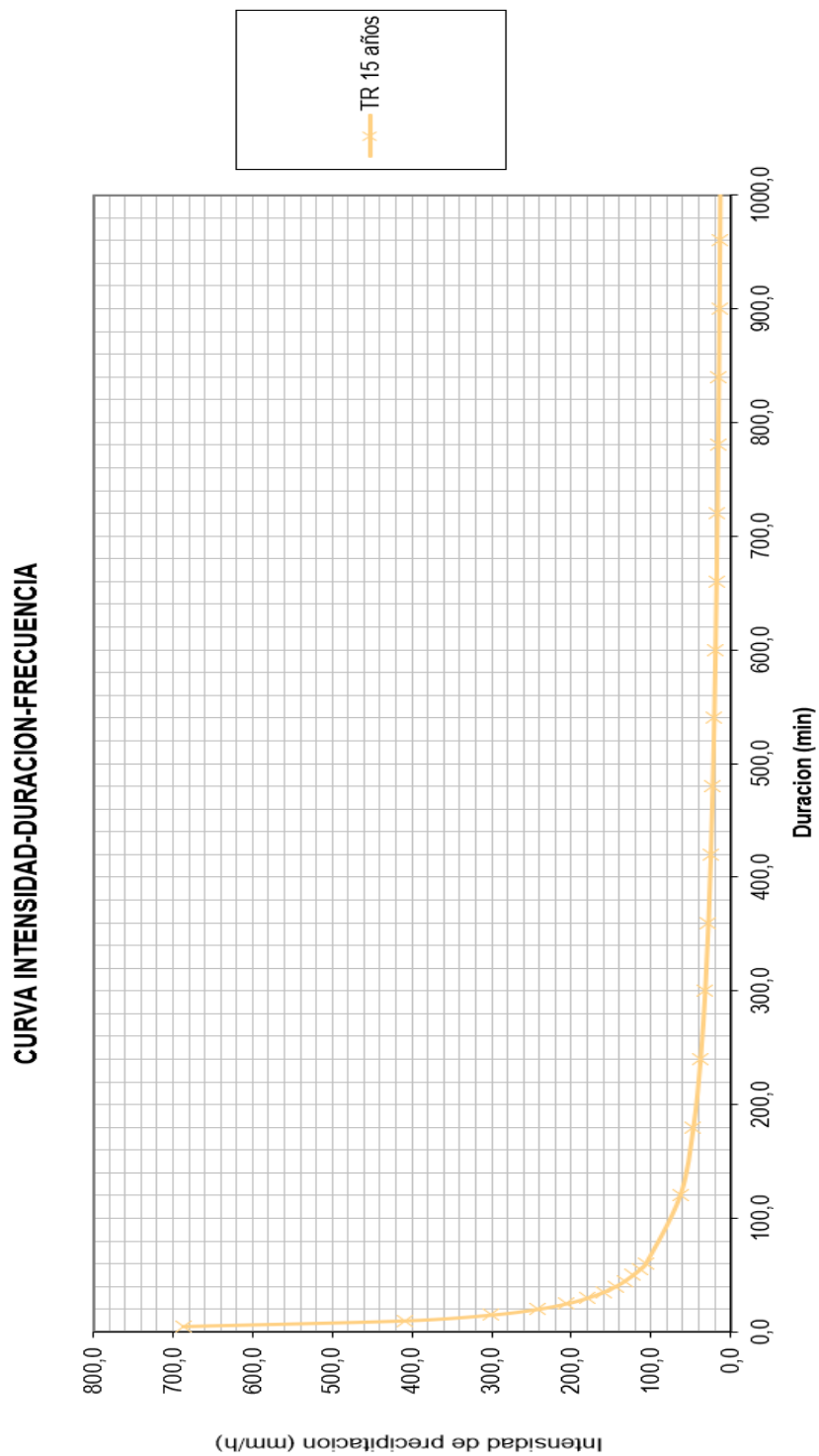


Figura 7.10 Curva IDF para T = 15 años
 Fuente: Elaboración propia

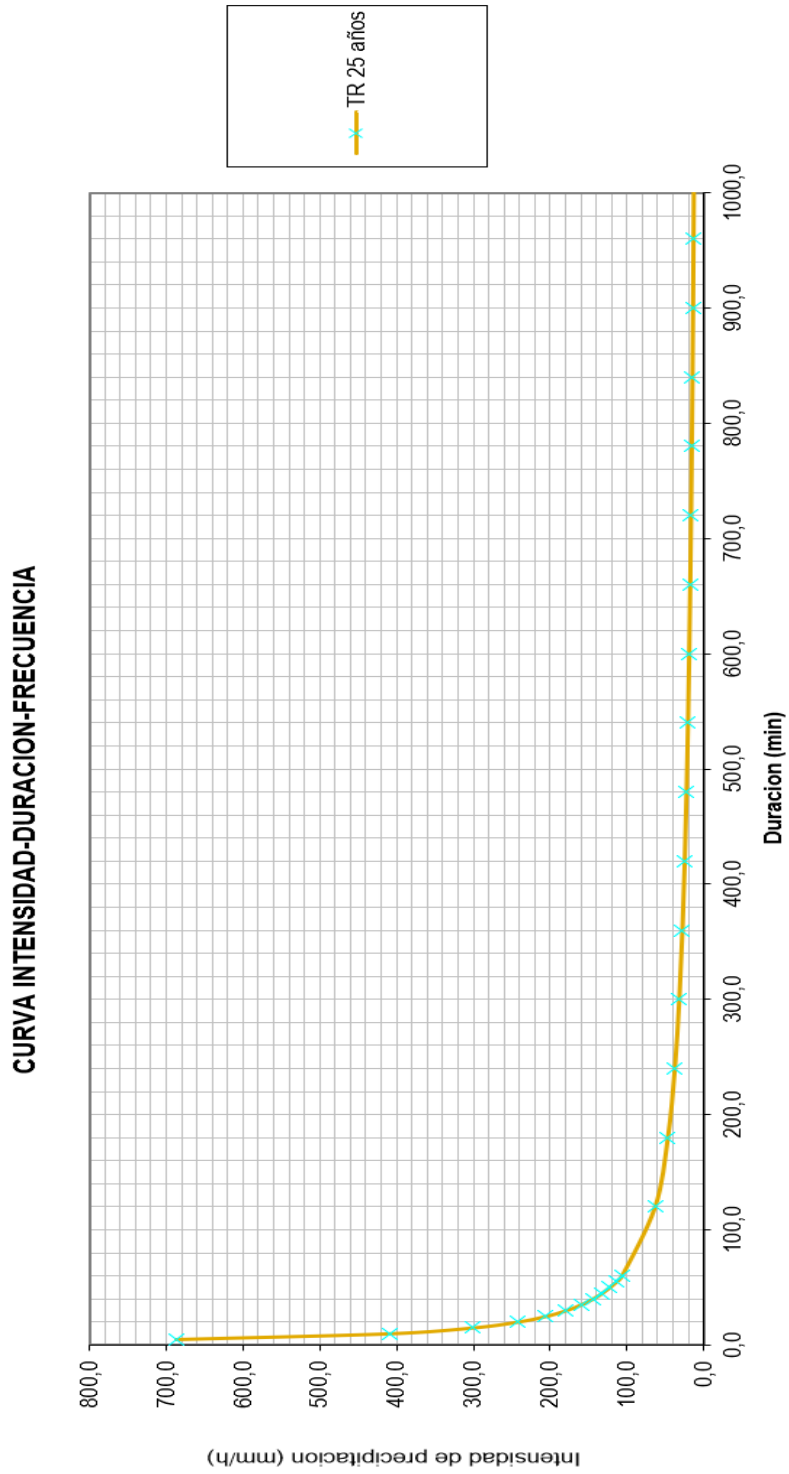


Figura 7.11 Curva IDF para T = 25 años
 Fuente: Elaboración propia

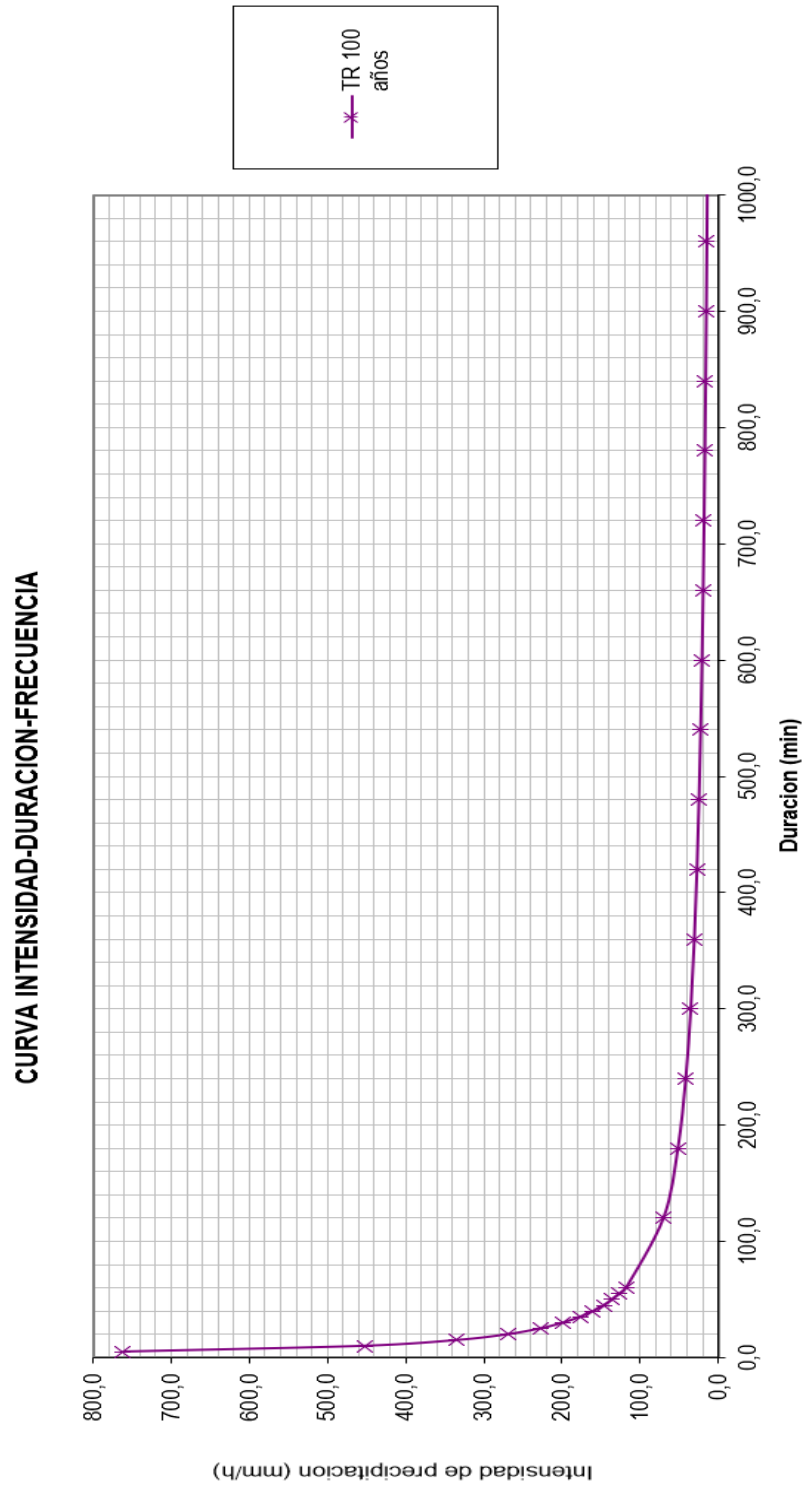


Figura 7.12 Curva IDT para T = 100 años
 Fuente: Elaboración propia

HIETOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DE DISEÑO T = 2 años

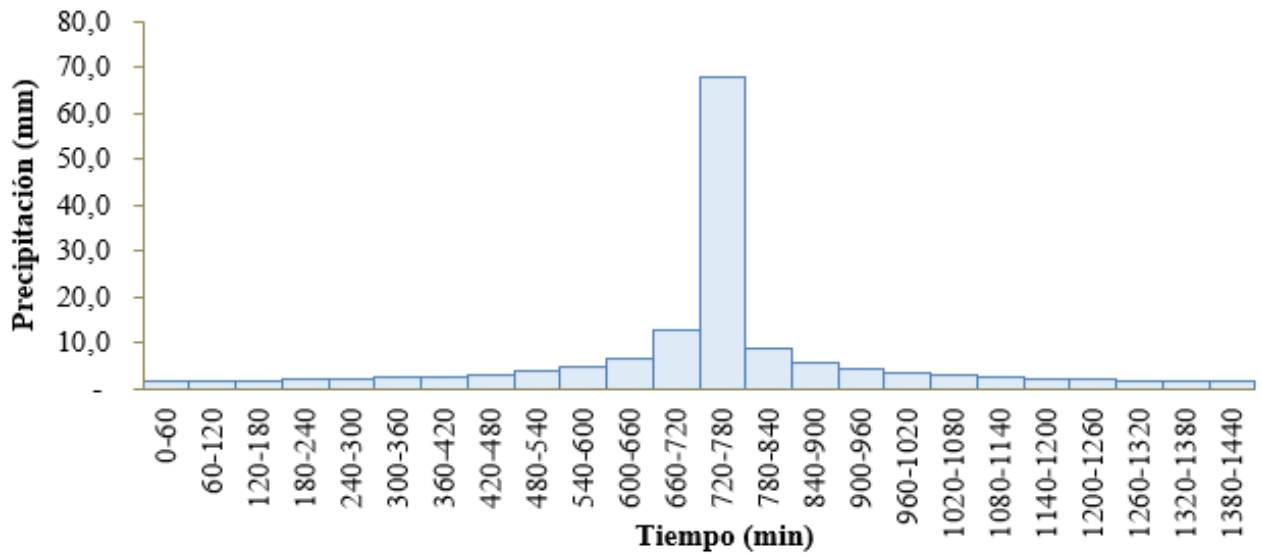


Figura 7.13 Hietograma para un periodo de retorno de 2 años

Fuente: Elaboración propia

HIETOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DE DISEÑO T = 5 años

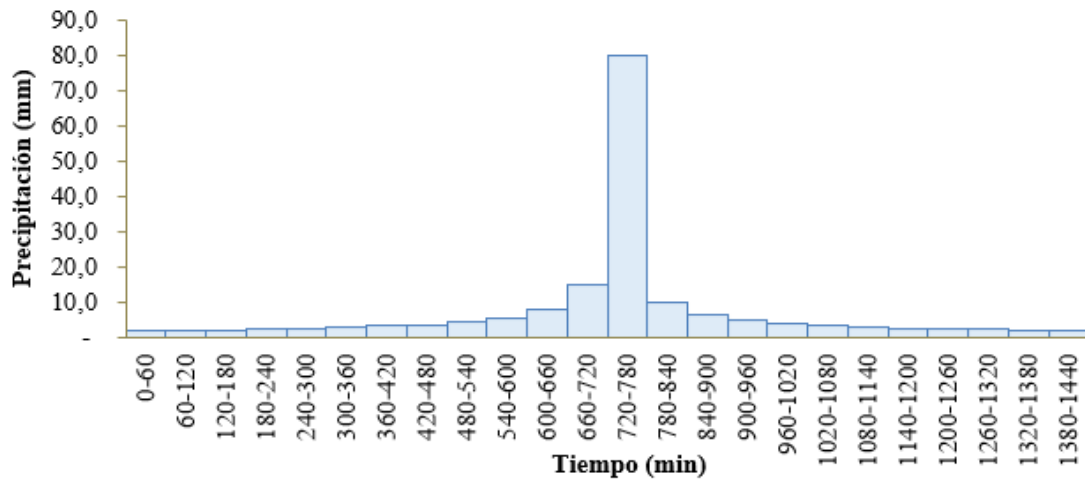


Figura 7.14 Hietograma para un periodo de retorno de 5 años

Fuente: Elaboración propia

HIETOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DE DISEÑO T = 10 años

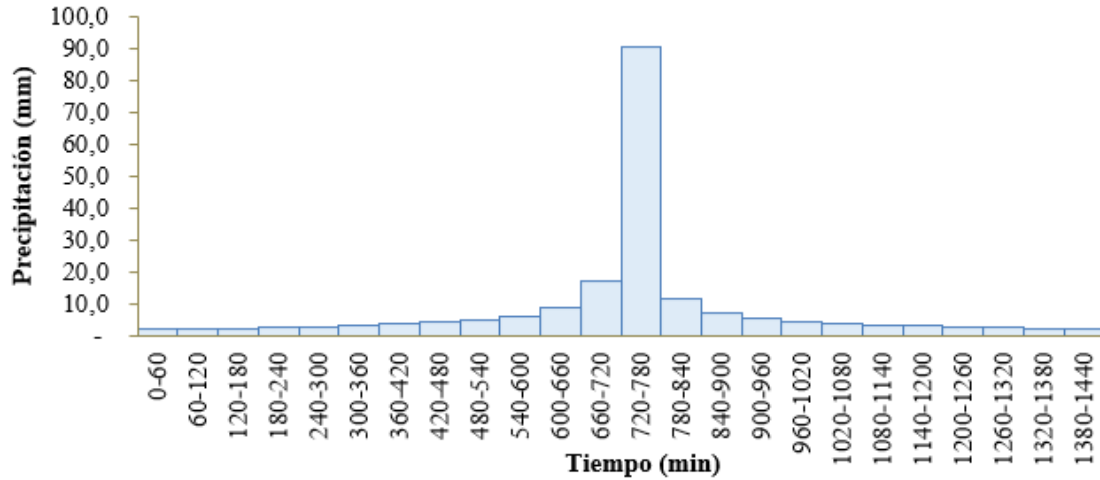


Figura 7.15 Hietograma para un periodo de retorno de 10 años

Fuente: Elaboración propia

HIETOGRAMA DE PRECIPITACIÓN DE DISEÑO T = 15 años

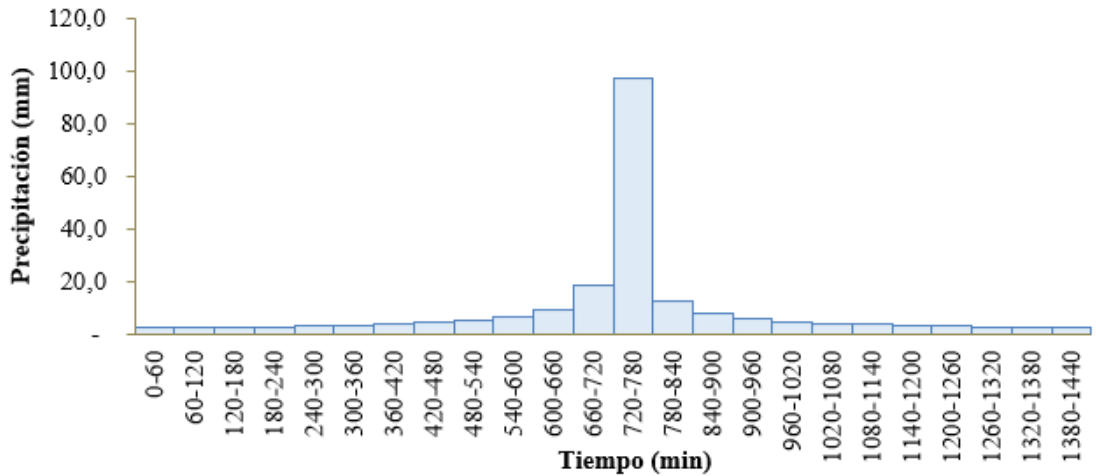


Figura 7.16 Hietograma para un periodo de retorno de 15 años

Fuente: Elaboración propia

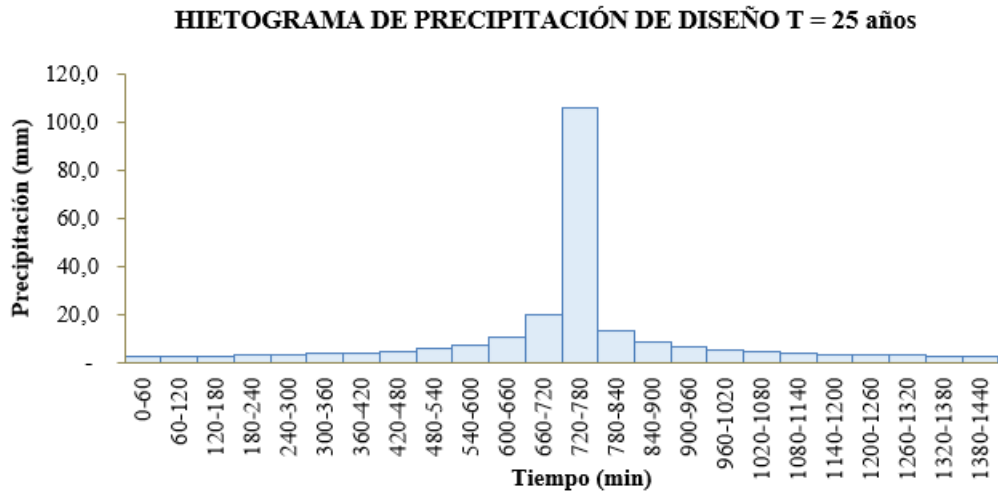


Figura 7.17 Hietograma para un periodo de retorno de 25 años

Fuente: Elaboración propia

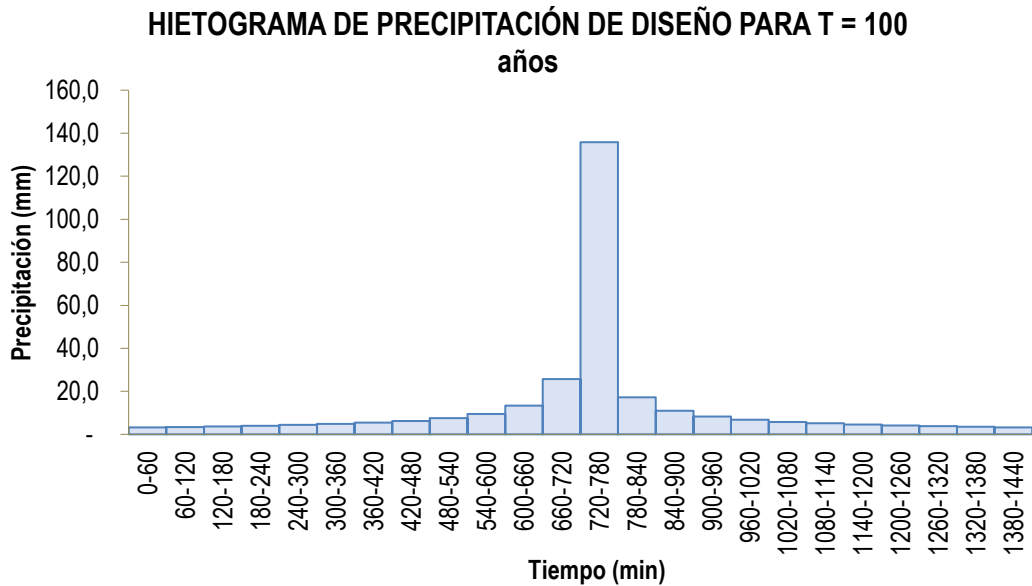


Figura 7.18 Hietograma para un periodo de retorno de 100 años

Fuente: Elaboración propia

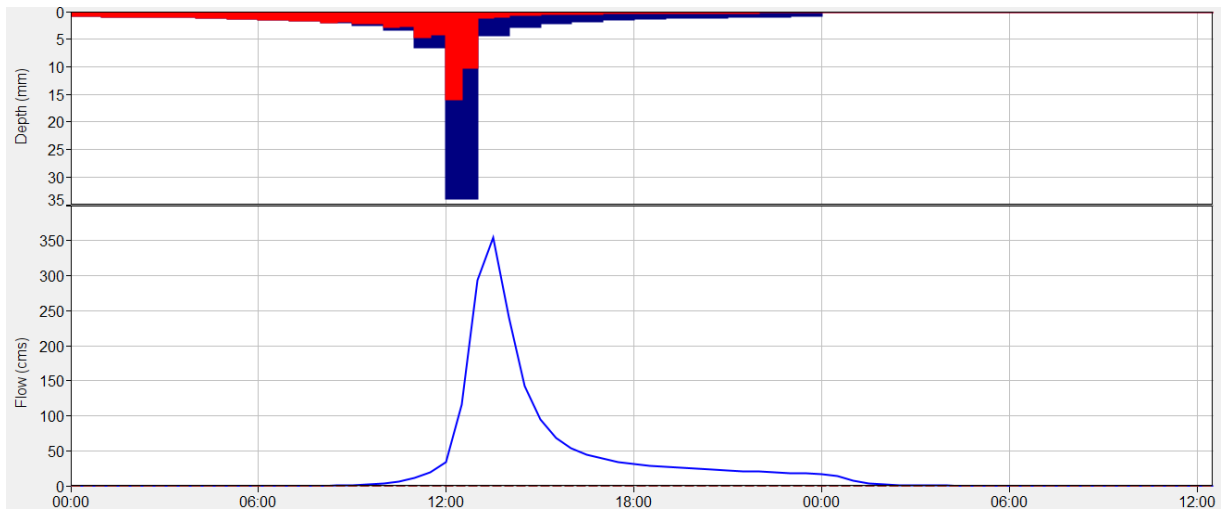


Figura 7.19 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 2 años

Fuente: Elaboración propia

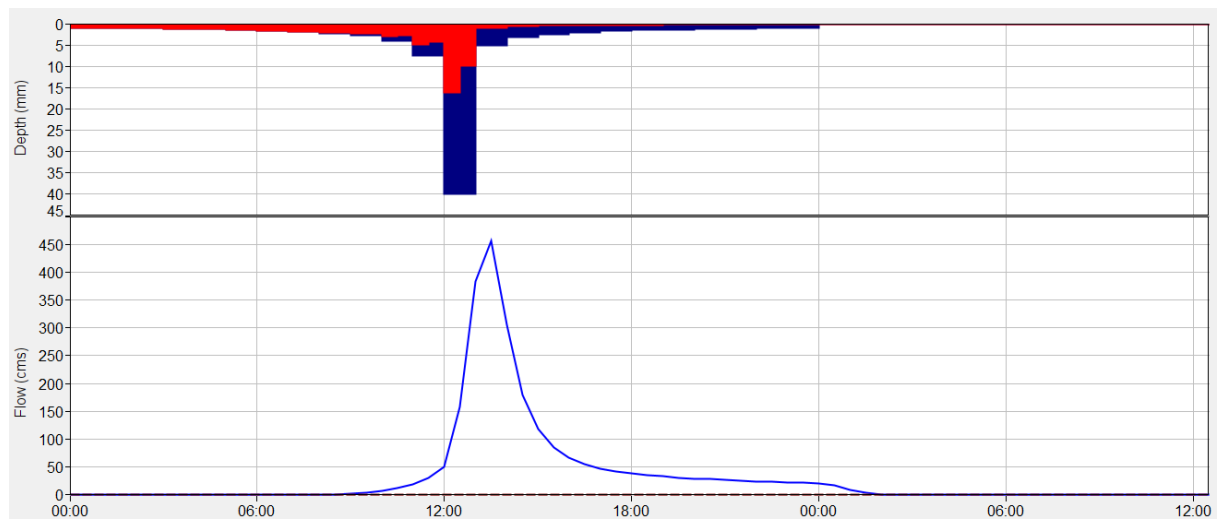


Figura 7.20 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 5 años

Fuente: Elaboración propia

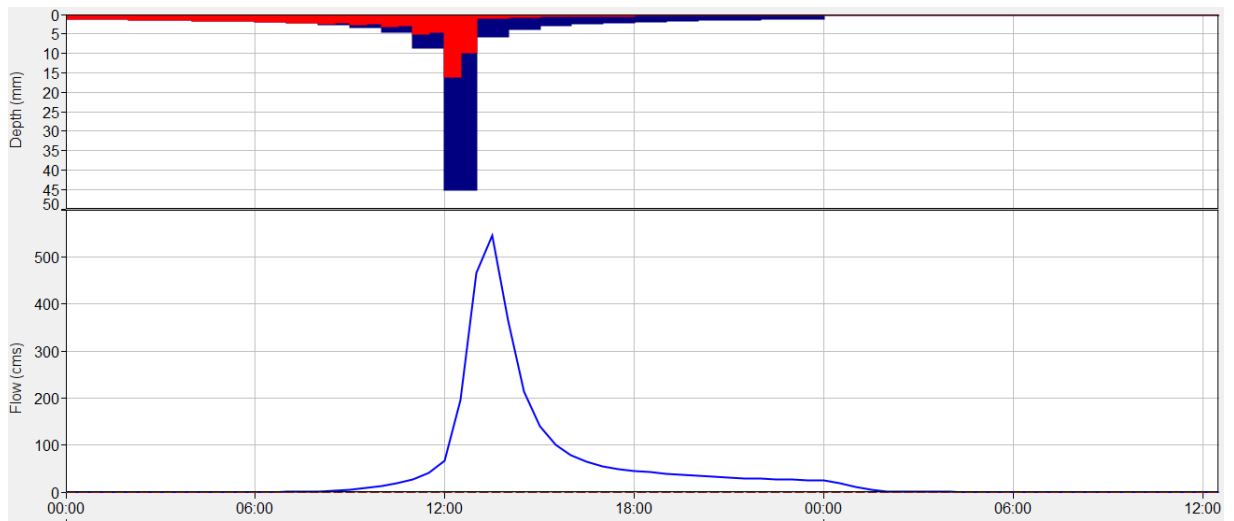


Figura 7.21 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 10 años

Fuente: Elaboración propia

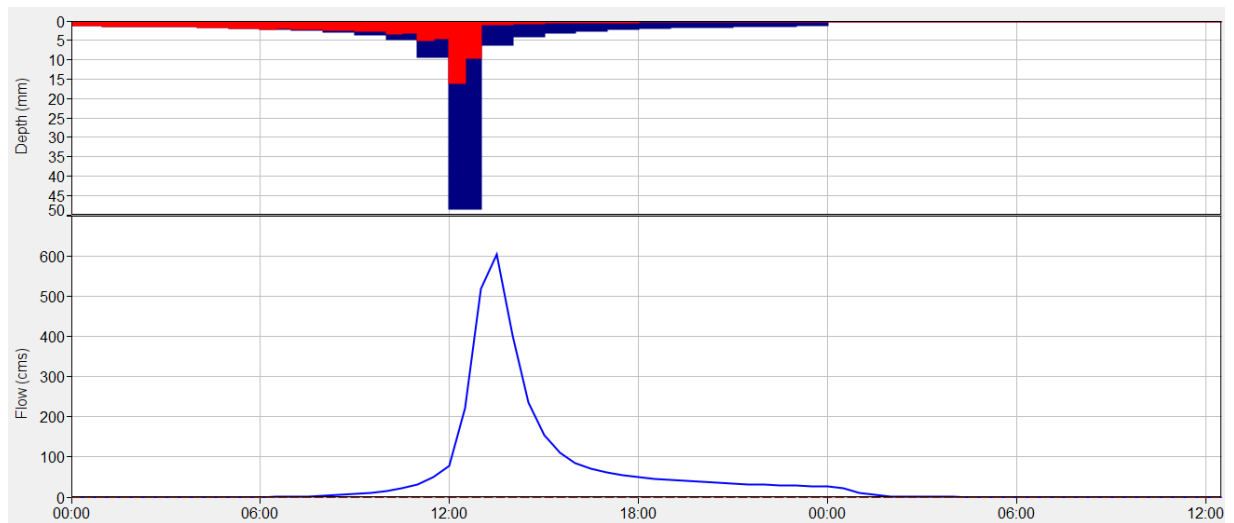


Figura 7.22 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 15 años

Fuente: Elaboración propia

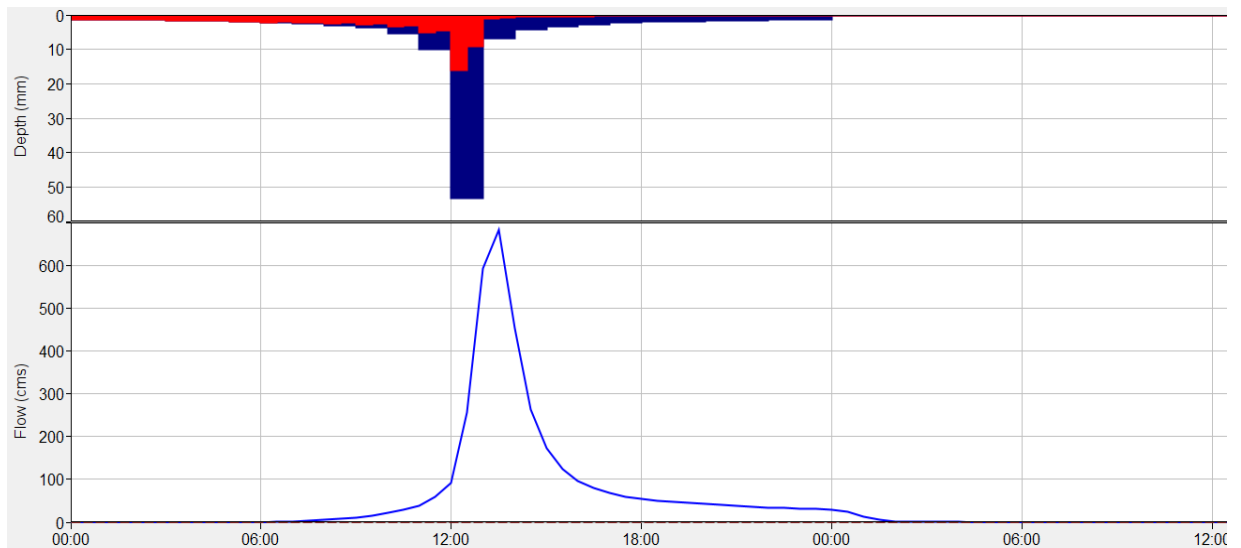


Figura 7.23 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 25 años

Fuente: Elaboración propia

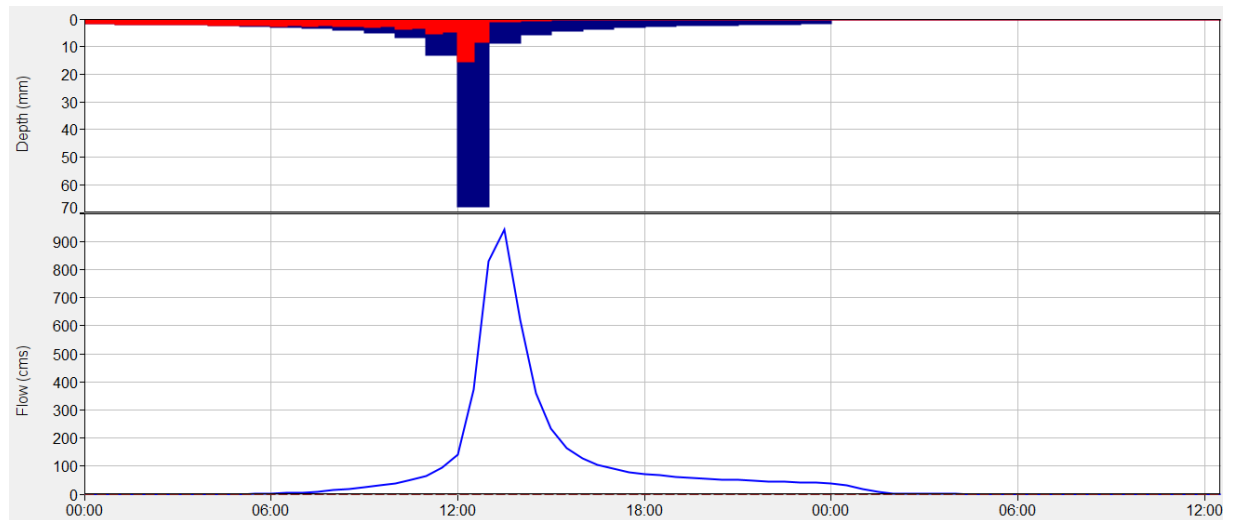


Figura 7.24 Grafico de profundidad de precipitación e hidrograma en la confluencia de los cauces principales de las cuencas del Río Corredor y Río Caño Seco para T = 100 años

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7.1 Valores críticos para Mann-Whitney

<i>n</i>																									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1																									
2																			0	0	0	0	0	0	0
3								0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	4	4	4	4	5
4					0	0	1	1	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10
5				0	1	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13	14	14	15	16	17	17
6				2	3	4	5	6	7	9	10	12	13	15	16	18	19	21	22	24	25	27	29	30	32
7				4	6	7	9	10	12	13	15	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	35	37	39	39
8					7	9	11	13	15	17	18	20	22	24	26	28	30	32	34	35	37	39	39	39	39
9						11	13	16	18	20	22	24	27	29	31	33	36	38	40	43	45	47	47	47	47
10							16	18	21	24	26	29	31	34	37	39	42	44	47	50	52	55	55	55	55
11								21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	63	63	63
12									27	31	34	37	41	44	47	51	54	58	61	64	68	71	71	71	71
13										34	38	42	45	49	53	57	60	64	68	72	75	79	79	79	79
14											42	46	50	54	58	63	67	71	75	79	83	87	87	87	87
15												51	55	60	64	69	73	78	82	87	91	96	96	96	96
16													60	65	70	74	79	84	89	94	99	104	104	104	104
17														70	75	81	86	91	96	102	107	112	112	112	112
18															81	87	92	98	104	109	115	121	121	121	121
19																93	99	105	111	117	123	129	129	129	129
20																	105	112	118	125	131	138	138	138	138
21																		118	125	132	139	146	146	146	146
22																			133	140	147	155	155	155	155
23																				148	155	163	163	163	163
24																					164	172	172	172	172
25																						180	180	180	180

Fuente: (Stefanowitsch, n.d.)