



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
Y APLICADAS
CARRERA DE INGENIERÍA HIDRAULICA

**Simulación de picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes
satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindigua, Cantón
La Maná**

PROYECTO DE INVESTIGACION PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO HIDRÁULICO

AUTOR:

Jonathan Patricio Tipantasi Amancha

TUTOR:

Ing. Xiomara Alejandra Zambrano Navarrete MSc

Latacunga, agosto 2024

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo **Tipantasi Amancha Jonathan Patricio** declaro ser autor del presente proyecto de investigación: **“Simulación de picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindigua, Cantón La Maná”**, siendo la **Ing. Zambrano Navarrete Xiomara Alejandra MSc.** tutora del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, 15 de agosto del 2024



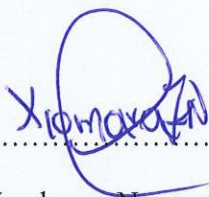
Tipantasi Amancha Jonathan Patricio
C.I.: 1804590287-7

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“Simulación de picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindigua, Cantón La Maná”, de Tipantasi Amancha Jonathan Patricio, de la carrera de Ingeniería Hidráulica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias De La Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 14 agosto de 2024



.....
Ing. Zambrano Navarrete Xiomara Alejandra M.Sc.
C.C: 1313058453

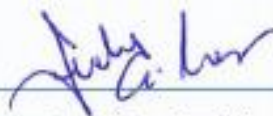
AVAL DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la FACULTAD de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el postulante: Tipantasi Amancha Jonathan Patricio con el título de Proyecto de titulación: **Simulación de picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindigua, Cantón La Maná** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 15 de agosto de 2024

Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)
Nombre: Ing. Andy Giler
CC: 1312820325



Lector 2
Nombre: Ing. Patricio Chávez
CC: 0501305668



Lector 3
Nombre: Ing. Jimmy Toaza
CC: 1717621062

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por haberme concedido la sabiduría y fortaleza necesarias para superar los desafíos que se presentaron a lo largo de este camino académico. Sin Su guía, nada de esto hubiera sido posible.

Agradezco profundamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA) por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios superiores en un entorno académico de calidad. En especial, quiero destacar mi agradecimiento a la Carrera de Ingeniería Hidráulica, que me proporcionó el espacio ideal para fortalecer mis conocimientos, corregir mis errores y crecer como profesional.

Extiendo mi gratitud de manera especial a mi tutora, la Ingeniera Xiomara Zambrano, quien ha sido un pilar fundamental en este proceso. Su confianza en mis capacidades, así como su apoyo constante, me han motivado a superar mis límites y a dar lo mejor de mí en cada etapa de este proyecto. Agradezco su paciencia, su dedicación y la forma en que compartió sus valiosos conocimientos y experiencias conmigo. Sin su orientación experta, este trabajo no habría alcanzado el nivel de calidad que se requiere.

Finalmente, quiero agradecer a todos aquellos que, de una u otra forma, han contribuido a la culminación de este proyecto.

Jonathan Tipantasi.

DEDICATORIA

Dedico mi proyecto de titulación, en primer lugar, a Dios por todas las bendiciones que ha derramado sobre mí. Con amor y gratitud, lo dedico también a mis padres, Patricio y Margoth, cuyo apoyo incondicional ha sido la base de mi fortaleza. Gracias por ser mis guías y por enseñarme con su ejemplo el valor del trabajo duro, la honestidad, el respeto, la integridad y la perseverancia. Su confianza en mí, incluso en los momentos más difíciles, ha sido mi mayor fuente de motivación.

A mi novia, Erika Julissa, quien ha sido mi compañera constante durante este proceso. Gracias por su amor, paciencia y comprensión, por ser mi refugio en los días difíciles y mi alegría en los momentos de éxito. Su presencia ha sido un pilar fundamental en esta travesía, y este proyecto refleja lo que hemos compartido y superado juntos.

A mis abuelitos, que con su sabiduría y cariño han sido una fuente constante de inspiración. Gracias por sus enseñanzas y por inculcarme los valores que me han guiado a cumplir mis metas. Sus historias y consejos han dejado una huella imborrable en mi vida. A mi hermana Fabiola y a mis sobrinos, Damián, Rodrigo y Amalia, quienes, aunque no hemos podido vernos con frecuencia, han sido una motivación especial para alcanzar esta meta.

A mis tíos y primos, cuyo apoyo ha sido fundamental. En especial, a mi tío Roberto, por estar siempre pendiente de mí y de mis avances. A mis amigos Jhosue, David, Jeyson, Jonathan, Fernando, Christopher y Andy, que han estado a mi lado en este camino. Gracias por su apoyo, por las risas y las palabras de ánimo que me impulsaron a seguir adelante.

Este proyecto está dedicado a todos ustedes, quienes han sido una parte esencial de mi vida y de este logro.

Jonathan Tipantasi

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

TEMA: “Simulación de picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindigua, Cantón La Maná”

Autor:

Tipantasi Amancha Jonathan Patricio

Resumen

El estudio se enfoca en la simulación y modelado de picos de inundaciones repentinas en la cuenca del río Quindigua, Cantón La Maná, utilizando datos de precipitación del satélite TRMM y softwares hidrológicos como HEC-HMS y HEC-RAS. Se analizó la cobertura de suelo mediante imágenes satelitales con una resolución de 25 por 25 del año 2012 metros para estimar caudales pico aplicando el método SCS-CN, obteniendo una caracterización precisa de la respuesta hidrológica de la cuenca. Además, se implementó la técnica "Rain-on-Grid" (RoG) para simular eventos extremos de precipitación y su impacto en la generación de flujos máximos. La simulación hidrológica en HEC-HMS incorporó hietogramas basados en curvas IDF y el método de bloque alterno para tiempos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Los hidrogramas resultantes se usaron en HEC-RAS para simular niveles máximos de crecida, velocidades de flujo y áreas de inundación. Los resultados mostraron que, para un período de 24 horas, los caudales picos varían significativamente según el tiempo de retorno, con un caudal pico de 63,35 m³/s calculado por el método SCS-CN y de 60,90 m³/s por HEC-HMS, mostrando un error de 3,85% para 5 años, y de 117,36 m³/s (SCS-CN) y 117,40 m³/s (HEC-HMS) con un error de 0,03% para 50 años. Las velocidades en el modelo hidrodinámico fueron de 1,69 m/s para 5 años y 2,51 m/s para 100 años, reflejando el aumento en los caudales pico.

Palabras clave: Método SCS-CN, HEC-HMS, HEC-RAS, picos de inundación, precipitación y escorrentía

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

TITLE: “Simulation of Flash Flood Peaks Using Satellite Sources of Precipitation Data in the Quindigua River, La Maná Canton”

Authors:

Tipantasi Amancha Jonathan Patricio

ABSTRACT

The study focuses on the simulation and modeling of flash flood peaks in the Quindigua River basin, located in Cantón La Maná, using precipitation data from the TRMM satellite and hydrological software such as HEC-HMS and HEC-RAS. Land cover was analyzed using satellite images from 2012 with a resolution of 25 by 25 meters to estimate peak flows using the SCS-CN method, achieving an accurate characterization of the basin's hydrological response. Additionally, the "Rain-on-Grid" (RoG) technique was implemented to simulate extreme precipitation events and their impact on generating peak flows. The hydrological simulation in HEC-HMS incorporated hyetographs based on IDF curves and the alternating block method for return periods of 5, 10, 25, 50, and 100 years. The resulting hydrographs were used in HEC-RAS to simulate maximum flood levels, flow velocities, and flood areas. The results showed that, over a 24-hour period, peak flows vary significantly depending on the return period, with a peak flow of 63.35 m³/s calculated by the SCS-CN method and 60.90 m³/s by HEC-HMS, showing an error of 3.85% for the 5-year return period. For the 50-year return period, peak flows of 117.36 m³/s (SCS-CN) and 117.40 m³/s (HEC-HMS) were obtained, with a very low error of 0.03%. Flow velocities in the hydrodynamic model ranged from 1.69 m/s for the 5-year return period to 2.51 m/s for the 100-year return period, reflecting the increase in peak flows.

Keywords: SCS-CN Method, HEC-HMS, HEC-RAS, flood peaks, precipitation, and runoff

INDICE GENERAL

1. INFORMACIÓN GENERAL	1
1.1. Título del proyecto: Simulación de picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindígua, Cantón La Maná.....	1
1.1. Modalidad de Titulación:	1
1.2. Carrera: Ingeniería Hidráulica	1
1.3. Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:.....	1
1.4. Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:.....	1
1.4.1. Investigador: Tipantasi Amancha Jonathan Patricio.....	1
1.4.2. Tutora: Ing. Zambrano Navarrete Xiomara Alejandra MSc.....	1
1.5. Área de conocimiento:	1
1.6. Línea de investigación: Meteorología, hidrología, mecánica de fluidos, sistemas y obras hidráulicas.	1
1.7. Sub líneas de investigación: Gestión y manejo sostenible y/o sustentable del recurso hídrico.	1
2. INTRODUCCION.....	2
2.1. SITUACION PROBLEMICA	3
2.2. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	4
2.3. BENEFICIARÍOS	4
2.3.1. Directos.....	4
2.3.2. Indirecto.....	4
2.4. JUSTIFICACIÓN	4
2.5. HIPÓTESIS:	5
2.6. OBJETIVOS:	5
2.6.1. General:	5
2.6.2. Específicos:.....	5
2.6.3. SISTEMA DE TAREAS.....	5
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
3.1. ANTECEDENTES	7
3.2. MARCO REFERENCIAL.....	9
3.2.1. Estudio de intensidades	9
3.2.2. Cuenca hidrográfica.....	9
3.2.3. Funciones de una cuenca hidrográfica.....	9
3.2.4. Elementos de una cuenca hidrográfica	9

3.2.5.	Afluentes.....	10
3.2.6.	Clasificación de las cuencas hidrográficas	10
3.2.7.	Delimitación de una cuenca hidrográfica	10
3.2.8.	Software para delimitar cuencas hidrográficas.....	11
3.2.9.	Parámetros Morfométricos de una microcuenca	11
3.2.10.	Método del Servicio de Conservación del Suelo (SCS).....	12
3.2.11.	Método del Número de Curva (CN).....	12
3.2.12.	Tiempo de concentración (tc)	12
3.2.13.	Curva de Duración Intensidad Frecuencia, de Dick y Peschke.....	13
3.2.14.	Método del bloqueo alternativo	13
3.2.15.	Método de Gumbel	13
3.2.16.	Precipitaciones.....	14
3.2.17.	Satélites meteorológicos	14
3.2.18.	Hietograma de precipitación de diseño	14
3.2.19.	Modelos hidrológicos	14
3.2.20.	TETIS	15
3.2.21.	PRMS	15
3.2.22.	Tipo y clasificación de modelos hidrológicos	15
3.2.23.	Modelos hidráulicos	16
3.2.24.	Modelos hidráulicos unidimensionales	17
3.2.25.	HEC-HMS	17
3.2.26.	HEC-RAS	18
3.2.27.	Geometría del cauce	18
3.2.28.	Coefficiente de resistencia al movimiento.....	19
3.2.29.	Condiciones de contorno	20
4.	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	20
4.1.	METODOLOGÍA	20
4.1.1.	Área de estudio	21
4.1.2.	Delimitación de la microcuenca	21
4.2.	Caracterización morfológica.....	22
4.2.1.	Área de la microcuenca (A).....	22
4.2.2.	Perímetro de la microcuenca (P)	22
4.2.3.	Longitud del curso principal (L).....	22

4.2.4.	Longitud Axial (La)	22
4.2.5.	Ancho promedio de la cuenca (Ap)	22
4.2.6.	Coefficiente de Compacidad o Gravelius (kc)	23
4.2.7.	Factor de forma de Horton (Rf)	23
4.2.8.	Pendiente del cauce (J)	24
4.2.9.	Número de Orden (No)	24
4.2.10.	Densidad de drenaje (Dd)	24
4.3.	NUMERO DE CURVA (SCS-CN)	25
4.4.	ALMACENAMIENTO MAXIMO POTENCIAL DE LA SUBCUENCA (S)	26
4.5.	TIEMPO DE CONCENTRACION (tc)	26
4.5.1.	ECUACION DE KIRPICH	26
4.6.	TIEMPO DE RETRASO	27
4.7.	DURACION DE EXCESO	27
4.8.	TIEMPO PICO	27
4.9.	TIEMPO BASE	28
4.10.	CAUDAL PICO UNITARIO	28
4.11.	FACTORES CAUDAL PICO METODO SCS	28
4.11.1.	Precipitación Máxima	28
4.11.2.	Abstracción inicial	29
4.11.3.	Intensidades	29
4.11.4.	Precipitación de exceso	29
4.12.	CAUDAL PICO TIEMPOS DE RETORNO SCS	30
4.13.	CURVAS DE INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA (IDF)	30
4.13.1.	METODO DE GUMBEL	30
4.14.	METODO DE BLOQUE ALTERNO POR ANALISIS DE REGRESION MULTIPLE	32
4.14.1.	Ecuación general de Intensidad Máxima de Precipitación	32
4.14.2.	Hietograma de precipitación de diseño	33
4.15.	COEFICIENTE DE RUGOSIDAD MANNING	34
4.16.	CAUDAL BASE	34
4.17.	TECNICA LLUVIA EN RED (RoG)	35
4.18.	MODELACION SOFTWARE HEC-HMS	35
4.19.	SIMULACION HEC-RAS	36

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
5.1. RESULTADOS DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS.....	37
5.1.1. Área de la microcuenca (A).....	38
5.1.2. Perímetro de la subcuenca (P).....	38
5.1.3. Longitud axial (La).....	38
5.1.4. Longitud del cauce principal (L).....	38
5.1.5. Ancho promedio (Ap).....	38
5.1.6. Coeficiente de compacidad (Kc).....	38
5.1.7. Factor de forma de Horton (Rf).....	39
5.2. NÚMERO DE ORDEN (NO).....	39
5.3. LONGITUD DE LA RED HÍDRICA (LRH).....	40
5.4. PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL (J).....	40
5.5. DENSIDAD DE DRENAJE.....	40
5.6. COTA MÁXIMA Y MÍNIMA DE LA MICROCUENCA.....	40
5.7. MÉTODOS SCS Y CN.....	40
5.7.1. Número de Curva (CN).....	40
5.8. TIEMPO DE CONCENTRACION.....	42
5.9. TIEMPO DE RETRASO.....	42
5.10. DURACION DE EXCESO.....	42
5.11. TIEMPO PICO.....	43
5.12. TIEMPO BASE.....	43
5.13. CAUDAL PICO UNITARIO.....	43
5.14. METODO RACIONAL ABSTRACCIONES.....	43
5.15. CAUDAL PICO TIEMPOS DE RETORNO.....	44
5.16. CURVAS DE INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA.....	44
5.17. METODO DE BLOQUE ALTERNO POR ANALISIS DE REGRESION MULTIPLE.....	46
5.18. MODELACION SOFTWARE HEC-HMS.....	47
5.18.1. Parámetros utilizados en la modelación.....	47
5.18.2. Geometría del modelo en HEC-HMS.....	48
5.18.3. Procedimiento modelación software HEC-HMS.....	49
5.18.4. Hidrograma de precipitación TR 5 años.....	50
5.18.5. Hidrograma de Precipitación TR 10 Años.....	51

5.18.6.	Hidrograma de Precipitación TR 25 Años.....	52
5.18.7.	Hidrograma Precipitación TR de 50 Años.....	53
5.18.8.	Hidrograma Precipitación TR 100 Años	54
5.19.	RESULTADOS CAUDALES PICO SCS-CN Y HEC-HMS	55
5.20.	SIMULACION NICELES MAXIMOS HEC-RAS.....	56
5.20.1.	Procedimiento para la simulación en HEC-RAS.....	56
5.20.2.	Niveles máximos de crecida TR 5 años.....	57
5.20.3.	Niveles máximos de crecida TR 10 años.....	59
5.20.4.	Niveles máximos de crecida TR 25 años.....	61
5.20.5.	Niveles máximos de crecida TR 50 años.....	63
5.20.6.	Niveles máximos de crecida TR 100.....	65
5.21.	Resultados Software HEC-RAS.....	67
5.22.	ANALISIS MODELO HIDRODINAMICO	68
5.22.1.	Modelo Hidrodinámico caudal base.....	68
5.22.2.	Modelo Hidrodinámico Tr 5 años.....	68
5.22.3.	Modelo Hidrodinámico Tr 10 años.....	69
5.22.4.	Modelo Hidrodinámico Tr 25 años.....	69
5.22.5.	Modelo Hidrodinámico Tr 50 años.....	70
5.22.6.	Modelo Hidrodinámico Tr 100 años.....	70
5.23.	DISCUSION DE RESULTADOS.....	71
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	72
6.1.	CONCLUSIONES	72
6.2.	RECOMENDACIONES.....	73
7.	REFERENCIAS	74
8.	ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

INDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. CAMPOS DE LA CIENCIA Y TECNOLOGÍA UNESCO.....	1
TABLA 3.1. CLASIFICACIÓN DE CUENCAS PROPUESTAS PARA EL ECUADOR [16].....	10
TABLA 3.2. CLASIFICACIÓN DE VALORES DE RUGOSIDAD POR TIPOLOGÍA [41].	19
TABLA 4.1. CLASIFICACIÓN DE ÁREAS.....	22
TABLA 4.2. CLASIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE COMPACIDAD O GRAVELIUS.	23
TABLA 4.3. CLASIFICACIÓN FACTOR DE FORMA HORTON.....	24
TABLA 4.4. CLASES DE PENDIENTE (%).....	24
TABLA 4.5. GRUPOS HIDROLÓGICOS DEL SUELO.....	25
TABLA 5.1. NUMERO DE CURVA	41
TABLA 5.2 RESULTADOS INTENSIDADES Y PRECIPITACIONES.....	44
TABLA 5.3. CAUDALES PICOS	44
TABLA 5.4. CURVAS IDF	45
TABLA 5.5. HIETOGRAMAS DE PRECIPITACIÓN.....	47
TABLA 5.6. PARÁMETROS MODELACIÓN.	47
TABLA 5.7. GUÍA MODELACIÓN HEC-HMS	49
TABLA 5.8. RESULTADOS CAUDALES PICO	55
TABLA 5.9. RESULTADOS CAUDALES PICO	56

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1 CURVAS IDF [24]	13
FIGURA 3.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MODELOS HIDROLÓGICOS.....	16
FIGURA 3.3. PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE UN CAUCE NATURAL[40].	19
FIGURA 4.1. ESQUEMA METODOLÓGICO.	21
FIGURA 4.2 METODOLOGÍA SOFTWARE HEC-HMS.....	35
FIGURA 4.3. ESQUEMA SIMULACIÓN HEC-RAS.	36
FIGURA 5.1. MAPA DELIMITACIÓN	37
FIGURA 5.2. MAPA HIDROLÓGICO.	39
FIGURA 5.3. MAPA USO Y COBERTURA DEL SUELO.	41
FIGURA 5.4. CURVAS IDF MÉTODO DE GUMBEL	46
FIGURA 5.5. GEOMETRÍA SUBCUENCA HEC-HMS	49
FIGURA 5.6. HIDROGRAMA TR 5 AÑOS.	51
FIGURA 5.7. RESULTADOS TR 5 AÑOS.	51
FIGURA 5.8. HIDROGRAMA TR 10 AÑOS.	52
FIGURA 5.9. RESULTADOS TR 10 AÑOS.	52
FIGURA 5.10. HIDROGRAMA TR 25 AÑOS.	53
FIGURA 5.11. RESULTADOS TR 25 AÑOS.	53
FIGURA 5.12. HIDROGRAMA TR 50 AÑOS.	54
FIGURA 5.13. RESULTADOS TR 50 AÑOS.	54
FIGURA 5.14. HIDROGRAMA TR 100 AÑOS.	55
FIGURA 5.15. RESULTADOS TR 100 AÑOS.	55
FIGURA 5.16. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 5 AÑOS SECCIÓN 1.....	57
FIGURA 5.17. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 5 AÑOS SECCIÓN 2.....	58
FIGURA 5.18. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 5 AÑOS SECCIÓN 3.....	58
FIGURA 5.19. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 10 AÑOS SECCIÓN 1.....	59
FIGURA 5.20. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 10 AÑOS SECCIÓN 2.....	60
FIGURA 5.21. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 10 AÑOS SECCIÓN 3.....	60
FIGURA 5.22. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 25 AÑOS SECCIÓN 1.....	61
FIGURA 5.23. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 25 AÑOS SECCIÓN 2.....	62
FIGURA 5.24. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 25 AÑOS SECCIÓN 3.....	62
FIGURA 5.25. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 50 AÑOS SECCIÓN 1.....	63
FIGURA 5.26. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 50 AÑOS SECCIÓN 2.....	64

FIGURA 5.27. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 50 AÑOS SECCIÓN 3.....	64
FIGURA 5.28. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 100 AÑOS SECCIÓN 1.....	65
FIGURA 5.29. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 100 AÑOS SECCIÓN 2.....	66
FIGURA 5.30. NIVEL MÁXIMO DE CRECIDA TR 100 AÑOS SECCIÓN 3.....	66
FIGURA 5.31. RESULTADOS HEC-RAS.	67
FIGURA 5.32. MODELO HIDRODINÁMICO CAUDAL BASE.....	68
FIGURA 5.33. MODELO HIDRODINÁMICO TR 5 AÑOS.	68
FIGURA 5.34. MODELO HIDRODINÁMICO TR 10 AÑOS.	69
FIGURA 5.35. MODELO HIDRODINÁMICO TR 25 AÑOS.	70
FIGURA 5.36. MODELO HIDRODINÁMICO TR 50 AÑOS.	70
FIGURA 5.37. MODELO HIDRODINÁMICO TR 100 AÑOS.	71

INDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 4.1 ANCHO PROMEDIO	22
ECUACIÓN 4.2 COEFICIENTE DE COMPACIDAD	23
ECUACIÓN 4.3 FACTOR DE FORMA HORTON	23
ECUACIÓN 4.4 PENDIENTE DEL CAUCE	24
ECUACIÓN 4.5 DENSIDAD DE DRENAJE	25
ECUACIÓN 4.6 NÚMERO DE CURVA	26
ECUACIÓN 4.7 ALMACENAMIENTO MÁXIMO	26
ECUACIÓN 4.8 KIRPICH	26
ECUACIÓN 4.9 TIEMPO DE RETRASO	27
ECUACIÓN 4.10 DURACIÓN DE EXCESO	27
ECUACIÓN 4.11 TIEMPO PICO	27
ECUACIÓN 4.12 TIEMPO BASE	28
ECUACIÓN 4.13 CAUDAL PICO UNITARIO	28
ECUACIÓN 4.14 PRECIPITACION MÁXIMA	28
ECUACIÓN 4.15 ABSTRACCIÓN INICAL	29
ECUACIÓN 4.16 INTENSIDAD	29
ECUACIÓN 4.17 INTENSIDAD	29
ECUACIÓN 4.18 PRECIPITACIÓN DE EXCESO	29
ECUACIÓN 4.19 CAUDAL PICO TIEMPOS DE RETORNO SCS	30
ECUACIÓN 4.20 CALCULO DE LA MEDIA	30
ECUACIÓN 4.21 DESVIACIÓN ESTANDAR	31
ECUACIÓN 4.22 PARAMETRO DE ESCALA	31
ECUACIÓN 4.23 PARAMETRO DE UBICACIÓN	31
ECUACIÓN 4.24 DISTRIBUCIÓN DE GUMBEL	32
ECUACIÓN 4.25 INTENSIDAD MAXIMA DE PRECIPITACIÓN	32
ECUACIÓN 4.26 PROPIEDADES LOGARITMICAS	32
ECUACIÓN 4.27 PRECIPITACIÓN ACUMULADA	33
ECUACIÓN 4.28 PRECIPITACION INCREMENTAL	33
ECUACIÓN 4.29 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD MANNING	34
ECUACIÓN 4.30 CAUDAL BASE	34

1. INFORMACIÓN GENERAL

1.1. **Título del proyecto:** Simulación de picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindígua, Cantón La Maná.

1.1. Modalidad de Titulación:

Propuestas Tecnológicas

Proyectos de Investigación

1.2. **Carrera:** Ingeniería Hidráulica

1.3. Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:

Caracterización morfológica e hidrológica de ríos de la zona altoandina tropical de la provincia de Cotopaxi.

1.4. Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:

1.4.1. **Investigador:** Tipantasi Amancha Jonathan Patricio

1.4.2. **Tutora:** Ing. Zambrano Navarrete Xiomara Alejandra MSc

1.5. Área de conocimiento:

Tabla 1.1. Campos de la Ciencia y Tecnología UNESCO

33 Ciencias Tecnológicas	3305 Tecnología de la construcción	3305.06 Ingeniería Civil
		3305.07 Presas
		3305.15 Ingeniería Hidráulica
		3308.09 Ingeniería Sanitaria

1.6. **Línea de investigación:** Meteorología, hidrología, mecánica de fluidos, sistemas y obras hidráulicas.

1.7. **Sub líneas de investigación:** Gestión y manejo sostenible y/o sustentable del recurso hídrico.

La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) busca orientar el desarrollo de políticas públicas en materia de recurso hídrico a través de una combinación de desarrollo económico, social y la protección de los ecosistemas. la GIRH se define como un proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado de los recursos hídricos la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico de manera equitativa sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.

2. INTRODUCCION

Los desastres naturales pueden ocurrir en cualquier ecosistema a nivel mundial, independientemente de la intervención humana. Por ello, es crucial disponer de tecnología y sistemas adecuados para caracterizar los procesos y elementos involucrados en estos eventos. En este sentido, la información satelital y los sistemas de predicción representan métodos modernos esenciales para la caracterización y análisis de desastres naturales, como las inundaciones por crecientes súbitas. Estas inundaciones, provocadas por eventos de precipitación extrema y exacerbadas por factores naturales y antrópicos, representan un fenómeno hidrometeorológico común y un desafío emergente para muchas comunidades debido a la falta de sistemas de predicción y manejo adecuados [1]. Las inundaciones súbitas son una de las amenazas naturales más devastadoras, especialmente en regiones susceptibles a precipitaciones intensas y cuencas hidrográficas con rápida respuesta hidrológica. Estudios anteriores indican que cerca del 30% de las inundaciones en Ecuador se clasifican como repentinas, con caudales máximos que superan en un 80% las previsiones en escenarios con períodos de retorno de 50 años (Castaño & González, 2020). En la cuenca del Río Quindigua, Cantón La Maná, esta situación se ve exacerbada por la topografía del área y la alta exposición de las comunidades circundantes, lo que subraya la importancia de utilizar datos precisos y actualizados para la modelación hidrológica y la predicción de estos eventos extremos[2].

La gestión del recurso hídrico en los Andes Tropicales, particularmente en ecosistemas de alta montaña como el páramo, es crucial debido a los cambios climáticos y meteorológicos que alteran significativamente el balance del agua y el ciclo del carbono. Estos cambios globales afectan la distribución de las especies y la eficiencia del uso del agua en estos ecosistemas vulnerables. En este contexto, el modelado hidrológico utilizando herramientas como HEC-HMS resulta esencial para simular la respuesta de las cuencas a eventos de precipitación y para entender cómo las actividades humanas, como el uso de la tierra y el crecimiento poblacional, impactan el ciclo del agua [3].

Además, los impactos de estas inundaciones se agravan por la variabilidad climática, el manejo no regulado de los ríos y la construcción en zonas de riesgo. Aunque algunas inundaciones pueden ser prevenidas, las crecientes súbitas son particularmente peligrosas debido a su imprevisibilidad, la cual está relacionada con las limitaciones en la calidad y disponibilidad de la información en los sistemas de alerta. En este contexto, los modelos hidrológicos juegan un papel crucial, ya que permiten estimar los caudales en las cuencas mediante el cálculo de

diferentes factores, como las velocidades de escorrentía, aplicando métodos como el racional o el del Servicio de Conservación de Suelos (SCS). Por lo tanto, la simulación de picos de inundaciones utilizando datos de precipitaciones satelitales se ha convertido en una herramienta esencial para los hidrólogos y gestores del recurso hídrico [4].

En particular, la técnica *Rainfall on Grid* (RoG) ha emergido como una metodología avanzada para mejorar la precisión en la simulación de eventos de inundación. Esta técnica integra datos de precipitaciones satelitales en una malla o cuadrícula de simulación, proporcionando una representación espacial detallada y continua de la precipitación sobre la cuenca. Como resultado, permite capturar variaciones finas en la precipitación y su impacto en la escorrentía, lo cual es crucial para simular picos de inundación con mayor exactitud. De este modo, la técnica RoG mejora significativamente la capacidad de los modelos hidrológicos para predecir eventos extremos y gestionar los riesgos asociados [5].

Este estudio se enmarca en un proyecto de investigación orientado a mejorar la capacidad de predicción de inundaciones súbitas en la cuenca del río Quindígua. A través de la simulación hidrológica y el uso de modelos basados en datos satelitales, incluida la técnica RoG, ya que integra herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), como QGIS y SAGA GIS, junto con softwares de modelación hidrológica como HEC-RAS, HEC-HMS, iRIC y OpenFOAM [6]. Por lo tanto, esto permitirá un análisis detallado de los procesos hidrológicos específicos de la cuenca, proporcionando información crucial para anticipar y gestionar los picos de inundación. Así, las autoridades locales y regionales podrán desarrollar estrategias efectivas, planificar infraestructuras adecuadas y adoptar medidas preventivas, beneficiando directamente a las comunidades cercanas al río Quindígua al mitigar los efectos de las inundaciones.

2.1.SITUACION PROBLEMICA

La microcuenca del Río Quindígua enfrenta un problema crítico con las inundaciones repentinas, eventos que representan una amenaza recurrente para las comunidades aledañas, a pesar de contar con datos de precipitación satelitales la precisión en la predicción de los picos de inundación es limitada debido a la falta de modelos hidrológicos avanzados que integren eficazmente estos datos. Esta situación dificulta la implementación oportuna de medidas preventivas y de respuesta ante emergencias, además la infraestructura actual de gestión del recurso hídrico no está adecuadamente adaptada a los riesgos específicos de la microcuenca, lo que resulta en pérdidas económicas significativas, daños materiales y riesgos altos para la

seguridad del ser humano. Por lo tanto, urge desarrollar y validar modelos de simulación que optimicen la utilización de datos satelitales para mejorar la predicción y mitigación de las inundaciones repentinas en la microcuenca.

2.2.FORMULACION DEL PROBLEMA

Las inundaciones repentinas en la cuenca del río Quindígua son peligrosas y frecuentes. Tradicionalmente, se predicen con datos meteorológicos locales, a menudo insuficientes en resolución. La tecnología satelital ofrece datos de precipitación de alta resolución, mejorando significativamente la precisión en la predicción de inundaciones.

2.3.BENEFICIARIOS

2.3.1. Directos

Cantón la Mana, Provincia de Cotopaxi. Parroquia Pucayacu, Poblaciones locales, gobiernos Municipales, Entidades de gestión de riesgos

2.3.2. Indirecto

Investigadores académicos, Organizaciones No Gubernamentales, Educadores y Estudiantes Universitarios.

2.4.JUSTIFICACIÓN

El problema de las inundaciones repentinas en la cuenca del río Quindígua es un fenómeno recurrente que provoca daños significativos a la infraestructura, pérdidas económicas y pone en riesgo la vida de las comunidades locales. La capacidad de predecir estos eventos con precisión es esencial para una gestión efectiva de los riesgos y la implementación de medidas de mitigación. La disponibilidad de datos satelitales de precipitación ofrece una oportunidad para mejorar la simulación y predicción de estos eventos extremos. La tecnología tradicional de monitoreo meteorológico y pluviométrico en la cuenca del río Quindígua tiene limitaciones en cuanto a cobertura espacial y temporal. Esto resulta en predicciones de inundaciones menos precisas, dificultando la planificación y respuesta ante estos eventos. La incorporación de datos satelitales de alta resolución puede proporcionar información más detallada y precisa sobre las precipitaciones, mejorando así la capacidad de modelar y predecir inundaciones repentinas.

Este estudio se basa en la necesidad de mejorar las herramientas y metodologías para la predicción de picos de inundaciones repentinas en la cuenca del río Quindígua. Al desarrollar y validar un modelo de simulación hidrológica que utilice datos satelitales de precipitación, se espera proporcionar a las autoridades locales y regionales una herramienta más precisa para la

gestión de riesgos y la toma de decisiones. Además, se busca reducir los impactos negativos de las inundaciones repentinas, protegiendo la vida y los bienes de las comunidades afectadas, contribuir al conocimiento científico sobre el uso de tecnologías satelitales en la hidrología y la gestión de recursos hídricos, y proponer estrategias de mitigación basadas en datos científicos para minimizar el riesgo de futuras inundaciones.

2.5.HIPÓTESIS:

El análisis de datos satelitales de precipitación, integrados en simulaciones hidrológicas a través de software especializado, permite modelar con mayor precisión los patrones de escorrentía y flujo en una cuenca, mejorando significativamente la capacidad para identificar zonas potenciales de inundación y evaluar su riesgo.

2.6.OBJETIVOS:

2.6.1. General:

Simular picos de inundaciones repentinas utilizando fuentes satelitales de datos de precipitaciones en el Río Quindigua, Cantón La Maná.

2.6.2. Específicos:

- Realizar el análisis de la cobertura de suelo mediante satélite para estimar caudales.
- Realizar la técnica de RoG en la cuenca del Río Quindigua para producir flujos máximos altos analizando su comportamiento.
- Evaluar el modelo hidrodinámico mediante software determinando las velocidades y áreas de inundaciones.

2.6.3. SISTEMA DE TAREAS

Objetivo Específicos	Actividad	Resultado
Realizar el análisis de la cobertura de suelo mediante satélite para estimar caudales.	Recopilar imágenes satelitales recientes de la cuenca del Río Quindigua.	Conjunto de imágenes satelitales actualizadas de alta resolución listas para su análisis.
	Procesar y clasificar las imágenes para identificar diferentes tipos de cobertura de suelo.	Mapa detallado que clasifica los diferentes tipos de cobertura del suelo en la cuenca.

	Aplicar modelos hidrológicos para estimar los caudales basados en la cobertura de suelo.	Estimaciones de caudales generadas a partir de la relación entre la cobertura del suelo y la respuesta hidrológica de la cuenca
Realizar la técnica de RoG en la cuenca del Río Quindígua para producir flujos máximos altos analizando su comportamiento.	Preparar el modelo topográfico de la cuenca del Río Quindígua en un software GIS.	Modelo topográfico de la cuenca preparado.
	Implementar la técnica de RoG utilizando datos satelitales de precipitación.	Simulación de flujos máximos utilizando la técnica de RoG realizada.
	Analizar los resultados de la simulación para identificar los flujos máximos altos y su comportamiento.	Informe sobre los resultados de la simulación y comportamiento de flujos máximos.
Evaluar el modelo hidrodinámico mediante software determinando las velocidades y áreas de inundaciones.	Configurar y calibrar el modelo hidrodinámico con los datos obtenidos de las simulaciones de RoG.	Modelo hidrodinámico calibrado.
	Ejecutar el modelo hidrodinámico para simular eventos de inundación.	Simulación de eventos de inundación completada.
	Analizar los resultados para determinar las velocidades de flujo y áreas de inundación.	Detallado de velocidades de flujo y áreas de inundación.

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1. ANTECEDENTES

La “*Simulación dinámica de inundaciones en estado crítico de escurrimiento máximo, bajo cinco períodos de retorno, en el arroyo La Virgen en el Municipio San José de Miranda – Santander*” tuvo como objetivo realizar un análisis dinámico de inundaciones mediante la actualización de los parámetros morfométricos de la microcuenca y la digitalización de las coberturas vegetales. La metodología incluyó la interpolación espacial de regímenes de precipitación durante 16 años para estimar hietogramas con períodos de retorno de 2.33, 5, 25, 50 y 100 años, generando hidrogramas de crecidas y permitiendo simulaciones hidráulicas en dos dimensiones. Los resultados mostraron inundaciones consistentes en las mismas áreas con profundidades máximas de 6.71 m. En este sentido, la metodología aplicada permitió evaluar con precisión áreas vulnerables, subrayando la necesidad de actualizar parámetros hidrológicos y morfométricos para mejorar la gestión de riesgos [7].

Este proyecto de investigación titulado “*Simulación de escenarios de inundación para una sección longitudinal del Río Lebrija*” tuvo como objetivo aplicar conceptos matemáticos, estadísticos, hidráulicos e hidrológicos utilizando software especializado y herramientas de información geográfica para analizar las amenazas de inundaciones en el río. Se incluyó la recopilación y análisis de datos estadísticos de caudales, determinación de caudales de inundación y sus períodos de retorno, y la modelación del cauce mediante los programas ArcMap, HEC-RAS y HEC GeoRAS. Se observó las áreas inundables en diferentes períodos de retorno, identificando los niveles de riesgo para las comunidades y la afectación a las infraestructuras cercanas al río. Por lo tanto, el uso de herramientas de información geográfica y software especializado permite una proyección precisa de las áreas vulnerables, facilitando la planificación y gestión de riesgos de inundaciones en la región [8].

“*Modelización de la precipitación-escorrentía mediante el modelo HEC-HMS para la cuenca del río Al-Adhaim, norte de Irak*” consistió en la necesidad de estimar la escorrentía a partir de la lluvia para calcular el almacenamiento de agua en embalses y la probabilidad de inundaciones es crítica. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar un modelo hidrológico utilizando HEC-HMS y Modelos Digitales de Elevación (DEM) para simular los procesos de lluvia-escorrentía en la cuenca del río. La metodología empleada fue HEC-GeoHMS y GIS para identificar la descarga de la presa y la captación del río, utilizando datos de lluvia diarios de 2015 a 2018. Por lo tanto, utilizaron los métodos SCS-CN, SCS Unit Hydrograph y Muskingum para los cálculos de pérdidas, transformación y enrutamiento, respectivamente. El modelo fue calibrado

durante dos años y verificado con datos de un año, mostrando una alta correlación entre los hidrogramas observados y simulados, con un coeficiente de determinación del 90%. De tal manera, los resultados indicaron que el modelo es adecuado para simulaciones hidrológicas en la cuenca del río Al-Adhaim, aunque la descarga de la presa fue ligeramente sobreestimada [9].

El estudio "*Simulación de crecientes de diseño para el control de inundaciones del Río San Pablo en el Cantón Babahoyo*" consistió sobre gestión de inundaciones, la cual se ha identificado una falta de datos precisos sobre caudales en áreas propensas a desbordamientos, como el cantón Babahoyo. En este sentido, se propuso abordar esa brecha de datos mediante una metodología innovadora que combina modelos hidráulicos bidimensionales (2D) con la técnica de Structure from Motion (SfM) y diversas fuentes bibliográficas para estimar caudales máximos en el río San Pablo. A su vez, la metodología aplicada incluyó la obtención de un modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución mediante SfM y la simulación de inundaciones usando el software HEC-RAS. Estos hallazgos mostraron una mejora en la estimación de las áreas afectadas por crecidas del río bajo condiciones de precipitaciones elevadas. En efecto, el estudio establece un fundamento firme para valorar el riesgo de inundaciones y diseñar medidas efectivas para prevenir desastres ambientales en la zona [10].

El estudio titulado "*Modelación Hidrológica del Río Olón para la Estimación de Zonas de Inundación*" tuvo como objetivo definir la geometría y características físicas de 19 subcuencas del río Olón y modelar hidrológicamente las zonas de inundación en un área de 56.2 km² utilizando datos topográficos de Google Earth. Para ello, se emplearon los métodos Racional y SCS, así como los softwares HEC-RAS y QGIS. Los cálculos de caudales de diseño consideraron diferentes períodos de retorno: 5, 10, 25 y 50 años. Los cuales mostraron que, con el Método Racional, el mayor desbordamiento fue de 0.08 m en la cuenca media, mientras que con el Método SCS alcanzó 0.12 m para un período de retorno de 50 años. De tal manera ambos métodos son efectivos para evaluar el riesgo de inundaciones y pueden ayudar en la planificación para reducir dichos riesgos en áreas adyacentes al río, proporcionando una base sólida para la gestión de riesgos y la planificación de medidas preventivas en la región [11].

El "*Modelamiento del escurrimiento por el software HECHMS para predecir el comportamiento hídrico de la microcuenca del río Carrizal*" cuyo objetivo principal fue validar el modelamiento del proceso lluvia-escurrimiento, para analizar y simular el comportamiento hidrológico asociado a precipitaciones y caudales. De este modo, la metodología incluyó la calibración del modelo matemático HEC-HMS y la aplicación de la extensión HEC-RAS,

utilizando datos de precipitación y caudal recopilados de la estación de monitoreo de la ESPAM para los años 2011 a 2015. El análisis reveló que 2012 fue el año con mayor precipitación, lo que provocó inundaciones severas en la provincia. Por tanto, la simulación del modelo permitió determinar con precisión los caudales máximos y las precipitaciones asociadas a diferentes eventos. Además, utilizó la ecuación de Gumbel para pronosticar el comportamiento hídrico futuro, contribuyendo a la identificación de áreas de riesgo de inundación. Por lo tanto, el modelo HEC-HMS, en combinación con la ecuación de Gumbel, ofrece una representación precisa del comportamiento hidrológico y una herramienta efectiva para la gestión de riesgos y la planificación en la subcuenca del río Carrizal, permitiendo prever y mitigar el impacto de futuras inundaciones en la región [12].

3.2.MARCO REFERENCIAL

3.2.1. Estudio de intensidades

Se centra en crear modelos matemáticos para calcular las intensidades máximas de precipitación, utilizando datos de estaciones pluviográficas para estimar eventos extremos de lluvia con mayor precisión [13].

3.2.2. Cuenca hidrográfica

Se refiere al contorno geográfico que delimita una región donde toda el agua es dirigida hacia un único punto de salida.

En una cuenca hidrográfica, se suelen identificar tres sectores principales: Alto, Medio y Bajo. Estos sectores, definidos según las características topográficas, pueden afectar tanto los procesos hidrometeorológicos como el uso de los recursos en la cuenca [14].

3.2.3. Funciones de una cuenca hidrográfica

- a. Función Hidrológica
- b. Función Ecológica
- c. Función Ambiental
- d. Función Socioeconómica

3.2.4. Elementos de una cuenca hidrográfica

a. Divisorio de aguas

Es la línea imaginaria que separa las áreas de drenaje en una cuenca hidrográfica, situada en los puntos más altos de las montañas. Este límite define hacia dónde fluirán las aguas de lluvia, dirigiéndolas hacia distintas vertientes [15].

b. Río principal

Se refiere al río que tiene la mayor longitud y/o el mayor caudal en todas sus secciones:

- a. Curso superior
- b. Curso medio
- c. Curso inferior.

3.2.5. Afluentes

Los afluentes son ríos secundarios que desembocan en el cauce principal. Su principal problema es la contaminación, principalmente por actividades agrícolas y ganaderas. Los ríos se pueden clasificar según su patrón de flujo a lo largo del tiempo:

- a. **Perennes:** Ríos que tienen agua durante todo el año, incluso en sequías, gracias a fuentes subterráneas.
- b. **Intermitentes:** Ríos que fluyen solo durante las estaciones lluviosas.
- c. **Efímeros:** Ríos que surgen temporalmente tras lluvias, formados por escurrimiento superficial [15].

3.2.6. Clasificación de las cuencas hidrográficas

Tabla 3.1. Clasificación de cuencas propuestas para el Ecuador [16]

Categoría	Superficie en Has.	Superficie en km ²
Sistema hidrográfico	Mayor a 300.000	Mayor a 3.000
Cuenca hidrográfica	100.001 a 300.000	1.001 a 3.000
Subcuenca	15.001 a 100.000	151 a 1.000
Microcuenca	4.000 a 15.000	40 a 150
Mini cuenca o quebrada	Menor a 4.000	Menor a 40

Fuente: INEFAN (1995)

3.2.7. Delimitación de una cuenca hidrográfica

La delimitación de una cuenca hidrográfica consiste en identificar la línea divisoria de aguas o parteaguas. Esta línea se traza siguiendo el contorno de la máxima elevación que separa dos cuencas adyacentes. La delimitación se basa en el relieve, por lo que los términos cuenca orográfica y cuenca hidrográfica se utilizan como sinónimos para describir la zona de captación y desviación de las aguas [17].

3.2.8. Software para delimitar cuencas hidrográficas

- a. QGIS: Sistema de Información Geográfica (SIG) que permite analizar, visualizar y editar datos espaciales, creando mapas multicapa para diversos fines.
- b. ARCGIS: Sistema modular de SIG de ESRI, compuesto por ArcMap, ArcCatalog y ArcTools, utilizado tanto en escritorios individuales como en redes de computadores para análisis geoespaciales.
- c. SAGA GIS: SIG que ofrece herramientas para el análisis geo científico automatizado, con una interfaz fácil de usar y opciones avanzadas de visualización y manejo de datos espaciales [18].

3.2.9. Parámetros Morfométricos de una microcuenca

La morfometría, o geo morfometría, es el análisis cuantitativo de las características de la superficie de una cuenca hidrográfica. Este estudio cuantifica variables para evaluar el uso, las oportunidades y limitaciones de los recursos naturales y ambientales, y las condiciones socioeconómicas locales. Analizando la superficie, relieve e hidrografía, permite comparaciones entre cuencas y ayuda a comprender su complejidad hidrológica.

3.2.9.1 Área

El área de la cuenca es posiblemente la característica más relevante tanto desde el punto de vista morfométrico como hidrológico. Se determina mediante la divisoria de aguas, que establece el tamaño de la cuenca, expresado en kilómetros cuadrados (km²) [19].

3.2.9.2 Perímetro

Es la longitud a lo largo de un plano horizontal que sigue el curso de la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud, usualmente en metros o kilómetros [19].

3.2.9.3 Longitud del cauce principal

Es la extensión horizontal que sigue la trayectoria de la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud, generalmente en metros o kilómetros [19].

3.2.9.4 Orden de la cuenca

La jerarquización ayuda a comprender mejor la complejidad y el desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden se asocia con el caudal relativo de los diferentes segmentos del canal [20].

3.2.9.5 Densidad de drenaje

Es la relación entre la longitud total de las corrientes en una cuenca y su área total proporciona una visión detallada de la complejidad y el desarrollo del sistema de drenaje. Una mayor densidad de drenaje generalmente indica una red fluvial más estructurada o un mayor potencial de erosión, y tiende a disminuir a medida que aumenta el tamaño de la cuenca [20].

3.2.10. Método del Servicio de Conservación del Suelo (SCS)

Es un modelo empírico creado por el Soil Conservation Service (SCS) que permite estimar el caudal máximo de crecida. Este modelo relaciona la precipitación neta (P_n) con la precipitación total (P) y la capacidad de almacenamiento de la cuenca (S), utilizando un número hidrológico o número de curva (CN). Este número está asociado a varios factores específicos de la cuenca en estudio [21].

3.2.11. Método del Número de Curva (CN)

El modelo del Número de Curva (CN) permite calcular la escurrimiento superficial acumulada (o lluvia neta acumulada) desde el inicio de una tormenta hasta un momento específico. En 1954, el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de los EE. UU, desarrolló un método sencillo para calcular el escurrimiento, teniendo en cuenta variables como:

- a. La lluvia antecedente
- b. El tipo y uso del suelo
- c. La cobertura del suelo
- d. El manejo del suelo
- e. La capacidad de infiltración del suelo

De tal forma, este método empírico se basa en una extensa serie de determinaciones realizadas por el SCS y se fundamenta en la premisa del SCS para calcular las abstracciones a la precipitación durante una tormenta [22].

3.2.12. Tiempo de concentración (t_c)

El tiempo de concentración es el tiempo en el cual recorre una gota de agua desde el punto más alejado de la cuenca hasta la salida de la cuenca[23].

3.2.13. Curva de Duración Intensidad Frecuencia, de Dick y Peschke

Para situaciones en las que los períodos de lluvia son inferiores a una hora o no se dispongan de datos pluviográficas para determinar las intensidades máximas, se puede utilizar la metodología de Dick Peschke. Esta metodología relaciona la duración de la tormenta con la precipitación máxima en 24 horas [24]. La **figura 1** ilustra un ejemplo de la curva Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF).

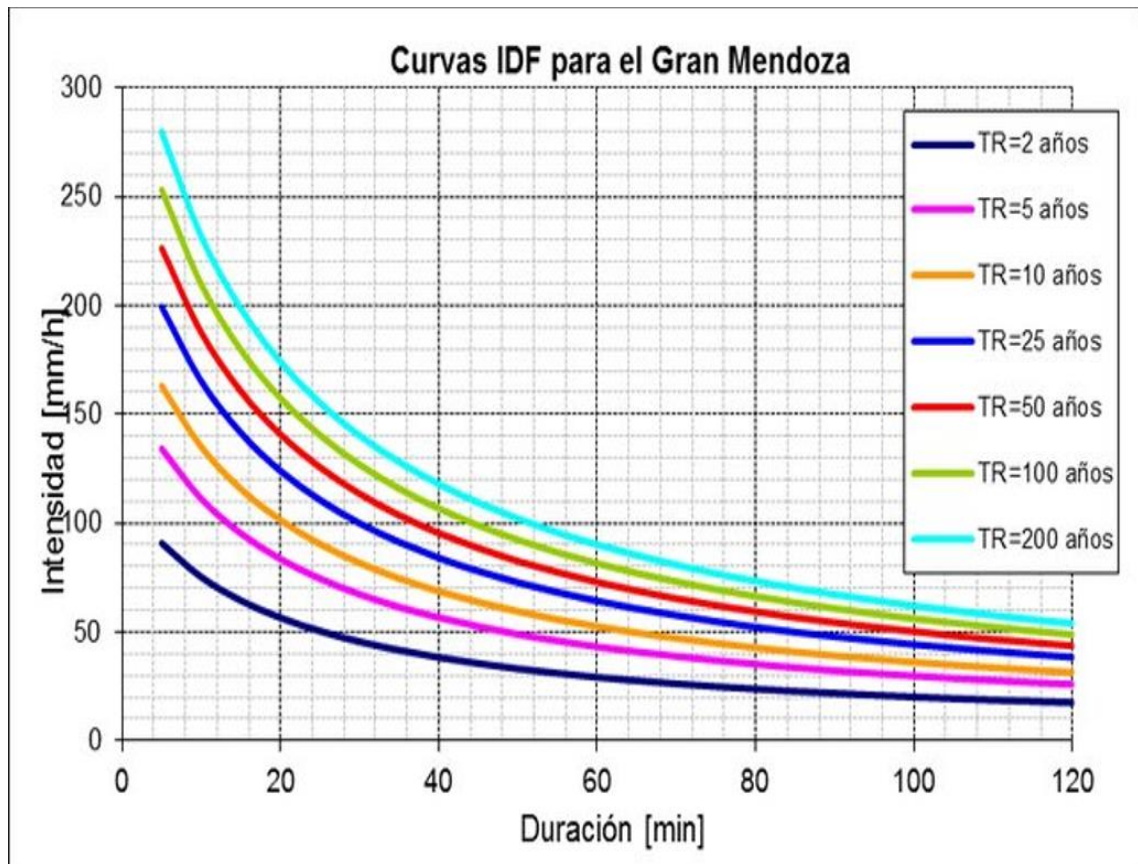


Figura 3.1 Curvas IDF [24]

3.2.14. Método del bloqueo alternativo

El método del bloqueo alternativo es una técnica simple para generar un hietograma de diseño utilizando una curva de intensidad-duración-frecuencia. El hietograma de diseño generado por este método detalla la cantidad de precipitación que ocurre en n intervalos de tiempo consecutivos durante una duración total t_d [25].

3.2.15. Método de Gumbel

el método de Gumbel se lo conoce como el de Distribución de Gumbel enfocado directamente en la parte de la hidrología para análisis de eventos como inundaciones, precipitaciones y

caudales picos de un Río, se basa en la teoría de valores extremos y facilita la estimación de probabilidades que ocurra un evento en un intervalo de tiempo determinado[26].

3.2.16. Precipitaciones

Precipitación se refiere a cualquier forma de agua que cae de la atmosfera a la superficie terrestre, entre las precipitaciones más conocidas tenemos lluvia, nieve y granizo así también como el rocío el cual en ciertas regiones representan un valor no muy significativo.

En cuanto a su origen se pueden identificar en los tipos:

- a. **Ciclónicas:** provocadas por frentes asociados a las depresiones o ciclones. Aporta con el mayor volumen de precipitación en una cuenca.
- b. **Convección:** ocurren debido al ascenso de bolsas de aire caliente típicamente produciendo las tormentas de verano.
- c. **Orográficas:** se generan cuando masas de aire húmedo son forzadas a ascender al encontrarse con una barrera montañosa[27].

3.2.17. Satélites meteorológicos

Son Satélites diseñados para monitorear el clima atmosférico de la Tierra. Los satélites proporcionan una serie de datos importantes para prevenir la meteorología climática, además se encuentra ubicados en la órbita de la Tierra con la capacidad de analizar toda la superficie atmosférica[27].

- a) **TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission):** Mision satelital de la NASA y la Agencia Japonesa de Exploracion Aeroespacial diseñada para medir precipitaciones tropicales[28]
- b) **GPM (Global Precipitation Measurement):** Mision satelital de la NASA y la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, está diseñada para mejorar la medición y monitoreo de las precipitaciones globales abarcando las regiones tropicales hasta las polares[29].

3.2.18. Hietograma de precipitación de diseño

Los hietogramas son una representación gráfica que muestra la variación o intensidad de la precipitación a lo largo del tiempo, y se presentan mediante diagramas de barras [30].

3.2.19. Modelos hidrológicos

El estudio de la Hidrología se basa en comprender el ciclo hidrológico y sus procesos e interrelaciones, tanto superficiales como subsuperficiales, lo cual requiere "medir". Aunque las técnicas para medir caudales y precipitaciones han avanzado, otras partes del ciclo hidrológico,

como la infiltración y el flujo subterráneo, se miden de forma indirecta o remota, generando incertidumbre sobre el ciclo hidrológico [31].

En este contexto, los modelos hidrológicos son herramientas esenciales para entender el funcionamiento y comportamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Estos modelos se utilizan para:

- a. Gestión y planificación de recursos hídricos.
- b. Comprender mejor el papel de los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca específica.
- c. Prever posibles condiciones futuras basadas en datos actuales.
- d. Modelar otros procesos relacionados, como la calidad del agua y la erosión.

3.2.20. TETIS

El modelo TETIS se ha desarrollado para simular procesos hidrológicos en cuencas naturales, incluyendo submodelos para evaluar el impacto de embalses y el ciclo de sedimentos. Para su uso, se requieren datos de entrada como precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial (ETP) [32].

TETIS utiliza interpolación basada en el inverso de la distancia al cuadrado para generar información espacial distribuida a partir de estos datos. Por tanto, la generación de escorrentía se basa en un balance hídrico en cada celda, asumiendo que el agua se distribuye en seis niveles de almacenamiento conceptuales conectados verticalmente.

3.2.21. PRMS

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) ha desarrollado un sistema de modelación que simula la relación precipitación-escorrentía con parámetros distribuidos. Este sistema evalúa cómo diferentes combinaciones de clima y uso del suelo afectan el caudal y la hidrología general de las cuencas hidrográficas [33].

3.2.22. Tipo y clasificación de modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos pueden clasificarse de diversas formas, considerando aspectos como el enfoque matemático y el nivel de detalle espacial de sus componentes. Generalmente, se distinguen según la representación de la superficie de la cuenca (agregados, semidistribuidos y distribuidos), el enfoque matemático (determinista o estocástico) y el tratamiento de los procesos hidrológicos (de base física o empírica). A continuación, se observa en la **Figura 2** los modelos según la clasificación y tipología interrelacionada propuesta por Singh [34].

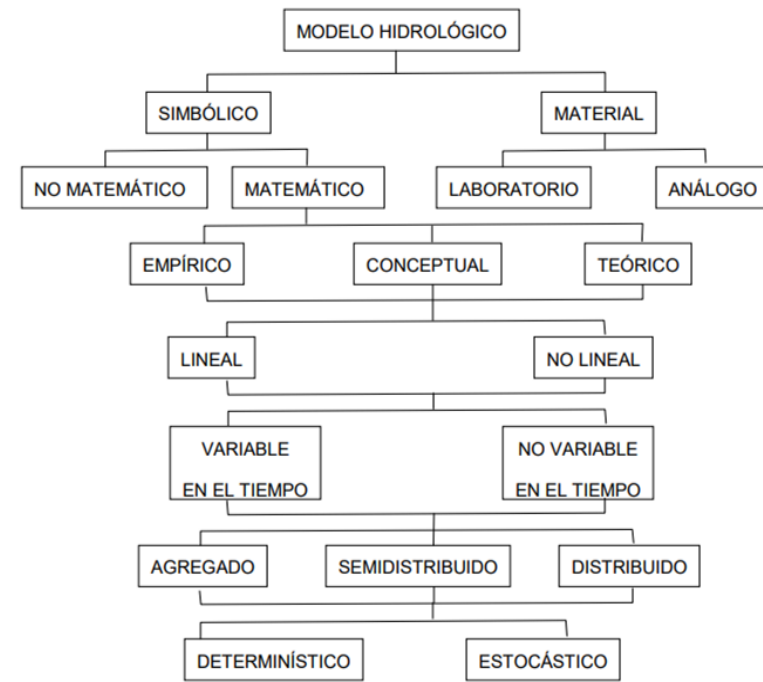


Figura 3.2. Clasificación de los modelos hidrológicos.

3.2.23. Modelos hidráulicos

Los modelos hidráulicos son fundamentales para entender el comportamiento del agua en sistemas acuáticos. A diferencia de los modelos hidrológicos, que generan hidrogramas, los modelos hidráulicos calculan niveles de agua y velocidades en diferentes puntos de un río. Son esenciales en el análisis de inundaciones, permitiendo determinar profundidades y velocidades del agua para evaluar posibles daños. También son utilizados por ingenieros para diseñar y operar infraestructuras hídricas, adaptando estrategias operativas a diferentes escenarios [35].

Aplicaciones de los modelos hidráulicos incluyen:

- Análisis de inundaciones y diseño de estructuras de control
- Evaluación de caudales mínimos y sequías
- Optimización de la operación de infraestructuras hidráulicas
- Análisis de fallos de presas
- Transporte de sedimentos en cuerpos de agua
- Estudios de morfología
- Análisis de intrusión salina
- Evaluaciones de calidad del agua y ecología
- Análisis de impactos de vertidos en corrientes superficiales
- Diseño de sistemas de alerta temprana para inundaciones y contaminación

- Control en tiempo real de sistemas de agua
- Evaluación de escenarios para la gestión de recursos hídricos

3.2.24. Modelos hidráulicos unidimensionales

Este tipo de modelo es ideal para analizar el comportamiento de redes de distribución de agua, especialmente cuando los caudales fluyen dentro de canales regulares.

Para modelar flujos unidimensionales, se ha empleado el programa HEC-RAS, este software está diseñado para calcular líneas de agua en ríos y canales con flujo gradualmente variado, utilizando la ecuación unidimensional de la energía mediante el método "Standard step". HEC-RAS es útil en la planificación del uso del suelo y en estudios de seguros contra inundaciones, ya que permite evaluar el impacto de los obstáculos en la capacidad de desagüe y delimitar áreas inundables [36].

Además, se aplica en proyectos de encauzamiento, acondicionamiento de márgenes, y en la sustitución de puentes o azudes, ya que facilita la determinación de la influencia de estas intervenciones en los niveles de agua.

3.2.24.1 SWMM

El Storm Water Management Model (SWMM) es un modelo de simulación utilizado para analizar la escorrentía de lluvia y el flujo subterráneo. Este modelo es adecuado para eventos individuales y para simulaciones a largo plazo (continuas) de la cantidad y calidad de la hidrología, principalmente en áreas urbanas y suburbanas, tanto en la superficie como en el subsuelo [37].

3.2.25. HEC-HMS

Este modelo, que combina enfoques físicos y empíricos con una representación semidistribuida de la cuenca, simula la conversión de la precipitación en escorrentía en cuencas, tanto en condiciones naturales como modificadas. HEC-HMS mejora respecto a su predecesor HEC-1 con capacidades avanzadas de modelado distribuido, simulación continua y una interfaz gráfica amigable [34].

Además, el software HEC-GeoHMS facilita la integración de datos espaciales mediante ArcGIS, apoyando el desarrollo de submodelos de cuenca. Sus módulos básicos incluyen la entrada de datos, el modelo de cuenca, el modelo de precipitación y el módulo de control, que definen la estructura y el tiempo de las simulaciones [38].

3.2.26. HEC-RAS

Es un software de libre distribución ampliamente utilizado en ingeniería hidráulica para la modelización del flujo en cauces naturales y canales artificiales, tanto en una dimensión como en dos dimensiones. Este programa es de aceptación internacional y se ha convertido en una de las herramientas más comunes en su campo [33].

Capacidades:

- Modelar sistemas de cauces fluviales y redes de canales.
- Simular el impacto de estructuras en el cauce sobre las llanuras de inundación, y calcular velocidades de corriente en puentes y obras de drenaje.
- Modelar la ruptura de presas, balsas y diques.
- Simular el funcionamiento de estaciones de bombeo y los efectos de la apertura y cierre de compuertas, así como las zonas de embalsamiento de agua.
- Analizar el transporte de sedimentos y la calidad del agua.

3.2.27. Geometría del cauce

En una sección transversal, el caudal se ajusta según la anchura del flujo en la superficie, la profundidad y la velocidad promedio de la corriente. También está afectado por factores como el gradiente del agua, el índice de fricción de Manning (n) y la tensión de corte del lecho [39].

3.2.27.1 Variables en la sección transversal de un cauce natural

Los cauces aluviales modifican continuamente su forma debido a la interacción de factores como [18]:

- Caudal
- Ancho
- Profundidad
- Velocidad
- Pendiente o gradiente hidráulico
- Rugosidad del lecho
- Tamaño y volumen del sedimento transportado

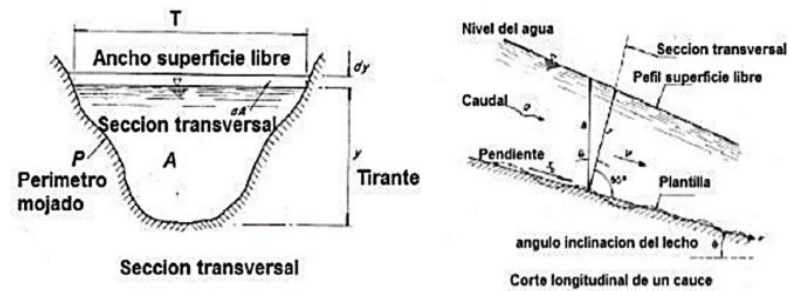


Figura 3.3. Parámetros hidráulicos de un cauce natural[40].

3.2.28. Coeficiente de resistencia al movimiento

El coeficiente de rugosidad "n" de Manning, esencial para evaluar el flujo en canales y tuberías, se puede calcular de varias maneras. Una opción es estimar "n" tomando en cuenta factores como el material del canal y la vegetación. Otra es consultar tablas con valores típicos para distintos tipos de canales y materiales. También se puede ajustar el valor de "n" comparando con casos previos similares. Finalmente, es posible realizar un análisis teórico de la distribución de velocidades en el canal usando datos de velocidad o mediciones de rugosidad [18].

Tabla 3.2. Clasificación de valores de rugosidad por tipología [41].

Condiciones del cauce		Valores	
Material involucrado	Tierra	n0	0,020
	Corte de roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de sección transversal	Gradual	n2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010-0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n3	0,000
	Menor		0,010-0,015
	Apreciable		0,020-0,030
	Severo		0,040-0,060
Vegetación	Baja	n4	0,005-0,010
	Media		0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muy alta		0,050-0,100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m5	1.00
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Fuente: Ven te Chow (1994)

3.2.29. Condiciones de contorno

En un curso de agua, una ubicación se considera aguas abajo si se encuentra más adelante de una sección específica, siguiendo el flujo de la corriente. Por el contrario, una ubicación está aguas arriba si se encuentra antes de esa sección, en dirección contraria al flujo.

Para la modelización de sistemas hídricos, es esencial definir las condiciones de contorno que establecen la superficie inicial del agua en los extremos del sistema, tanto en aguas arriba como en aguas abajo. En un régimen subcrítico, solo es necesario establecer la condición de borde en aguas abajo. En cambio, en un régimen supercrítico, se debe definir la condición de borde en aguas arriba. Si el modelo incluye ambos regímenes, es necesario considerar las condiciones de borde en ambos extremos [18].

4. MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

4.1.METODOLOGÍA

Para llevar a cabo esta investigación, se adoptará una metodología delineada en la **Figura 4.1.**, comenzando con la recopilación de datos satelitales de precipitación provenientes de fuentes confiables y seguras. Estos datos serán fundamentales para delimitar la microcuenca utilizando el software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) QGIS. A través de este proceso, se obtendrán parámetros morfométricos clave de la microcuenca, como el área, la pendiente y la densidad de drenaje, los cuales son esenciales para caracterizar el comportamiento hidrológico del área de estudio. Posteriormente, se procederá al cálculo del Número de Curva (CN) utilizando la tabla específica indicada en el **ANEXO I**. Este paso se realizará siguiendo el método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN), que permite estimar los caudales máximos en la microcuenca del Río Quindígua con base en las características del suelo y la cobertura vegetal. Una vez determinados los caudales máximos, se identificarán y calcularán los tiempos de retorno necesarios para la simulación de picos de inundación. Para llevar a cabo esta simulación, se explorará detalladamente la metodología de la Técnica Lluvia sobre Cuadrícula (RoG). Esta técnica, integrada con datos topográficos detallados del cauce principal, la pendiente del terreno y el coeficiente de Manning, permitirá modelar con precisión los diferentes escenarios de inundación en la microcuenca. En conjunto, la combinación de datos de precipitación satelital, análisis morfométricos detallados y el uso del método SCS-CN junto con la técnica RoG proporcionará una evaluación robusta y precisa de los picos de inundación esperados en los diferentes períodos de retorno. Este enfoque integral no solo mejorará nuestra comprensión del riesgo hidrológico en la microcuenca del Río Quindígua, sino que también

proporcionará información crucial para la gestión y planificación de medidas preventivas ante inundaciones en esta área vulnerable.

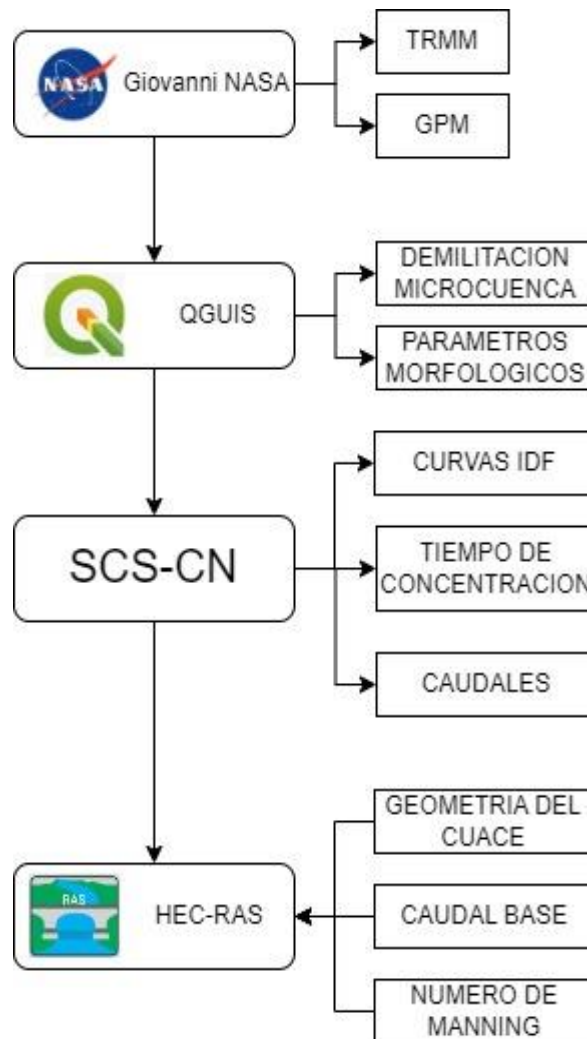


Figura 4.1. Esquema metodológico.

Elaborado por: Tipantasi Jonathan.

4.1.1. Área de estudio

La microcuenca del Río Quindígua se encuentra ubicada entre los cantones de La Maná y Sigchos, en la provincia de Cotopaxi la misma que nace en las laderas occidentales del cantón Sigchos, contiene diferentes afluentes a lo largo del recorrido, entre los principales afluentes se encuentran los ríos Quebrada de Amanda y Yacuchaqui los mismos que están ubicados al oeste del cantón Sigchos y se encuentran en su curso inicial.

4.1.2. Delimitación de la microcuenca

La delimitación de áreas de drenaje superficial permite identificar las zonas donde las precipitaciones 'principalmente' 'pluviales' convergen y son drenadas hacia un único punto de

salida(desembocadura). Utilizando el software QGIS se definirán los límites de la microcuenca del Río Quindigua y se obtendrá los parámetros morfométricos esenciales para su análisis.[42]

4.2. Caracterización morfológica

4.2.1. Área de la microcuenca (A)

Es la extensión de tierra que se encuentra delimitada por las divisorias de agua naturales, las mismas que nos permiten determinar el tamaño de la cuenca en km^2 . En base a su área y la **Tabla 4.1.** se determinará el grupo al que pertenece [43]

Tabla 4.1. Clasificación de Áreas.

ÁREA (km^2)	NOMBRE
<5	Unidad
5 – 20	Sector
20 – 100	Microcuenca
100 – 300	Subcuenca
>300	Cuenca

Fuente: Jiménez, Materón (1986)

4.2.2. Perímetro de la microcuenca (P)

Es la distancia total alrededor de la línea divisoria que delimita la cuenca. La distancia se mide desde el punto de salida de la cuenca o desde un punto específico de interés en el cauce del río.

4.2.3. Longitud del curso principal (L)

Es la distancia total del río que se encuentra medida desde el punto más alejado de la microcuenca hasta el punto de desembocadura.[43]

4.2.4. Longitud Axial (La)

Es la distancia en línea recta entre el punto de la zona más baja que es la desembocadura hasta la zona más alta de la subcuenca.[43]

4.2.5. Ancho promedio de la cuenca (Ap)

Se la define con la relación que existe entre el área de la subcuenca y la longitud axial de la misma, calculada con la ecuación (4.1) [43].

$$Ap = \frac{A}{La} \quad (4.1)$$

Donde:

Ap: Ancho promedio de la subcuenca (km)

A: Área de la subcuenca (km²)

La: Longitud axial de la subcuenca (km)

4.2.6. Coeficiente de Compacidad o Gravelius (Kc)

Este coeficiente describe la forma y la superficie de la subcuenca, teniendo una influencia directa sobre la escorrentía, este coeficiente es adimensional y se lo obtiene mediante la relación del perímetro de la subcuenca y el perímetro de una circunferencia que tenga la misma área de la subcuenca detallada en la ecuación (4.2) y en base a la **Tabla 4.2.** se determinará su clasificación [43].

$$Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (4.2)$$

Donde:

Kc: Coeficiente de compacidad o Gravelius (adimensional)

A: Área de la subcuenca (km²)

P: Perímetro de la subcuenca (km)

Tabla 4.2. Clasificación del Coeficiente de Compacidad O Gravelius.

Kc	Clasificación
1 a 1,25	Casi redonda a oval-redonda
1,25 a 1,5	Oval redonda a oval-alargada
1,5 a 1,75	Oval alargada a alargada
>1,75	Alargada

Fuente: Villela e Matos (1975).

4.2.7. Factor de forma de Horton (Rf)

El factor de forma establece la relación entre el área de la subcuenca y la longitud axial al cuadrado detallada en la ecuación (4.3) mediante la cual se determinará su forma en base a la **Tabla 4.3.**[43].

$$Rf = \frac{A}{La^2} \quad (4.3)$$

Donde:

Rf: es el factor de forma de Horton valor adimensional.

A: área de la subcuenca (km²)

La: Longitud axial de la subcuenca (km)

Tabla 4.3. Clasificación Factor de forma Horton.

Rango	Forma de la Cuenca
<0,22	Muy Alargada
0,22 – 0,30	Alargada
0,30 – 0,37	Ligeramente alargada
0,37 – 0,45	Ni Alargada ni Ensanchada
0,45 – 0,60	Ligeramente Ensanchada
0,60 – 0,80	Ensanchada
0,80 – 1,12	Muy Ensanchada
>1,20	Rodeando el Desagüe

Fuente: Strahler (1957).

4.2.8. Pendiente del cauce (J)

Determina la inclinación del cauce principal de la subcuenca en porcentaje obteniéndola con la ecuación (4.3) y de acuerdo al resultado se identificará según la **Tabla de 4.4** [43].

$$J = \frac{\text{Cota mayor} - \text{Cota menor}}{L} * 100\% \quad (4.4)$$

Donde:

J: pendiente del cauce principal (%)

L: longitud del cauce principal (m)

Tabla 4.4. Clases de pendiente (%)

Rangos de Pendiente	Clases
<10	Suave
10-30	Moderada
>30	Fuerte

Fuente: Baldeón (2016).

4.2.9. Número de Orden (No)

El número de orden de una cuenca es un sistema que determina la clasificación jerárquica de los cursos de agua dentro de la subcuenca, el cual utiliza un patrón de ramificaciones, mientras el número de orden de la subcuenca sea mayor el potencial erosivo, transporte de sedimentos y la escorrentía en la cuenta serán mayores.[43]

4.2.10. Densidad de drenaje (Dd)

La densidad de drenaje brinda una comprensión y definición más completa del sistema hidrográfico de la subcuenca, mientras más alto sea el valor de densidad de drenaje indica una

mayor red fluvial en la subcuenca. Este valor se obtiene mediante la relación de la suma de las longitudes de todos los cursos existentes en la subcuenca con el área total de la misma mediante la ecuación (4.5) [43].

$$Dd = \frac{L}{A} \quad (4.5)$$

Donde:

Dd: Densidad de drenaje

L: es la suma de la longitud de los arroyos efímeros, intermitentes y perennes de la subcuenca (km)

A: Área de la subcuenca (km²)

4.3. NUMERO DE CURVA (SCS-CN)

Mediante la utilización del programa de Sistemas de Información Geográfica se obtendrá el área de cobertura y uso del suelo además del porcentaje que representa cada una los cuales nos brindaran una mayor comprensión de cada una de las características del suelo que se encuentran dentro de la subcuenca.

Se utilizará el shape de la cobertura y uso del suelo de la subcuenca descargado de la misión Sentinel-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA) del año 2022 en una resolución de 10 metros. Estos archivos shapes proporcionan la distribución y uso del suelo de la zona de estudio en este caso de la subcuenca del Río Quindigua. Utilizando la pendiente de la cuenca y basándonos en el tipo de suelo de la zona de estudio se identificará a que grupo hidrológico pertenece de acuerdo a la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Grupos hidrológicos del suelo.

Grupo	Descripción	Ejemplo
A	Suelos alta capacidad de infiltración y baja escorrentía	Suelos arenosos
B	Suelos con moderada capacidad de infiltración	Suelos limosos
C	Suelos con baja capacidad de infiltración	Suelos franco arcillosos
D	Suelos con muy baja capacidad de infiltración y alta escorrentía	Suelos arcillosos

Fuente: Tipantasi Jonathan.

Finalmente determinando el tipo de grupo hidrológico se calculará el Numero de Curva (CN) específico el cual estará basado en tres características que son tipo de suelo, uso del suelo y cobertura del suelo, aplicaremos la formula CN expresada en la ecuación (4.6).

$$CN (III) = \frac{23 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)} \quad (4.6)$$

Donde:

CN: El número de curva con un valor adimensional

CN (II): Sumatoria de los diferentes grupos hidrológicos.

4.4.ALMACENAMIENTO MAXIMO POTENCIAL DE LA SUBCUENCA (S)

Es la cantidad máxima de precipitación que retiene la cuenca mediante la infiltración y destaca por ser un parámetro fundamental en el cálculo de la escorrentía de la subcuenca con el método SCS-CN, mediante la ecuación (4.7) se obtendrá el almacenamiento máximo potencial [44].

$$S = \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) * 25,4 \quad (4.7)$$

Donde:

S: Almacenamiento máximo potencial (pulgadas)

CN: Número de curva.

4.5.TIEMPO DE CONCENTRACION (tc)

El tiempo de concentración (tc) es el tiempo necesario para que la escorrentía viaje desde el punto más lejano de la subcuenca hasta el punto de salida o desembocadura de la misma, el tiempo de concentración cambia de acuerdo a la pendiente y el tipo de superficie que tenga la subcuenca.[45]

4.5.1. ECUACION DE KIRPICH

Esta ecuación fue creada en 1940 la misma que se creó utilizando datos de siete diferentes cuencas rurales en los cuales se tuvo canales bien definidos y sus pendientes era pronunciadas, mediante la ecuación (4.8) reemplazando cada uno de los valores se obtendrá el tiempo de concentración[46].

$$tc = 0.06628 * \left(\frac{L}{J^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (4.8)$$

Donde:

t_c : Es el tiempo de concentración (h)

L : Longitud del cauce principal (m)

J : Es la pendiente de la subcuenca (m/m)

4.6. TIEMPO DE RETRASO

Es el tiempo que transcurre desde el comienzo de la precipitación hasta que se alcance el máximo flujo de agua en un punto específico dentro de una cuenca, se puede determinar utilizando la ecuación (4.9) para calcular dicho tiempo [47].

$$tr = 0.6 * tc \quad (4.9)$$

Donde:

tr : Tiempo de retraso (h)

t_c : Tiempo de concentración (h)

4.7.DURACION DE EXCESO

Es el período durante el cual la cantidad de precipitación acumulada excederá un límite específico o crítico previamente definido. Para cuencas pequeñas se empleará la ecuación (4.10) [47].

$$de = tc \quad (4.10)$$

Donde:

de : Duración de exceso (h)

t_c : Tiempo de concentración (h)

4.8.TIEMPO PICO

Es el lapso de tiempo que empezara del inicio de la precipitación hasta cuando se logre el caudal máximo, se utilizara la ecuación (4.10) para calcular el factor [47].

$$tp = tr + \frac{de}{2} \quad (4.11)$$

Donde:

tp : Tiempo pico (h)

tr: Tiempo de retraso (h)

de: Duración en exceso (h)

4.9. TIEMPO BASE

Se refiere al intervalo de tiempo elegido como punto de partida para examinar y analizar elementos hidrológicos, como inundaciones, sequías o patrones de precipitación. Este tiempo se determinará utilizando la ecuación (4.12) [47].

$$tb = 2,67 * tp \quad (4.12)$$

Donde:

tb: Tiempo base (h)

tp: Tiempo pico (h)

4.10. CAUDAL PICO UNITARIO

Representa el punto de mayor intensidad en el flujo de agua durante un evento de crecida para una unidad de hidrograma de 1 centímetro. La ecuación (4.13) está limitada por la causa del tiempo de concentración, además la ecuación pertenece al método SCS [48].

$$qp = \frac{2.08 * A}{tp} \quad (4.13)$$

Donde:

qp: Caudal pico ($m^3/s * cm$)

A: Área de la subcuenca (km^2)

tp: Tiempo pico (h)

4.11. FACTORES CAUDAL PICO METODO SCS

4.11.1. Precipitación Máxima

La precipitación Máxima es nivel más elevado de lluvia que se registra en una zona región o sector durante un período determinado utilizando la ecuación (4.14).

$$Pm = I_{TR} * tc \quad (4.14)$$

Donde:

Pm: Precipitación Máxima (mm)

I_{TR} : Intensidad en un tiempo de retorno (mm/h)

t_c : Tiempo de concentración (min)

4.11.2. Abstracción inicial

Se Refiere a la perdida inicial de agua debido a la evaporación e infiltración antes de que ocurra el escurrimiento superficial. Para calcular esta abstracción se utilizará la ecuación (4.15) la cual relación la retención potencial [49].

$$I_a = 0,2 * S \quad (4.15)$$

Donde:

I_a : Abstracción inicial (mm)

S : Retención potencial (mm)

4.11.3. Intensidades

Es la cantidad de precipitación que cae sobre una región o zona para el cálculo de la intensidad en los diferentes tiempos de retorno se tomara las ecuaciones (4.16) y (4.17) de la estación Meteorológica M0362 Las Pampas para cada tiempo de retorno.

$$5 \text{ min} < t_c < 27,44 \text{ min} \\ I_{TR} = 54,568 * I_{d_{TR}} * t_c^{-0,319} \quad (4.16)$$

$$27,44 \text{ min} < t_c < 1440 \text{ min} \\ I_{TR} = 211,48 * I_{d_{TR}} * t_c^{-0,728} \quad (4.17)$$

4.11.4. Precipitación de exceso

La ecuación (4.18) es la opción más elemental para calcular la profundidad del exceso de precipitación o escorrentía directa de una tormenta, empleando el método (SCS-CN)[49].

$$P_e = \frac{(P_m - I_a)^2}{P_m - I_a + S} \quad (4.18)$$

Donde:

P_e : Precipitación exceso (mm)

P_m : Precipitación máxima (mm)

I_a : Abstracción inicial (mm)

S : Retención potencial (mm)

4.12. CAUDAL PICO TIEMPOS DE RETORNO SCS

El caudal pico para distintos tiempos de retorno se obtiene multiplicando la precipitación de exceso por el caudal pico unitario utilizando la ecuación (4.19) del método SCS.

$$Q_{Tr} = qp * Pe_{Tr} \quad (4.19)$$

Donde:

Q_{Tr} : Caudal en tiempos de retorno (m³/s)

qp: Caudal pico (m³/s * cm)

Pe_{Tr} : Precipitación exceso (cm)

4.13. CURVAS DE INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA (IDF)

Se obtendrá las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) utilizando los datos de precipitación satelitales de la zona de estudio se determinará la precipitación máxima de cada año y se aplicará el Método de Gumbel.

4.13.1. METODO DE GUMBEL

Se utiliza para modelar la distribución de valores extremos como las precipitaciones máximas anuales con el objetivo de estimar la probabilidad que ocurra un evento extremo.

4.13.1.1 Cálculo de la media

Encontrar una medida central de un conjunto de datos de precipitación donde cada dato tendrá un valor diferente, para calcular se utilizará la ecuación (4.20)[50].

$$\bar{X} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i \quad (4.20)$$

Donde:

\bar{X} : Calculo de la media (mm)

N: Número de años de datos

X_i : Valor de la precipitación anual máxima (mm)

4.13.1.2 Desviación Estándar

Es una forma de medir la variabilidad o dispersión de los valores extremos con la ecuación (4.21) en el método de Gumbel [50].

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} * \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.21)$$

Donde:

S: Desviación estándar (mm)

\bar{X} : Calculo de la media (mm)

N: Número de años de datos

X_i : Valor de la precipitación anual máxima (mm)

4.13.1.3 Parámetro de Escala

Describe la dispersión o la variabilidad de los datos extremos en un conjunto de datos, se utilizará la ecuación (4.22) para calcular la escala[50].

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * s \quad (4.22)$$

Donde:

α : Parámetro de escala (mm)

S: Desviación estándar (mm)

4.13.1.4 Parámetro de Ubicación

Ajusta la posición central de la distribución de los valores extremos mediante la ecuación (4.23), permitiendo una mejor representación y predicción de los eventos extremos en función de los datos observados [50].

$$u = \bar{X} - 0.5772 * \alpha \quad (4.23)$$

Donde:

u : Parámetro de ubicación (mm)

\bar{X} : Calculo de la media (mm)

α : Parámetro de escala (mm)

4.13.1.5 Distribución de Gumbel

Se utiliza para modelar eventos extremos, la ecuación (4.24) detalla los factores que se aplicara en la ecuación.

$$F(x) = \exp * \left(-\exp * \left(-\frac{x - u}{\alpha} \right) \right) \quad (4.24)$$

Donde:

F(x): Distribución de Gumbel.

x: Valor de la media

u: Parámetro de ubicación.

α : Parámetro de escala.

4.14. METODO DE BLOQUE ALTERNO POR ANALISIS DE REGRESION MULTIPLE

El método de bloque alterno se utilizará para generar series temporales de precipitaciones y caudales, el objetivo principal será simular secuencias de datos hidrológicos como precipitaciones o el caudal de un Río con la finalidad de crear análisis hidrológicos.

4.14.1. Ecuación general de Intensidad Máxima de Precipitación

La ecuación general de las Curvas IDF se empleará para vincular la intensidad de precipitación con su duración y el período de retorno, donde se aplicará la ecuación (4.25) [47].

$$I_{max} = \frac{K * T^m}{D^n} \quad (4.25)$$

Donde:

I_{max}: Intensidad máxima de precipitación (mm/h)

T: Tiempo de retorno (años)

D: Duración (min)

Para lograr obtener la ecuación lineal de la ecuación potencial de aplicar las propiedades logarítmicas, la ecuación (4.26) brindara la facilidad de hallar dicha ecuación[47].

$$y = X_1 + mX_2 - nX_3 \quad (4.26)$$

Donde:

Y: Logaritmo (Intensidad)

X₁: K

X_2 : Logaritmo (Tiempo de retorno)

X_3 : Logaritmo (Duración)

Mediante el uso del antilogaritmo de la duración, el tiempo y la intensidad, se debe aplicar el análisis de regresión múltiple para determinar los valores de m, n y K , donde la variable 1 corresponderá al valor de n , la variable 2 corresponderá al valor de m , y K será el valor de la intersección.

4.14.2. Hietograma de precipitación de diseño

El hietograma de precipitación está formado por barras que ilustraran la intensidad de la lluvia en distintos intervalos de tiempo a lo largo de la duración del evento de precipitación [44].

a. Precipitación acumulada (Pa)

Mediante la ecuación (4.27) se calculará los valores de precipitación acumulada.

$$Pa = \frac{I * D}{60 \text{ min}} \quad (4.27)$$

Donde:

Pa: Precipitación acumulada (mm)

I: Intensidad (mm/h)

Duración (h)

b. Precipitación incremental (PI)

La Ecuación (4.28) brindara la opción de calcular la precipitación incremental.

$$\begin{aligned} PI_1 &= Pa_1 - Pa_0 \\ PI_2 &= Pa_2 - Pa_1 \\ PI_3 &= Pa_3 - Pa_2 \\ &\dots \\ PI_a &= Pa_c - Pa_b \end{aligned} \quad (4.28)$$

Donde:

PI: Precipitación incremental (mm)

Pa: Precipitación acumulada (mm)

c. Precipitación por método de bloque alterno

Para calcular la precipitación los resultados deberán ajustarse de manera que el valor máximo de precipitación se situé en la parte central de la serie, desde este punto máximo los valores disminuirán de forma alterada hacia ambos extremos. Este proceso se lo aplicara para cada tiempo de retorno[44].

4.15. COEFICIENTE DE RUGOSIDAD MANNING

Para calcular el valor adecuado, en base a la *Tabla 3.2* se seleccionará el valor de acuerdo a las condiciones de las secciones transversales del río, mediante la ecuación (4.29) se obtendrá el valor total de Manning [51].

$$n = (n_0 + n_1 + n_3 + n_4 + n_5) * m_5 \quad (4.29)$$

Donde:

n_0 : Valor básico para un canal recto, uniforme y liso.

n_1 : Valor que se agregara para corregir el efecto de las rugosidades superficiales

n_3 : Valor que considerara los cambios en tamaño y forma de las secciones transversales

n_4 : Valor que considerara las obstrucciones dentro del canal

m_5 : Factor de corrección de los efectos por meandros dentro del canal.

4.16. CAUDAL BASE

Para calcular el caudal base del Río se utilizará la ecuación (4.30) la cual es la ecuación de Manning que se desarrolló en 1980, esta ecuación se ocupa en las ingenierías especialmente en la civil e hidráulica para el diseño de distintos sistemas de drenaje, ríos, canales[52].

$$Q = \frac{1}{n} * A * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (4.30)$$

Donde:

Q: Caudal (m^3/s)

A: Área (m^2)

R: Radio Hidráulico (m)

S: Pendiente (m/m)

4.17. TECNICA LLUVIA EN RED (RoG)

Es un método utilizado en gestionar el riesgo de tormentas, en la cual se modelan los correspondientes procesos hidrodinámicos e hidrológicos de inundaciones, estos se modelan directamente en modelos hidrodinámicos en 2D. El RoG es crucial para captar la variación espacial de precipitaciones y los efectos que ocurren en la escorrentía e inundaciones.[53].

4.18. MODELACION SOFTWARE HEC-HMS

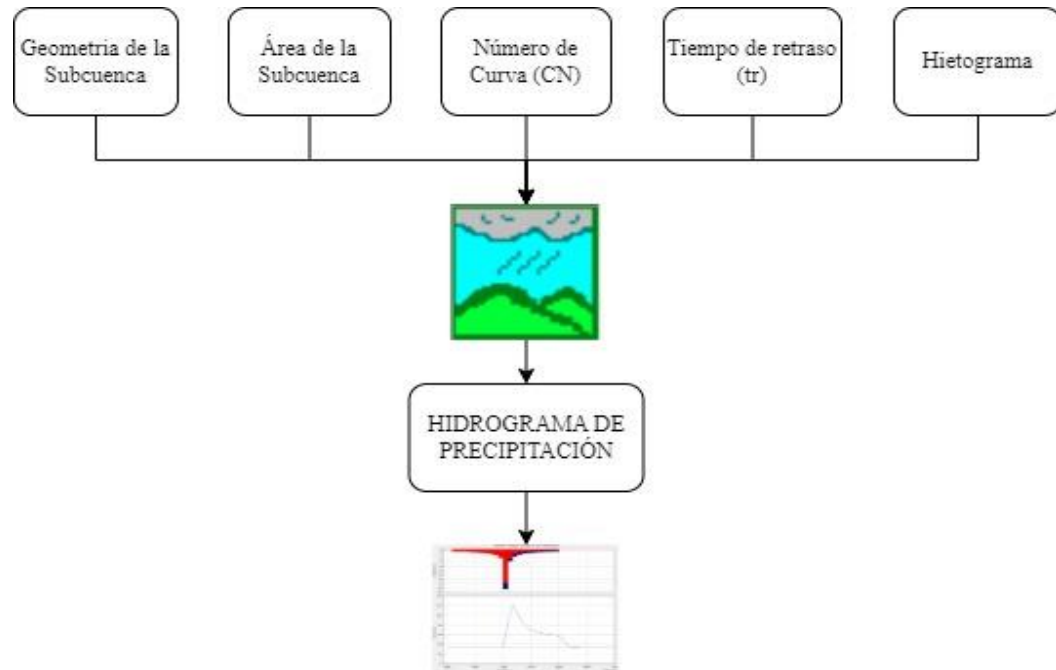


Figura 4.2 Metodología software HEC-HMS.

Para realizar la modelación en el software HEC-HMS es esencial disponer de la geometría de la subcuenca en un formato shape el mismo que servirá para crear el modelo. Para la modelación se ocuparán un sin número de herramientas entre las cuales estarán, Subbasin herramienta para modelaciones precipitacion-escorrentia y outlet herramienta para identificar el punto de salida de la subcuenca. El método de transformación del hidrograma ayudará a convertir la precipitación efectiva en escorrentía directa, y en este caso se utilizará el hidrograma unitario del SCS. Los parámetros necesarios incluyen el área, el número de curva de la subcuenca, y el tiempo de retraso en minutos. Adicionalmente se creará una estación de precipitación u se utilizara el componente Time-Series Data Manager, donde se ingresarán los datos de precipitación para un período de 24 horas (1 día), lo cual permitirá la obtención del hidrograma de precipitación.

4.19. SIMULACION HEC-RAS

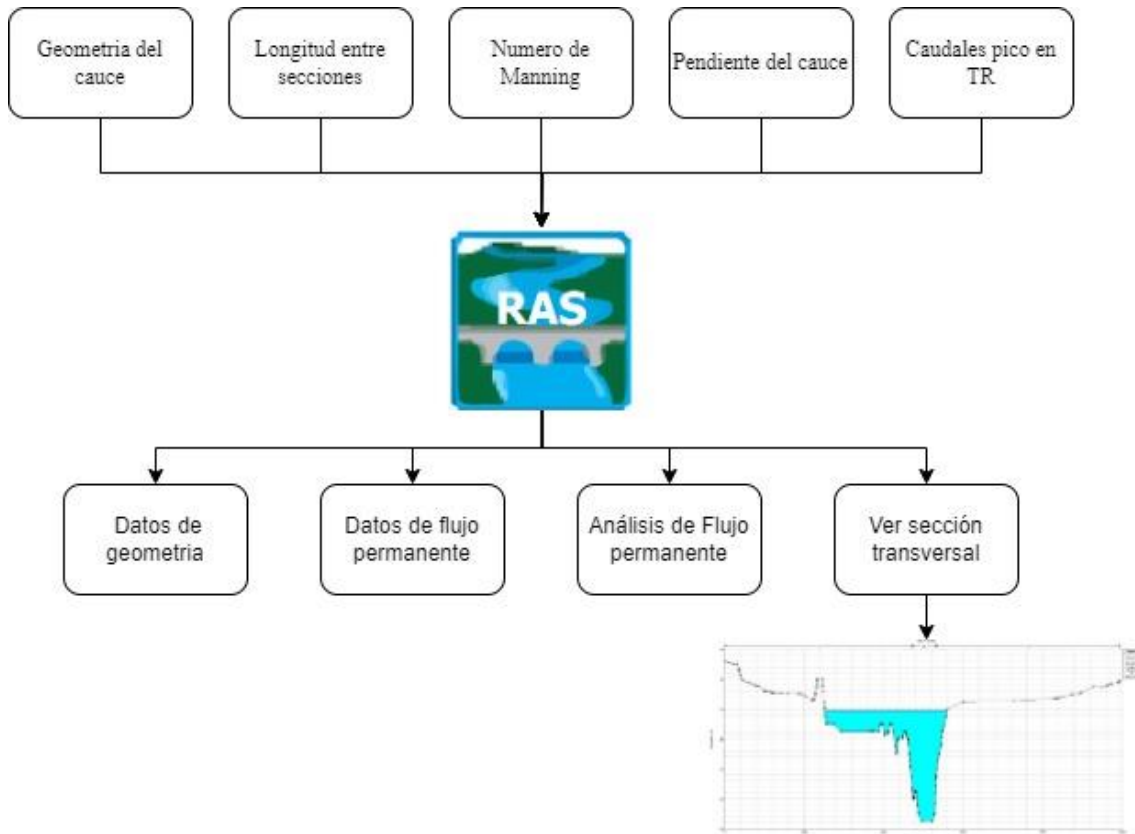


Figura 4.3. Esquema simulación HEC-RAS.

Para realizar la simulación de picos de inundaciones utilizando el programa HEC-RAS de manera efectiva, es crucial llevar a cabo una recolección detallada y precisa de datos morfométricos de la subcuenca. Esto incluye la obtención de datos de secciones transversales (batimetría) del cauce principal, determinación de las longitudes entre secciones, y cálculo del número de Manning basado en el tipo de lecho del río según la tabla estándar. Además, se debe calcular la pendiente utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y estimar los caudales máximos utilizando el método Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) para diferentes períodos de retorno. Una vez recopilados y preparados estos datos, se procede a configurar el programa HEC-RAS. Esto implica la importación de los datos de elevación para definir las distancias entre las secciones transversales y configurar adecuadamente la geometría del modelo. Luego, se ingresan los datos de los caudales máximos obtenidos previamente, considerando tanto los flujos permanentes como los picos en los tiempos de retorno especificados. Además, se introducen las pendientes aguas arriba y aguas abajo para un análisis completo del flujo permanente. Finalmente, se realiza el análisis del flujo permanente mediante la simulación en HEC-RAS, observando y evaluando el comportamiento del flujo en diferentes períodos de retorno establecidos. Este enfoque detallado y sistemático

permite obtener resultados precisos que son fundamentales para la gestión y la planificación de medidas preventivas ante inundaciones en la subcuenca del río Quindigua.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados presentados a continuación se derivan del estudio y análisis de datos obtenidos tanto de registros oficiales como de simulaciones computacionales, centrados en la subcuenca del Río Quindigua.

5.1.RESULTADOS DE PARÁMETROS MORFOLÓGICOS

En el mapa físico de la subcuenca del Río Quindigua, que se muestra en la Figura 5.1, revela que tiene una extensión de 154,6 km². Según la Tabla 4.1, esta subcuenca se clasifica como Subcuenca, ya que se encuentra en el rango de 100 a 300 km², su perímetro es de 88,93 km y la longitud del cauce principal alcanza 17,51 km. Las coordenadas finales son (714842 E, 9918923 N) y la altitud es de 954 msnm.

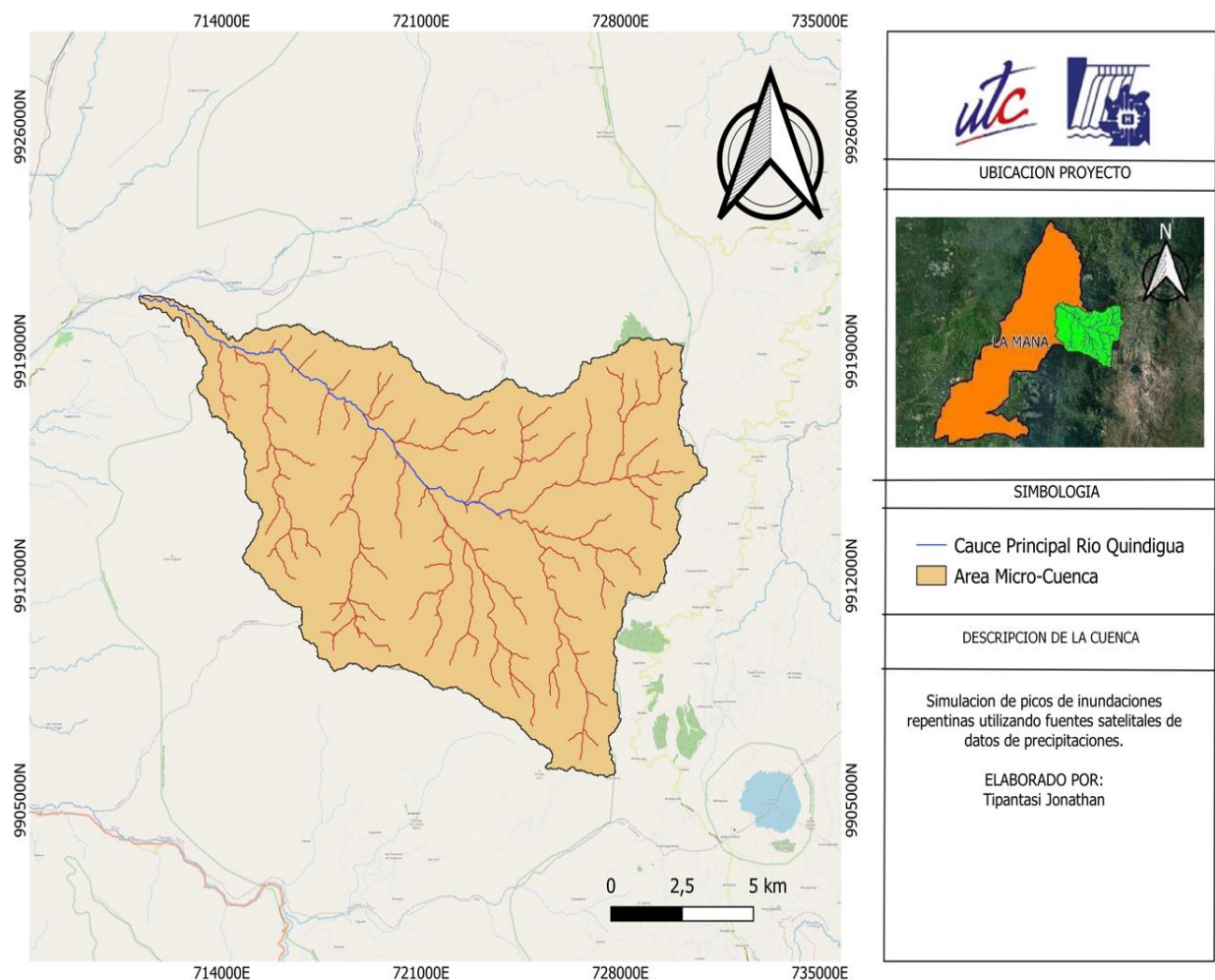


Figura 5.1. Mapa Delimitación

5.1.1. Área de la microcuenca (A)

La subcuenca se extiende por un área total de 154,6 km², lo que define la magnitud de la región de estudio.

5.1.2. Perímetro de la subcuenca (P)

El perímetro de la microcuenca es de 88,93 km, indicando la longitud total de sus bordes exteriores.

5.1.3. Longitud axial (La)

La longitud axial es de 22,235 km, reflejando la distancia máxima a lo largo del eje principal de la cuenca y proporcionando detalles sobre su tamaño en dirección longitudinal.

5.1.4. Longitud del cauce principal (L)

El cauce principal tiene una longitud de 17,51 km, lo que define la extensión exacta del lecho del río principal.

5.1.5. Ancho promedio (Ap)

El ancho promedio de 8,03 km mide la extensión lateral media de la subcuenca, y se calculó utilizando la ecuación (4.1):

$$Ap = \frac{154,6 \text{ km}^2}{22,23 \text{ km}}$$

$$Ap = 6,95 \text{ km}$$

5.1.6. Coeficiente de compacidad (Kc)

El coeficiente de compacidad, con un valor de 2,01, indica que la forma de la subcuenca es alargada, de acuerdo con la **Tabla 4.2**. Por tanto, este valor se calculó utilizando la ecuación (4.2).

$$Kc = \frac{88,93 \text{ km}}{2\sqrt{\pi * 154,6 \text{ km}^2}}$$

$$Kc = 2,01$$

5.1.7. Factor de forma de Horton (Rf)

Con un coeficiente de forma de 0,31, se observa que la Subcuenca tiene una forma ligeramente alargada. Este valor fue calculado usando la ecuación (4.3):

$$Kf = \frac{154,6 \text{ km}^2}{22,23^2 \text{ km}}$$

$$Kf = 0,31$$

5.2. NÚMERO DE ORDEN (NO)

El modelado de la subcuenca en QGIS permitió determinar que la red hídrica tiene un orden de cuarto. Como resultado, la Figura 5.2. muestra en detalle la distribución de esta red dentro de la subcuenca del Río Quindígua. Para definir los límites de la subcuenca, se empleará un sistema de información geográfica (SIG) que ayudará a identificar el punto de desembocadura. En este proceso, se utilizarán imágenes de elevación digital (DEM) de la NASA con una resolución de 30x30 m.

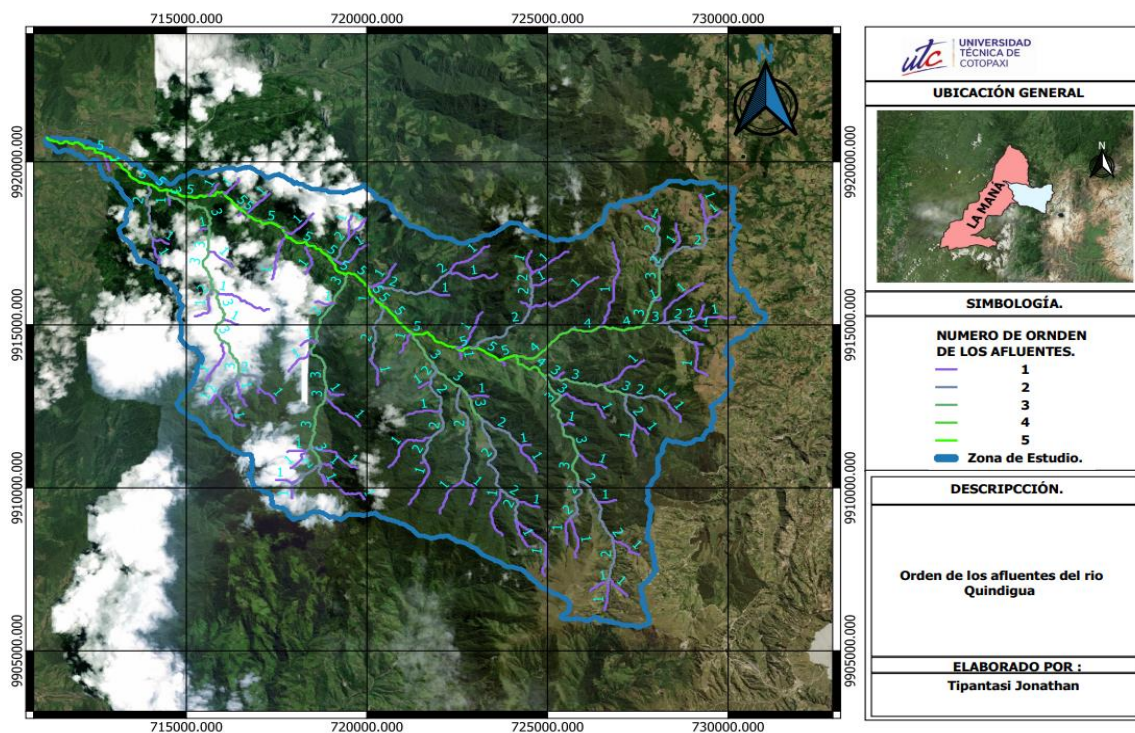


Figura 5.2. Mapa Hidrológico.

5.3.LONGITUD DE LA RED HÍDRICA (LRH)

La longitud total de la red hídrica es de 124,95 km, lo que indica la extensión global de los cursos de agua dentro de la cuenca.

5.4.PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE PRINCIPAL (J)

La pendiente media del cauce principal es de 0,16 m/m, lo que ofrece detalles sobre la inclinación específica del lecho del río principal. Este valor se calculó utilizando la ecuación (4.4) y se determinó mediante la Tabla 4.4 tiene un rango de clase moderada.

$$J = \frac{1933\text{msnm} - 713\text{msnm}}{17,51\text{ km}} * 100\%$$

$$J = 6\% \frac{m}{m} ; J = 0,06 \frac{m}{m}$$

5.5.DENSIDAD DE DRENAJE

Con una densidad de drenaje de 0,80 km/km², se establece la relación entre la longitud total de los ríos y la superficie de la subcuenca. Este valor se calculó utilizando la ecuación (4.5).

$$Dd = \frac{124,95\text{ km}}{154,6\text{ km}^2}$$

$$Dd = 0,80 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

5.6.COTA MÁXIMA Y MÍNIMA DE LA MICROCUENCA

La cota máxima de la subcuenca llega a 3960 msnm, mientras que la cota mínima es de 713 msnm. Esta diferencia proporciona información sobre la variación altimétrica

5.7.MÉTODOS SCS Y CN

5.7.1. Número de Curva (CN)

El Numero de Curva en una subcuenca es un parámetro esencial que se lo utiliza para principalmente caracterizar la capacidad de una zona específica de generar escorrentía. Para calcular el CN se utilizó el archivo Shape File (ESRI) de uso y cobertura del suelo del Ecuador proporcionado por la Universidad Del Azuay a una escala de 1:250000 tal como se muestra en la Figura 5.3, con la tabla del Anexo 1 se clasifico el grupo higrológico del suelo utilizando la ecuación (4.6) obteniendo como resultado final un Numero de Curva de 71.

$$CN = \frac{23 * 53}{10 + 0,13 * 53}$$

$$CN (III) = 7$$

5.8. TIEMPO DE CONCENTRACION

El tiempo de concentración se define como el tiempo requerido para que el agua viaje desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Para el cálculo del tiempo de concentración se utilizó ecuación de Kirpich (1940) dándonos como resultado un tiempo de concentración de 1,68 horas, este tiempo indica el período necesario para que el agua se desplace desde el punto más distante hasta el punto de desembocadura. Este valor se calculó utilizando la ecuación (4.8).

$$tc = 0.06628 * \left(\frac{L}{\sqrt{0.25}} \right)^{0.77}$$

$$tc = 1.68 \text{ h}$$

5.9. TIEMPO DE RETRASO

El tiempo de retraso es el período que transcurre desde el inicio de la lluvia hasta que la precipitación máxima alcanza el punto de interés. Un tiempo de retraso de 1,01 horas sugiere un retardo en la respuesta de la cuenca al evento de lluvia. Este valor se calculó utilizando la ecuación (4.9).

$$tr = 0,6 * 1,68$$

$$tr = 1.01 \text{ (horas)}$$

$$tr = 60,32 \text{ (minutos)}$$

5.10. DURACION DE EXCESO

Un valor de 1,68 horas para la duración en exceso indica el período durante el cual el evento de lluvia produce una esorrentía significativa, se calculó utilizando la ecuación (4.10).

$$de = tc$$

$$de = 1,68 \text{ (horas)}$$

5.11. TIEMPO PICO

El tiempo pico se refiere al momento en que se alcanza el caudal máximo. En este caso, el pico se produce 1,84 horas después del inicio del evento de lluvia, por ende, el valor se obtuvo con la ecuación (4.11).

$$tp = 1,01 + \frac{1,68}{2}$$

$$tp = 1,84 \text{ (horas)}$$

5.12. TIEMPO BASE

El tiempo base es la duración del flujo de base, que representa el caudal constante de la cuenca no influenciado por la lluvia. Con un tiempo base de 4,91 horas, se indica la duración del flujo constante antes y después del evento de lluvia. Este valor se calculó utilizando la ecuación (4.12).

$$tb = 2,67 * 1,84$$

$$tb = 4,91 \text{ (horas)}$$

5.13. CAUDAL PICO UNITARIO

El caudal pico unitario es la tasa máxima de flujo de agua registrada en un punto específico durante un evento de lluvia. En este análisis, el caudal pico alcanzó un valor de 174,48 m³/s * cm. Este resultado fue obtenido aplicando la ecuación (4.13).

$$qp = \frac{0,208 * 154,6 \text{ km}^2}{4,91 \text{ h}}$$

$$qp = 174,48 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s} * \text{cm}} \right]$$

5.14. METODO RACIONAL ABSTRACCIONES

Basándonos en el mapa de zonificaciones, se identificó que la subcuenca del Río Quindigua se encuentra en el rango de zonificación número 66. Este rango utiliza la ecuación para calcular las intensidades máximas y las intensidades diarias para diferentes tiempos de retorno en la estación M0362 “Las Pampas”. De acuerdo con este método, para un tiempo de retorno de 5 años, la intensidad es de 23,08 mm/h y la precipitación en exceso es de 0,26 cm. En contraste,

para un tiempo de retorno de 100 años, la intensidad alcanza 30,23 mm/h y la precipitación en exceso es de 0,67 cm.

Tabla 5.2 Resultados Intensidades Y precipitaciones.

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDAD
Intensidad Tr:5 años	23,08	mm/h
Intensidad Tr:10 años	24,99	mm/h
Intensidad Tr:25 años	27,20	mm/h
Intensidad Tr:50 años	28,75	mm/h
Intensidad Tr:100 años	30,23	mm/h
Pe:5 años	0,26	cm
Pe:10 años	0,36	cm
Pe:25 años	0,48	cm
Pe:50 años	0,57	cm
Pe:100 años	0,67	cm

5.15. CAUDAL PICO TIEMPOS DE RETORNO

El análisis de los caudales pico para diversos tiempos de retorno calculado con la ecuación (4.19) muestra un claro aumento en la magnitud de los eventos hidrológicos extremos a medida que se prolonga el tiempo de retorno. En particular, el caudal pico, que representa el flujo máximo de agua en un río o canal específico, varía de 61,01 m³/s para un tiempo de retorno de 5 años a 116,39 m³/s para un tiempo de retorno de 100 años. Este patrón de incremento revela una relación directa entre la frecuencia de los eventos extremos y el caudal asociado, lo cual es crucial para la gestión del riesgo de inundaciones. Por lo tanto, estos datos son esenciales para la planificación y toma de decisiones en la gestión del agua, ya que aseguran una adecuada preparación y resiliencia frente a eventos hidrológicos de diversas magnitudes.

Tabla 5.3. Caudales picos

PARÁMETROS	RESULTADOS	UNIDAD
Caudal pico: 5 años	46,01	m ³ /s
Caudal pico: 10 años	62,35	m ³ /s
Caudal pico: 25 años	83,66	m ³ /s
Caudal pico: 50 años	100,03	m ³ /s
Caudal pico: 100 años	116,67	m ³ /s

5.16. CURVAS DE INTENSIDAD-DURACION-FRECUENCIA

Para la elaboración de las curvas IDF se seleccionó los datos satelitales TRMM de un área aproximada a la zona de estudio y la ubicación de la misma. Para la obtención de las curvas IDF de la Tabla 5.4. se utilizó el Método de Gumbel el cual es un método estadístico utilizado

para modelar eventos extremos en la cual se seleccionó las precipitaciones máximas en cada año desde 1998 hasta 2019, posteriormente se aplicó se el proceso detallado en la sección de metodología la cual empieza con el cálculo de la media aplicando la ecuación (4.20), a continuación de calcula la desviación estándar aplicando la ecuación (4.21) la cual mide la dispersión de los datos alrededor de la media, con los valores anteriormente obtenidos se procedió al cálculo de los parámetros de Gumbel iniciando por el Parámetro de Escala aplicando la ecuación (4.222) y finalmente aplicando la ecuación (4.23) se obtiene el Parámetro de Ubicación el cual ajusta la distribución a los datos. Con los parámetros de escala y ubicación se procedió a aplicar la fórmula de Gumbel ecuación (4.24) para cálculo de la intensidad de precipitación para diferentes tiempos de retorno obteniendo así las curvas IDF que relacionan la intensidad de la lluvia con su duración y período de retorno.

Tabla 5.4. Curvas IDF

Curva de Intensidad-Duración-Frecuencia					
Duración minutos	Tiempo de retorno (Pr) años				
	5	10	25	50	100
5	160.26	171.87	188.52	202.17	216.81
10	104.54	112.11	122.97	131.88	141.43
15	81.42	87.32	95.78	102.71	110.15
20	68.19	73.13	80.21	86.02	92.25
30	53.11	56.96	62.48	67.00	71.85
60	34.65	37.15	40.75	43.70	46.87
120	22.60	24.24	26.58	28.51	30.57
360	11.48	12.31	13.51	14.48	15.53
1440	4.89	5.24	5.75	6.16	6.61

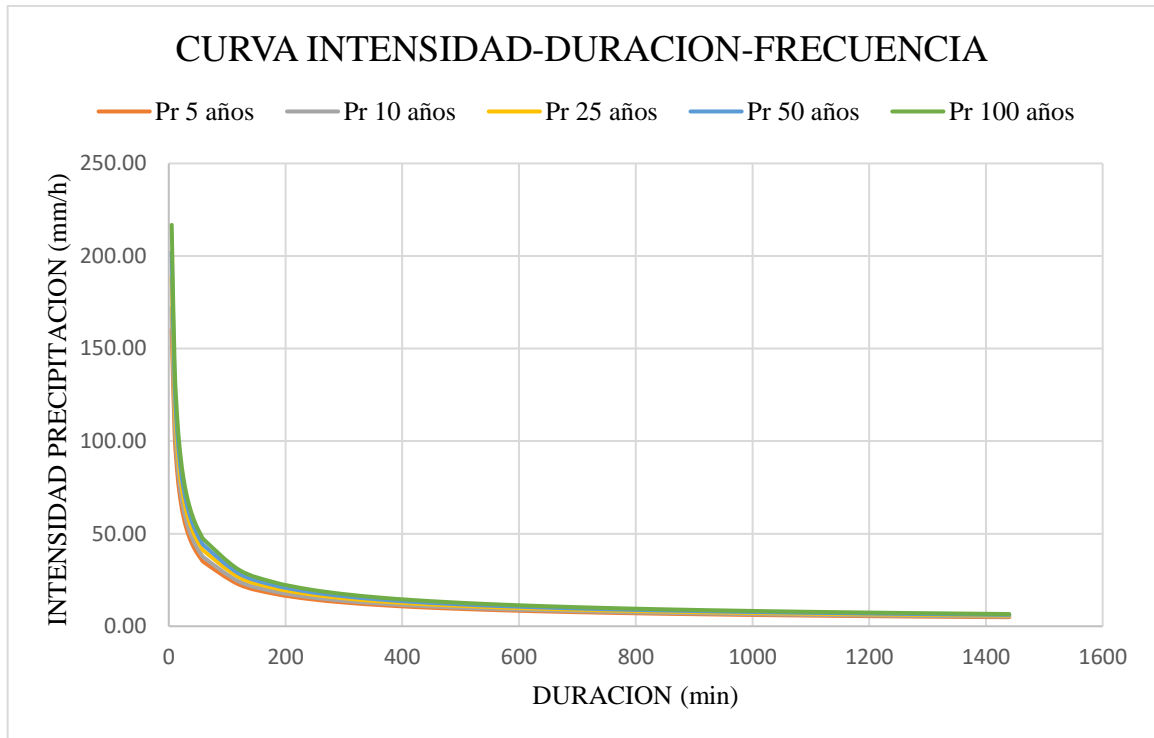


Figura 5.4. Curvas IDF Método de Gumbel

5.17. METODO DE BLOQUE ALTERNO POR ANALISIS DE REGRESION MULTIPLE

Utilizando los resultados de la curva IDF, se aplicó el método de bloque alterno para analizar las precipitaciones. Primero, se empleó el antilogaritmo para calcular la duración, el tiempo de retorno y la intensidad en un período de 24 horas. Luego, se realizó un análisis de regresión lineal en Excel para obtener las variables n , m y K . Con estas variables, se aplicó la ecuación de intensidad máxima (4.25), la cual, al considerar la duración en minutos y el tiempo de retorno, permitió determinar la precipitación acumulada e incremental.

Posteriormente, se organizó la precipitación en intervalos hora Ríos dentro de un período de 24 horas, utilizando el método de bloque alterno. Esto facilitó la elaboración del hietograma de precipitación para diferentes tiempos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años), con intervalos de tiempo sucesivos hasta completar un día. Se observó que la precipitación máxima estimada ocurre aproximadamente a la mitad (13:00) de la duración total de la precipitación, como se detalla en la Tabla 5.5. Para información adicional, consulte el Anexo II y Anexo III, donde se encuentran los valores de precipitación máxima para cada tiempo de retorno y los hietogramas de precipitación correspondientes.

Tabla 5.5. Hietogramas de Precipitación.

Hietogramas - Modelo Dyck -Peschke					
Duración	Tr = 5 años	Tr = 10 años	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
0-60	0,819	0,878	0,963	1,033	1,10
60-120	0,865	0,928	1,018	1,091	1,17
120-180	0,919	0,985	1,081	1,159	1,24
180-240	0,982	1,053	1,155	1,239	1,32
240-300	1,059	1,135	1,245	1,335	1,43
300-360	1,153	1,236	1,356	1,454	1,56
360-420	1,273	1,365	1,497	1,605	1,72
420-480	1,432	1,536	1,684	1,806	1,93
480-540	1,657	1,777	1,949	2,090	2,24
540-600	2,007	2,153	2,361	2,532	2,71
600-660	2,658	2,850	3,126	3,353	3,59
660-720	4,552	4,882	5,355	5,743	6,15
720-780	14,945	16,527	17,579	18,853	20,21
780-840	3,281	3,519	3,860	4,139	4,43
840-900	2,273	2,438	2,674	2,868	3,07
900-960	1,810	1,941	2,129	2,284	2,44
960-1020	1,534	1,645	1,804	1,935	2,07
1020-1080	1,346	1,444	1,583	1,698	1,82
1080-1140	1,209	1,296	1,422	1,525	1,63
1140-1200	1,103	1,183	1,298	1,392	1,49
1200-1260	1,019	1,092	1,198	1,285	1,37
1260-1320	0,949	1,018	1,117	1,197	1,28
1320-1380	0,891	0,956	1,048	1,124	1,20
1380-1440	0,841	0,902	0,990	1,061	1,13

5.18. MODELACION SOFTWARE HEC-HMS

5.18.1. Parámetros utilizados en la modelación

Tabla 5.6. Parámetros modelación.

DETALLE	UNIDADES	DATOS	OBSERVACIONES
Área	Km ²	154,60	-
Número de Curva	Adimensional	71	-
Tiempo de retraso	Minutos	60,32	-
Caudal base	m ³ /s	33,75	Ecuación Manning (1889)
Hietograma	mm	Tabla 5.5	Para diferentes TR

El coeficiente de rugosidad de Manning se calculó utilizando la ecuación (4.29), y las variables n y m se basaron en la Tabla 3.2. Para determinar estos coeficientes se analizó varios factores del Río entre los cuales están el lecho del Río (rocas, gravas, vegetación) además de las curvas pronunciadas o sinuosidad al largo del Río. El cálculo del coeficiente se expresa así:

$$n = (0,025 + 0,010 + 0,010 + 0,020 + 0,01) * 1,15$$

$$n = 0.075$$

Para calcular el caudal base, se consideró el promedio de tres secciones transversales dando un valor caudal de 20 m³/s y se estimó la altura de la lámina de agua en la parte inicial del Río de 1,5 metros en la parte media del Río una altura de 0,5 metros y en la parte final del Río de 0,35 metros. Estos valores se reducen tomando en cuenta que el Río va cambiando de forma durante su longitud mientras más cerca del punto de salida de la cuenca, el Río adquiere un valor más ancho por ende la altura de la lámina de agua disminuye. Se utilizó el coeficiente de Manning calculado, el área y perímetro hidráulico promediados de las tres secciones transversales en la ecuación (4.30) de la siguiente manera:

$$Q = \frac{1}{0,075} * 9,04 * 0,45^{3/4} * 0,06^{1/2}$$

$$Q = 17,33 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.18.2. Geometría del modelo en HEC-HMS

La Figura 5.5 muestra la geometría del modelo para la subcuenca del río Quindíagua, destacando las ubicaciones de entrada y salida del flujo. Los detalles específicos de la geometría, incluidos los puntos de entrada y salida, están descritos en la Tabla 5.6.

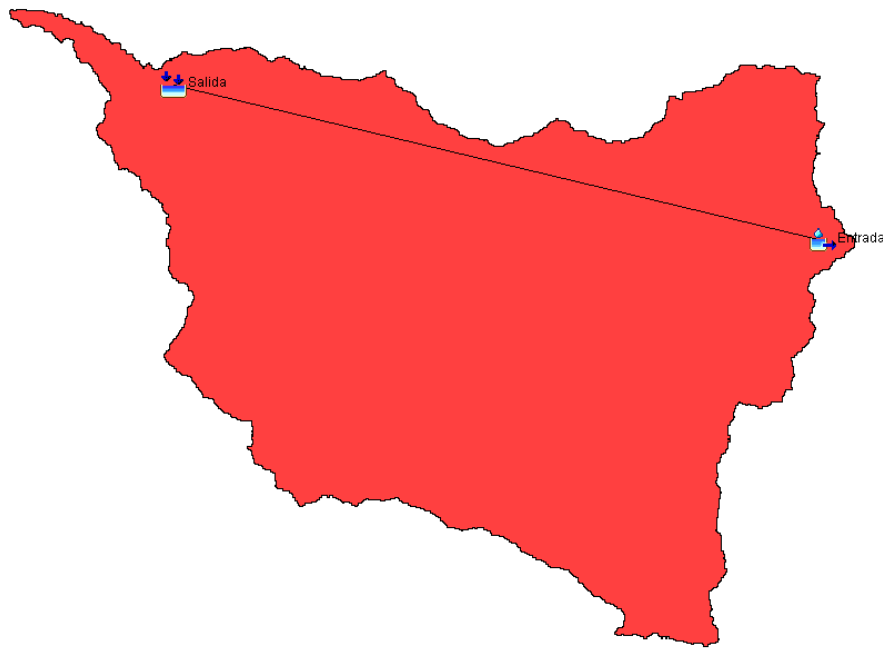
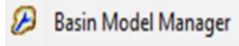








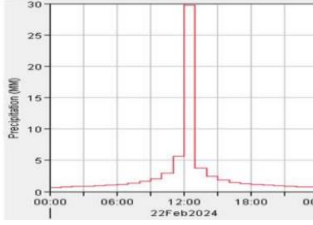


Figura 5.5. Geometría subcuenca HEC-HMS

5.18.3. Procedimiento modelación software HEC-HMS

La Tabla 5.6 presenta los componentes clave necesarios para la modelación en HEC-HMS, incluyendo las actividades y detalles específicos requeridos para la obtención del hidrograma de precipitación. Esta tabla proporciona una guía clara para la implementación del modelo, asegurando que cada aspecto del proceso de modelación esté adecuadamente cubierto.

Tabla 5.7. Guía modelación HEC-HMS

Nº	Componente	Actividad	Observación
1	Modelo de la cuenca (Basin Model)	Capa de la subcuenca.	
		Herramienta para la creación de la subcuenca (entrada)	

		Herramienta para la creación del aforo (salida)	
2	Modelo Meteorológico	Gestor de modelos meteorológicos	 Meteorologic Model Manager
			 Specified Hyetograph
3	Control de especificaciones	Control	 Control Specifications Manager
4	Dato de series temporales	Hidrograma	 Time-Series Data Manager
			
5	Crear computo	Ejecución de simulación	
6	Resultados	Ver hidrograma	

5.18.4. Hidrograma de precipitación TR 5 años

El análisis del hidrograma presentado en la Figura 5.6 para un tiempo de retorno de 5 años y un período de 24 horas muestra que, hasta el mediodía, se infiltró un flujo aproximado de 15 mm. Este flujo superó la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, resultando en escurrimiento a partir de las 12:00 horas, con un volumen de exceso de 6,66 mm.

Por otro lado, según la Figura 5.7, la descarga máxima registrada fue de 60,9 m³/s durante un período de precipitación de 48 horas. Aunque el volumen total de precipitación alcanzó 50,58 mm, se observó una pérdida considerable de volumen, que fue de 43,92 mm.

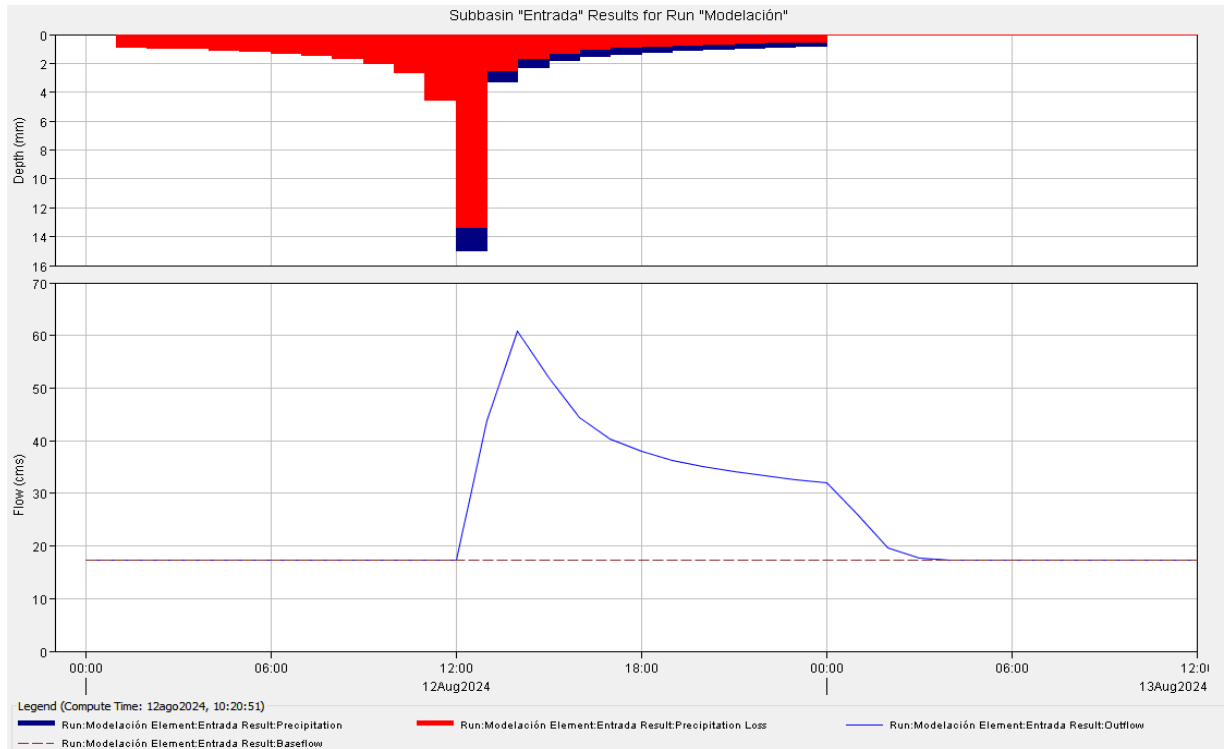


Figura 5.6. Hidrograma Tr 5 años.

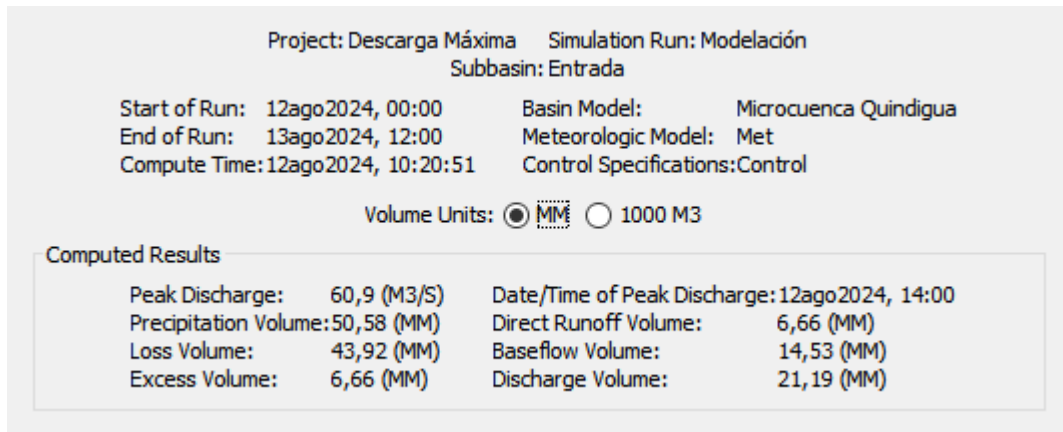


Figura 5.7. Resultados TR 5 años.

5.18.5. Hidrograma de Precipitación TR 10 Años

El análisis del hidrograma mostrado en la Figura 5.8 para un tiempo de retorno de 10 años, considerando un período de 24 horas, indica que hasta el mediodía se infiltró un flujo de aproximadamente 14,5 mm. Este valor superó la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, lo que provocó que el exceso se convirtiera en escurrimiento a partir de las 12:00 horas, generando un volumen de exceso de 9,39 mm.

En la Figura 5.9 se observa que la descarga máxima alcanzó 77,7 m³/s durante un período de precipitación de 48 horas. Aunque el volumen total de precipitación fue de 54,74 mm, se registró una pérdida significativa de volumen, con 46,35 mm no retenidos.

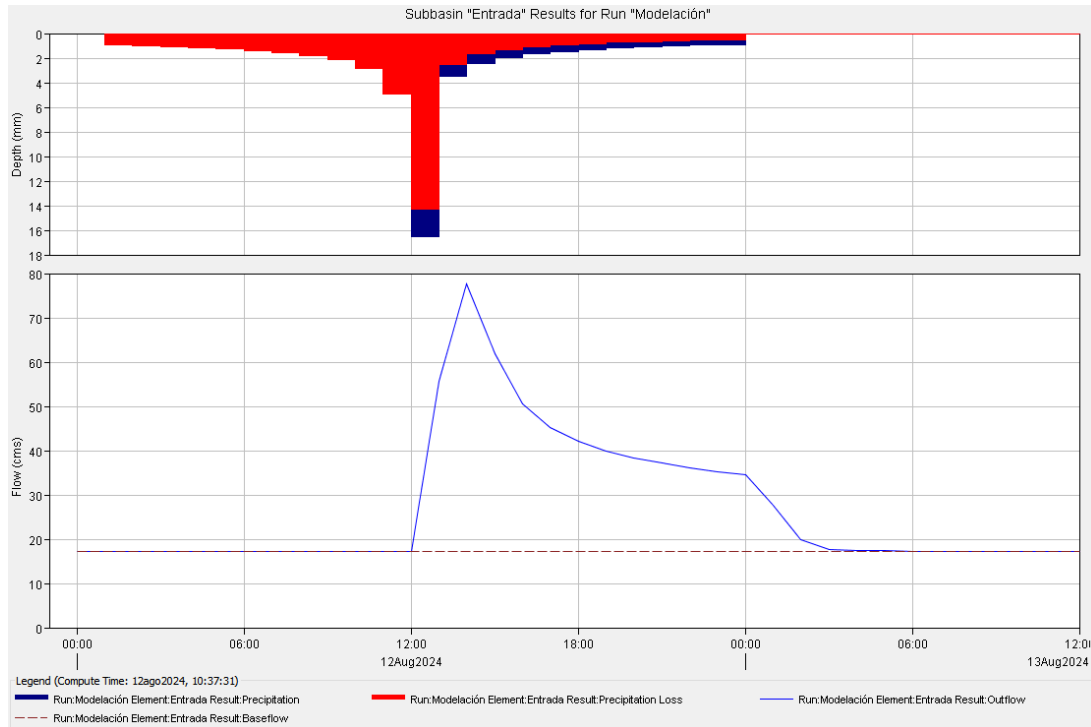


Figura 5.8. Hidrograma Tr 10 años.

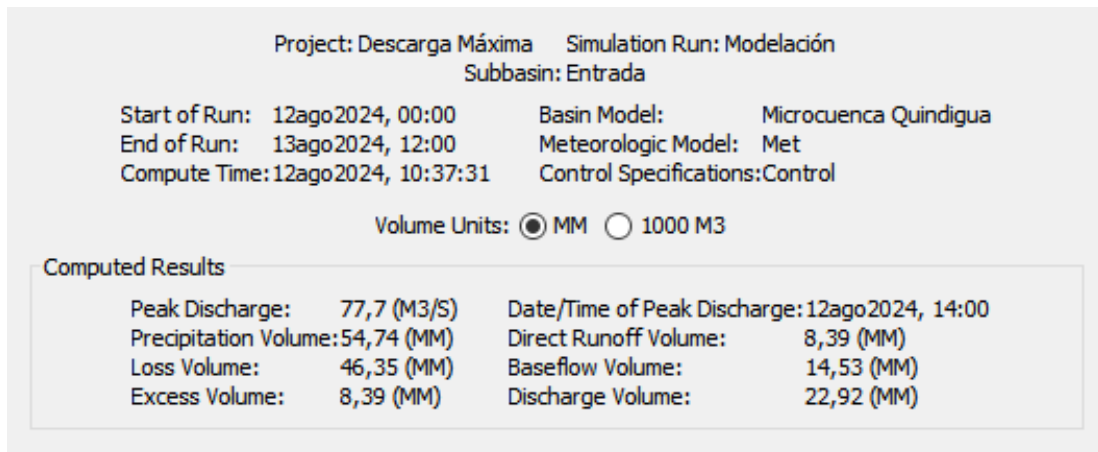


Figura 5.9. Resultados TR 10 años.

5.18.6. Hidrograma de Precipitación TR 25 Años

El análisis del hidrograma en la Figura 5.10 para un tiempo de retorno de 25 años, durante un período de 24 horas, indica que se infiltraron aproximadamente 15 mm hasta el mediodía. Este volumen excedió la capacidad máxima de almacenamiento del suelo, provocando que el escurrimiento se iniciara a partir de las 12:00 horas, con un volumen de exceso de 10,53 mm.

Además, la Figura 5.11 muestra que la descarga máxima fue de 97,4 m³/s en un período de precipitación de 48 horas. Aunque se registró un volumen total de precipitación de 59,49 mm, se produjo una pérdida de volumen significativa, con 48,96 mm no retenidos.

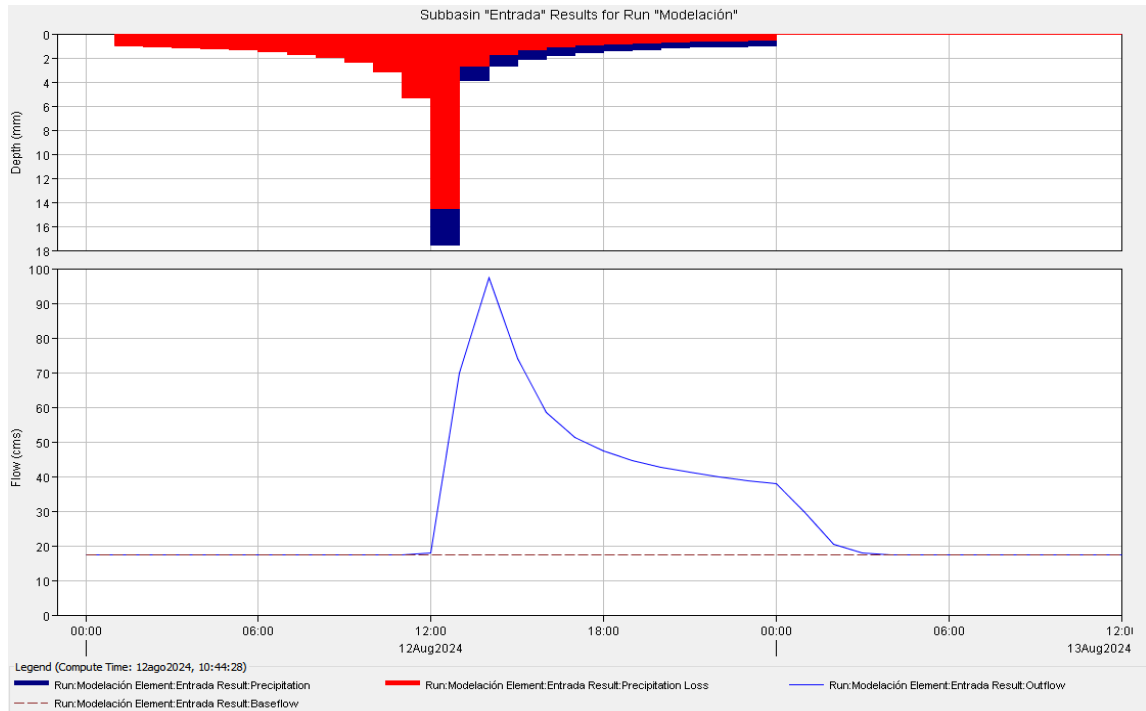


Figura 5.10. Hidrograma Tr 25 años.

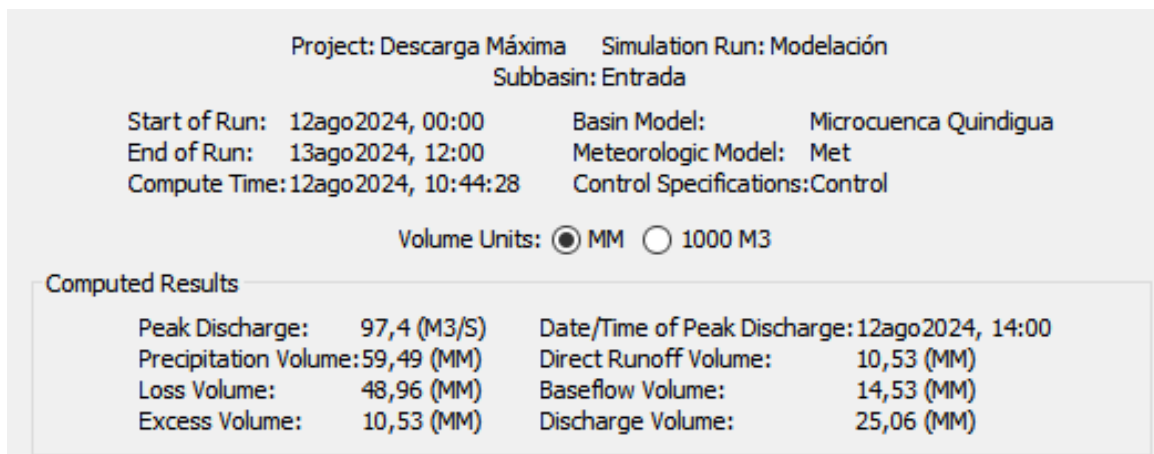


Figura 5.11. Resultados TR 25 años.

5.18.7. Hidrograma Precipitación TR de 50 Años

El análisis hidrológico de la Figura 5.12, correspondiente a un tiempo de retorno de 50 años y un período de 24 horas, indica que hasta el mediodía se infiltraron aproximadamente 15 mm. Este volumen excedió la capacidad de almacenamiento del suelo, lo que resultó en escurrimiento a partir de las 12:00 horas, con un volumen de exceso de 12,63 mm.

En la Figura 5.13 se observa que la descarga máxima durante un período de precipitación de 48 horas alcanzó 117,4 m³/s. A pesar de un volumen total de precipitación de 63,80 mm, se produjo una pérdida significativa de 51,18 mm.

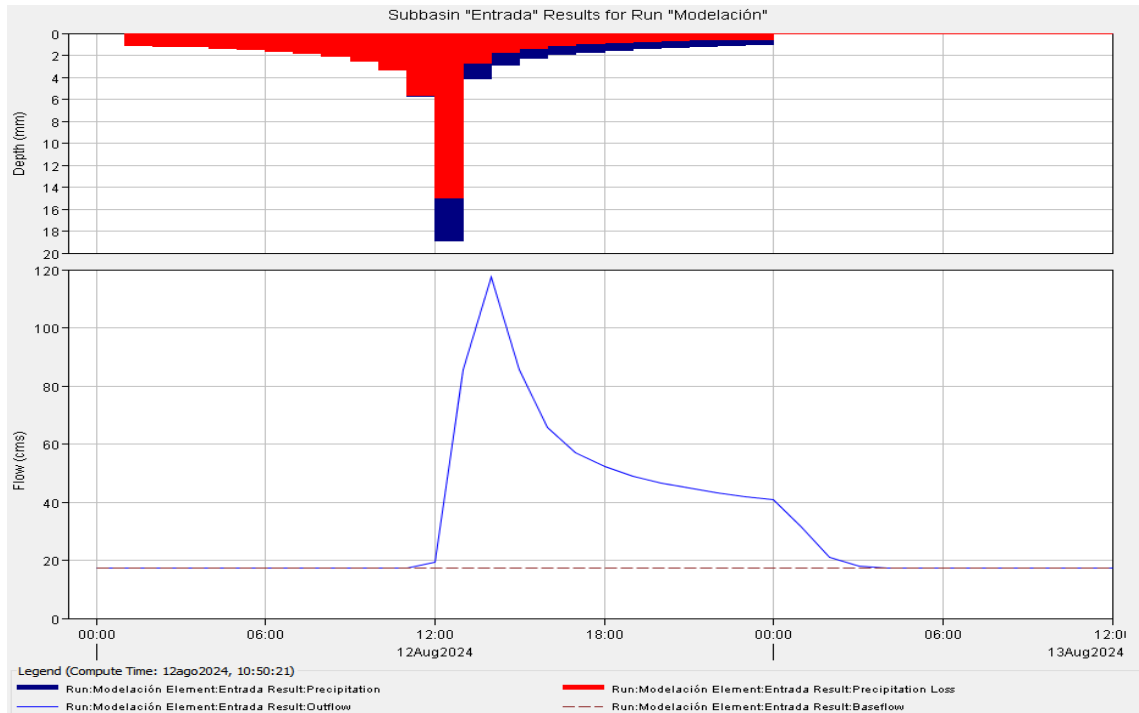


Figura 5.12. Hidrograma Tr 50 años.

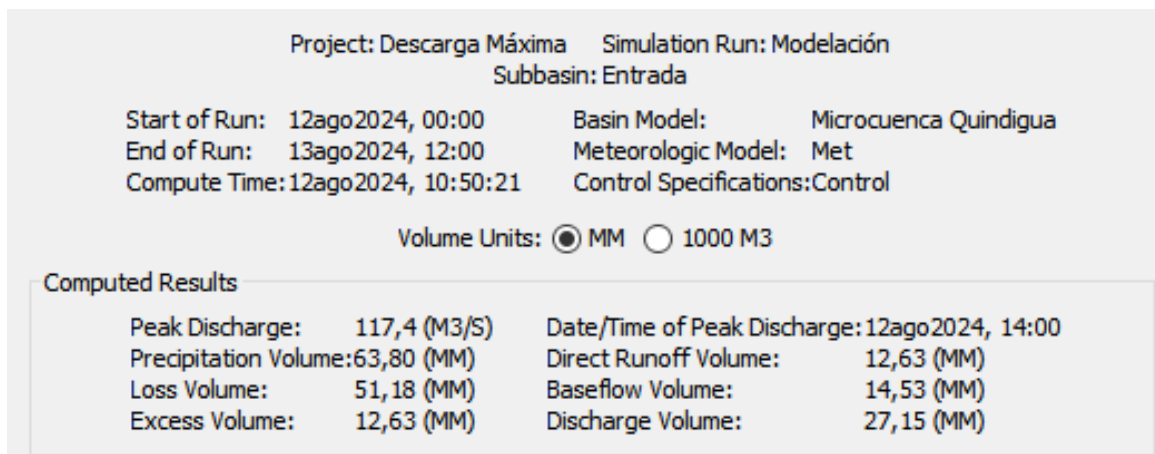


Figura 5.13. Resultados TR 50 años.

5.18.8. Hidrograma Precipitación TR 100 Años

En la Figura 5.14 se detalla el hidrograma correspondiente a un tiempo de retorno de 100 años durante un intervalo de 24 horas. Los resultados indican que, hasta el mediodía, se infiltraron aproximadamente 16 mm. Este volumen superó la capacidad de retención del suelo, provocando escurrimiento a partir de las 12:00 horas y resultando en un volumen de exceso de 14,50 mm.

Por otro lado, la Figura 5.15 muestra que la máxima descarga durante un período de precipitación de 48 horas alcanzó 137,1 m³/s. Aunque el volumen total de precipitación fue de 67,45 mm, se registró una pérdida considerable de 52,95 mm.

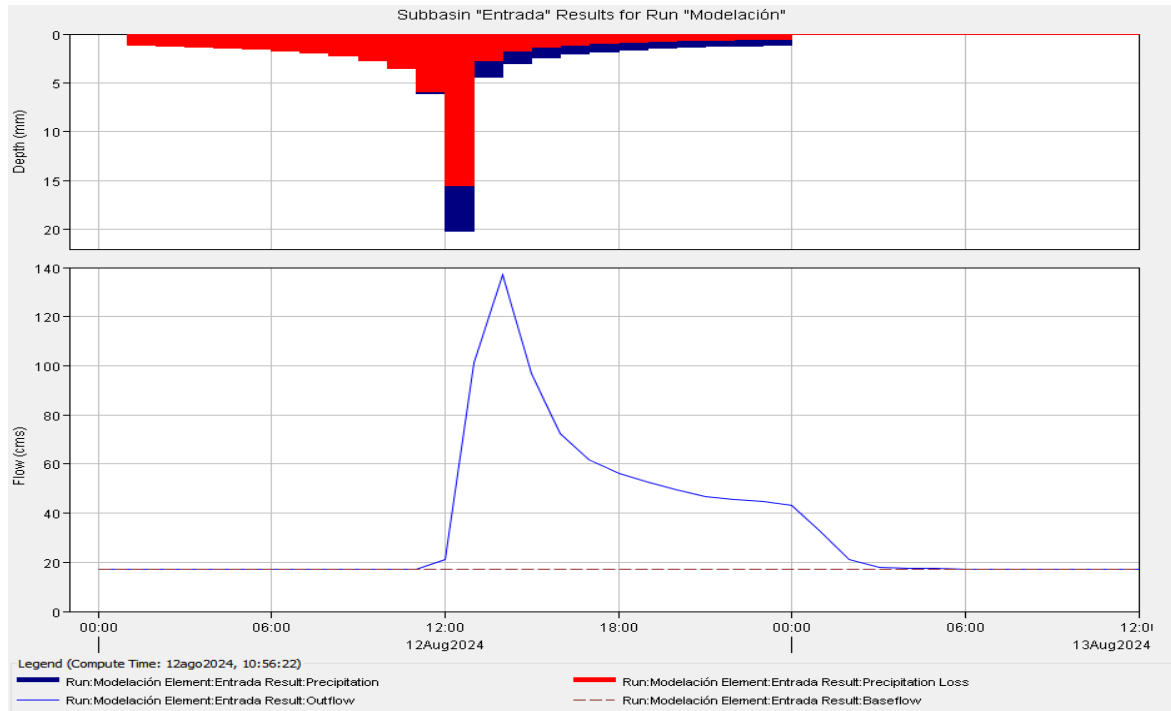


Figura 5.14. Hidrograma Tr 100 años.

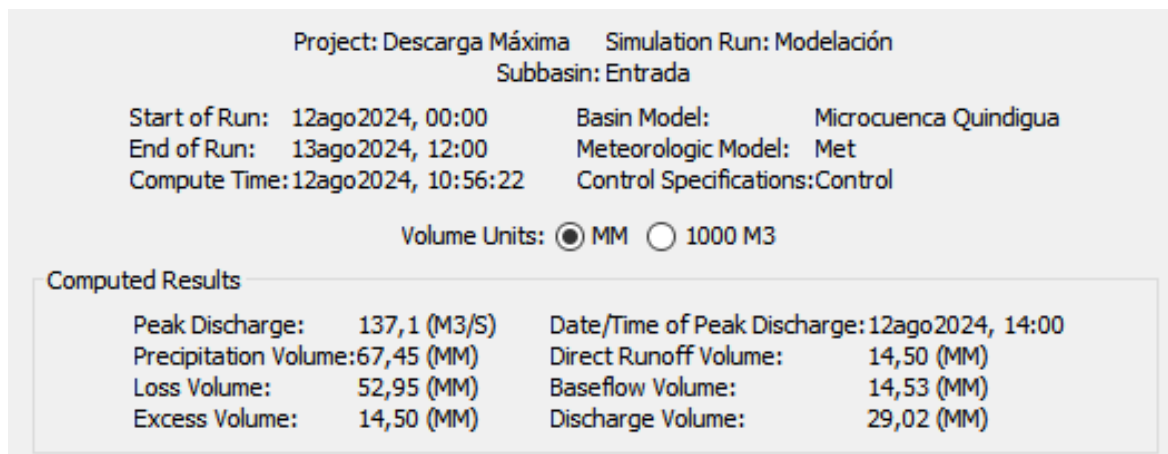


Figura 5.15. Resultados TR 100 años.

5.19. RESULTADOS CAUDALES PICO SCS-CN Y HEC-HMS

La Tabla 3.14 presenta una comparación entre los caudales pico calculados mediante los métodos SCS-CN y HEC-HMS para la subcuenca del río Quindigua, considerando un tiempo de retraso (tr) de 152 minutos. Se observa que, para un tiempo de retorno de 50 años, el programa HEC-HMS estima caudales picos menores en comparación con los obtenidos por el método SCS-CN. Ambos métodos incluyen un caudal base de 12 m³/s en sus cálculos.

Tabla 5.8. Resultados caudales pico

Tiempo de Retorno (TR)	Tiempo de retraso (tr)	Caudal Pico SCS-CN	Caudal Pico Hec-Hms	Error
Años	min	m3/s	m3/s	%

5	60,32	63,34	60,90	3,85
10	60,32	79,68	77,7	2,48
25	60,32	100,99	97,40	3,55
50	60,32	117,36	117,40	0,03
100	60,32	134,00	137,10	2,31


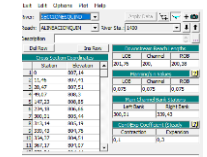
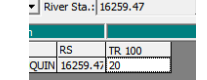
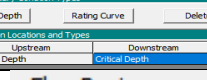
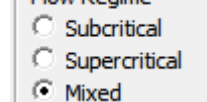
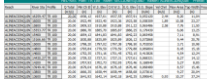
El análisis muestra que el margen de error en los resultados del método SCS-CN en relación con los del HEC-HMS es generalmente aceptable. En particular, para un tiempo de retorno de 50 años, el margen de error es mínimo, con una diferencia del 0,03%. No obstante, para tiempos de retorno de 5 y 25 años, el error es más elevado, alcanzando el 3,85% y el 3,55% respectivamente. Este patrón sugiere que, aunque el método SCS-CN proporciona estimaciones razonablemente precisas en comparación con HEC-HMS, las discrepancias aumentan con el tiempo de retorno, lo que puede ser relevante para la evaluación de riesgos y la planificación de la gestión del agua.

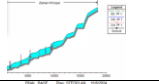
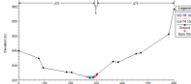
5.20. SIMULACION NICELES MAXIMOS HEC-RAS

5.20.1. Procedimiento para la simulación en HEC-RAS

La Tabla 3.16 detalla los componentes principales necesarios para simular las descargas máximas en distintos tiempos de retorno, como se presenta en la Tabla 3.15. Estos componentes incluyen las actividades específicas y los detalles necesarios para obtener los niveles máximos de crecidas en el modelo HEC-RAS.

Tabla 5.9. Resultados caudales pico

N°	Componente	Actividad	Observación
1	Datos de Geometría	Trazado del Río	
		Datos secciones transversales	
2	Flujo Permanente	Numero de perfiles	
		Condiciones de Alcance	
3	Análisis de flujo permanente	Régimen de Flujo	
4	Resultados	Tabla de resultados	

		Perfiles de Flujo	
		Secciones Transversales	

5.20.2. Niveles máximos de crecida TR 5 años

En la simulación de crecidas para un tiempo de retorno de 5 años, se observaron diferentes niveles en las secciones transversales del río Quindúgua, como se detalla a continuación:

- **Sección Transversal 1 (Figura 5.16):** La altura de la lámina de agua (WS) se encuentra aproximadamente a la cota de 1642,51 msnm, mientras que la cota del calado crítico (Crit) es de 1642,51 msnm. La altura de la línea de energía es de 1642,74 msnm.

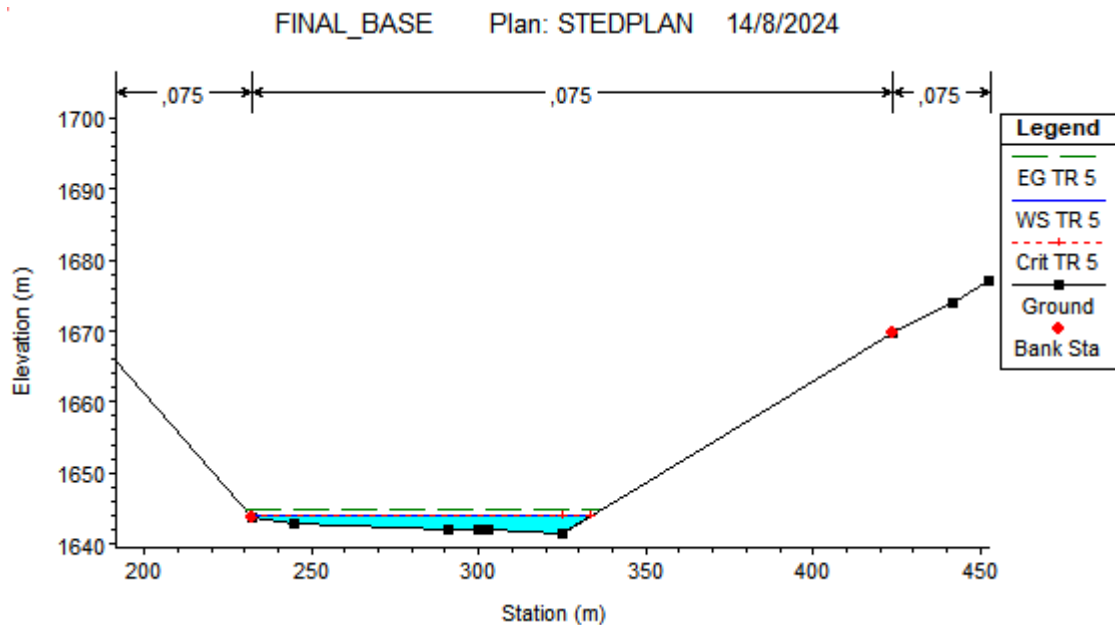


Figura 5.16. Nivel máximo de crecida TR 5 años sección 1.

- **Sección Transversal 2 (Figura 5.17):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 1082,79 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 1082,79 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 1083,02 msnm.

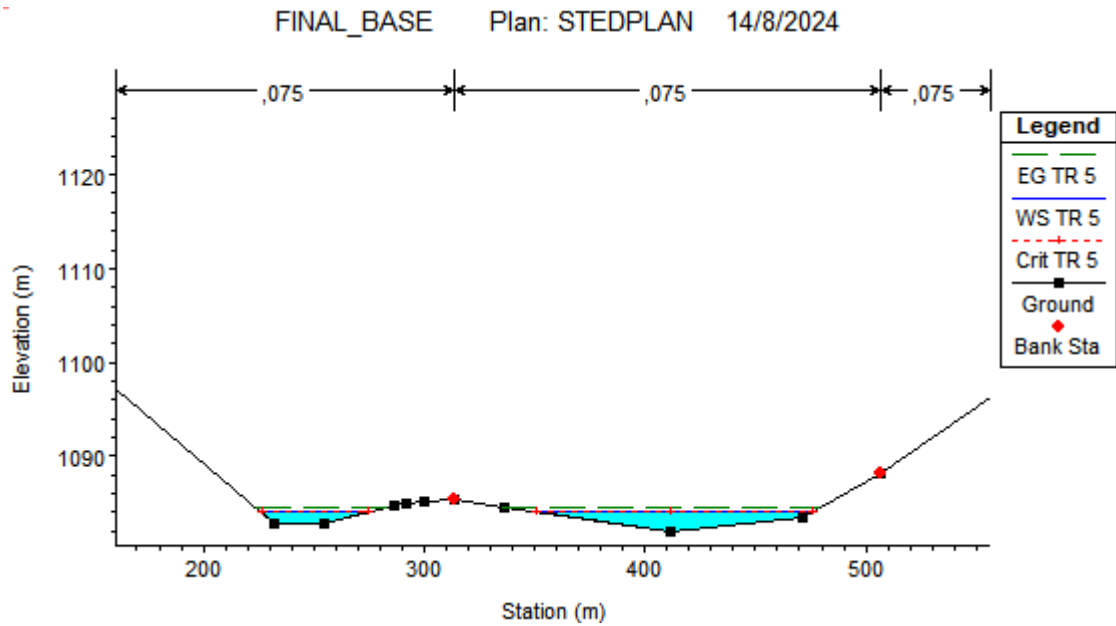


Figura 5.17. Nivel máximo de crecida TR 5 años sección 2.

- **Sección Transversal 3 (Figura 5.18):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 961,49 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 961,49 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 961,64 msnm.

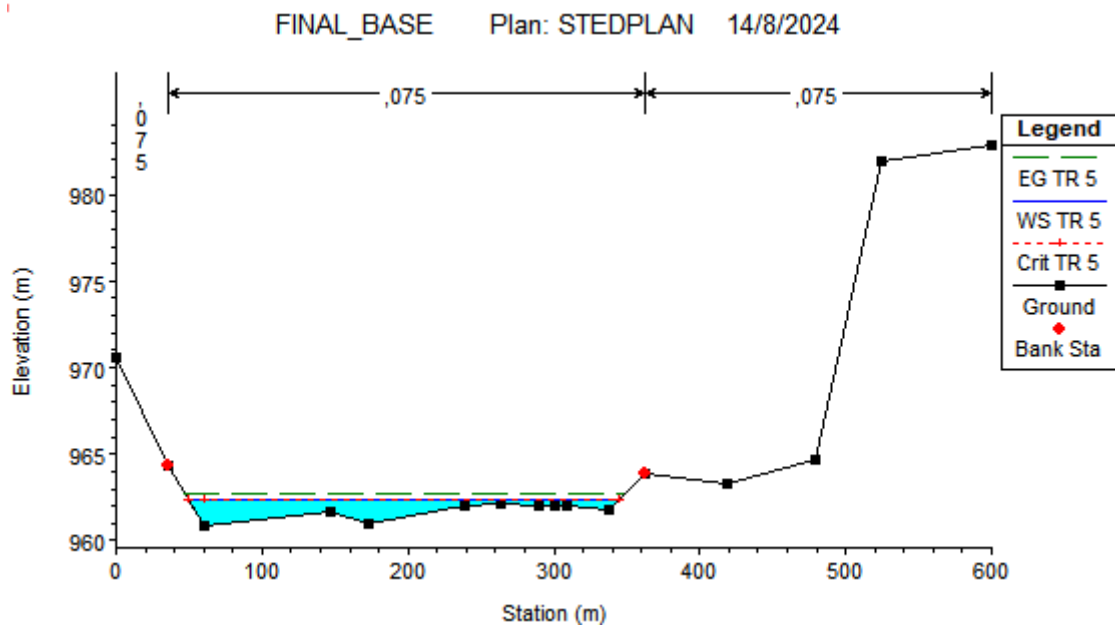


Figura 5.18. Nivel máximo de crecida TR 5 años sección 3.

Además, el coeficiente de rugosidad de Manning utilizado es de 0,075. En cuanto a las velocidades y los números de Froude en las secciones:

- En la **Sección Transversal 1**, la velocidad es de 2,11 m/s y el número de Froude es de 0,99, lo que indica un flujo subcrítico.
- En la **Sección Transversal 2**, la velocidad es de 2,14 m/s y el número de Froude es de 1,02, señalando un flujo supercrítico.
- En la **Sección Transversal 3**, la velocidad es de 1,69 m/s y el número de Froude es de 1,01, señalando un flujo supercrítico.

5.20.3. Niveles máximos de crecida TR 10 años

En la simulación de crecidas para un tiempo de retorno de 10 años, se observaron diferentes niveles en las secciones transversales del río Quindígua, como se detalla a continuación:

- **Sección Transversal 1 (Figura 5.19):** La altura de la lámina de agua (WS) se encuentra aproximadamente a la cota de 1642,61 msnm, mientras que la cota del calado crítico (Crit) es de 1642,61 msnm. La altura de la línea de energía es de 1642,86 msnm.

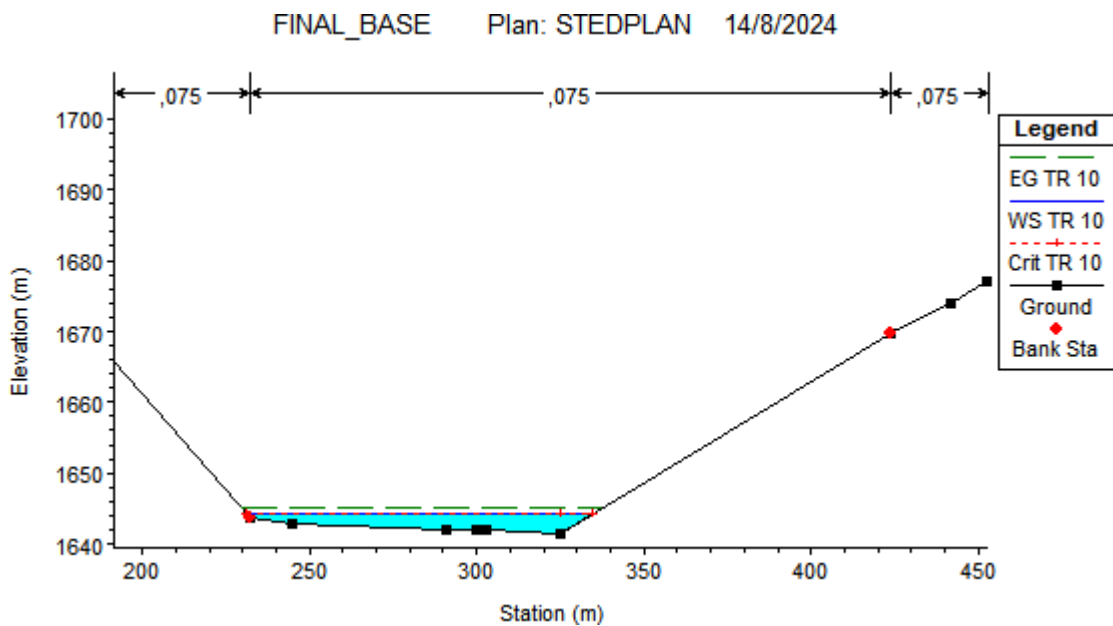


Figura 5.19. Nivel máximo de crecida TR 10 años sección 1.

- **Sección Transversal 2 (Figura 5.20):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 1082,91 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 1082,91 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 1083,13 msnm.

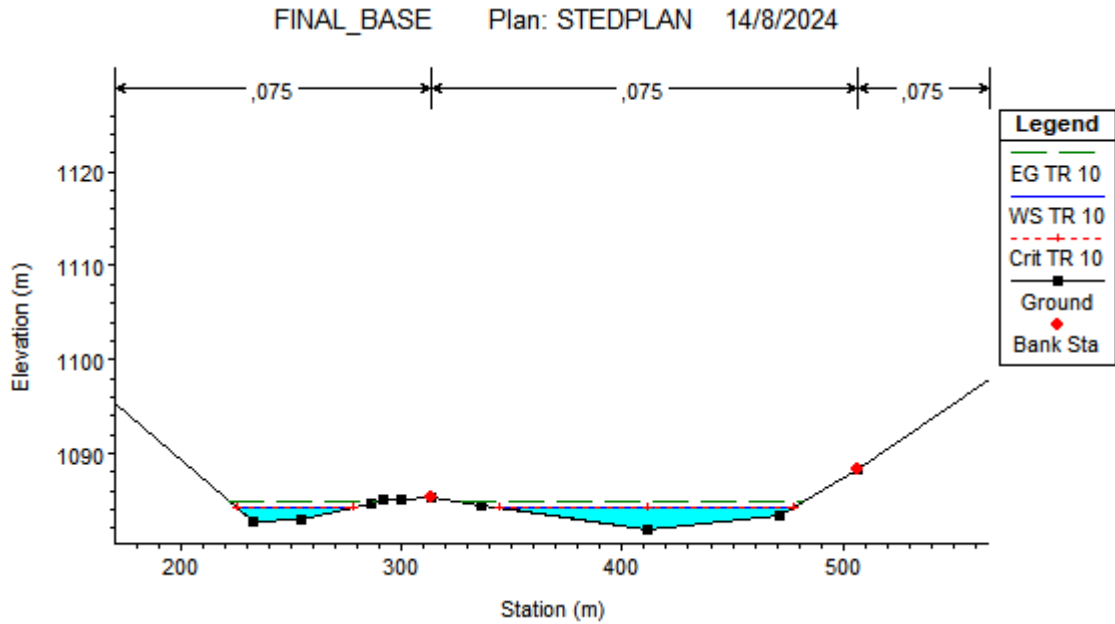


Figura 5.20. Nivel máximo de crecida TR 10 años sección 2.

- **Sección Transversal 3 (Figura 5.21):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 961,55 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 961,55 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 961,71 msnm.

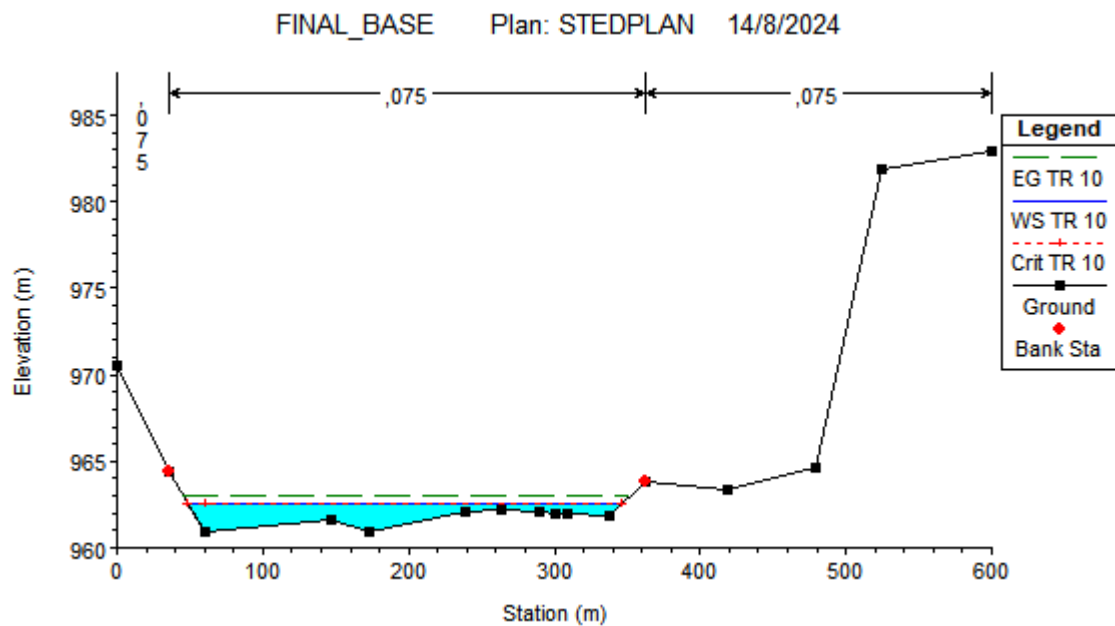


Figura 5.21. Nivel máximo de crecida TR 10 años sección 3.

Además, el coeficiente de rugosidad de Manning utilizado es de 0,075. En cuanto a las velocidades y los números de Froude en las secciones:

- En la **Sección Transversal 1**, la velocidad es de 2,21 m/s y el número de Froude es de 0,99, lo que indica un flujo subcrítico.

- En la **Sección Transversal 2**, la velocidad es de 2,09 m/s y el número de Froude es de 0,93, señalando un flujo subcrítico.
- En la **Sección Transversal 3**, la velocidad es de 1,77 m/s y el número de Froude es de 1,01, señalando un flujo supercrítico.

5.20.4. Niveles máximos de crecida TR 25 años

En la simulación de crecidas para un tiempo de retorno de 25 años, se observaron diferentes niveles en las secciones transversales del río Quindigua, como se detalla a continuación:

- **Sección Transversal 1 (Figura 5.22):** La altura de la lámina de agua (WS) se encuentra aproximadamente a la cota de 1642,69 msnm, mientras que la cota del calado crítico (Crit) es de 1642,69 msnm. La altura de la línea de energía es de 1642,98 msnm.

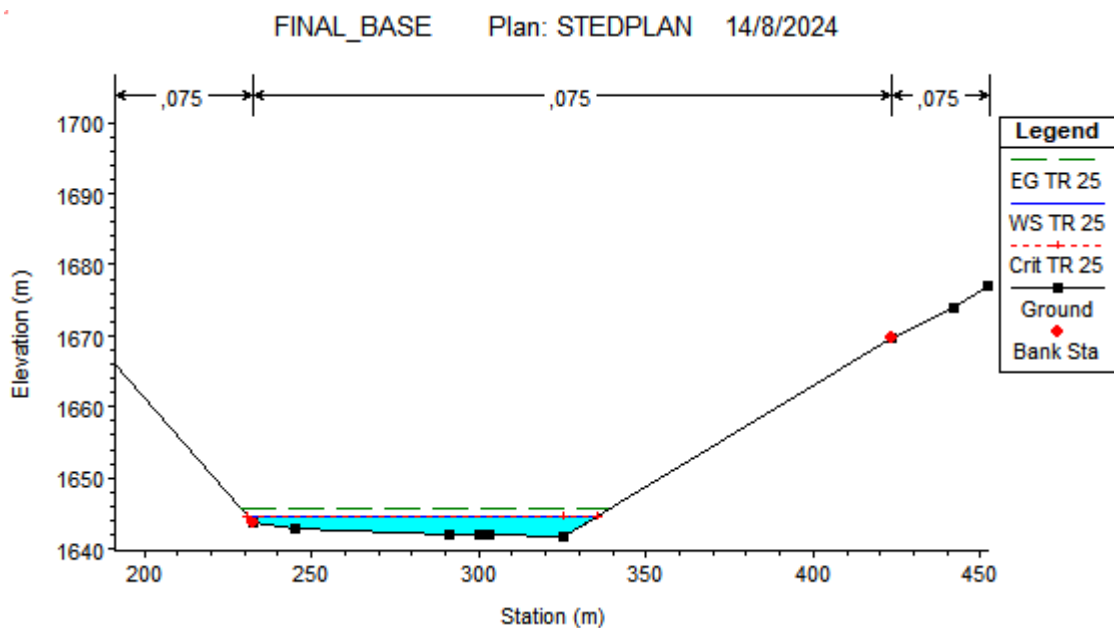


Figura 5.22. Nivel máximo de crecida TR 25 años sección 1.

- **Sección Transversal 2 (Figura 5.23):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 1083,01 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 1083,01 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 1083,23 msnm.

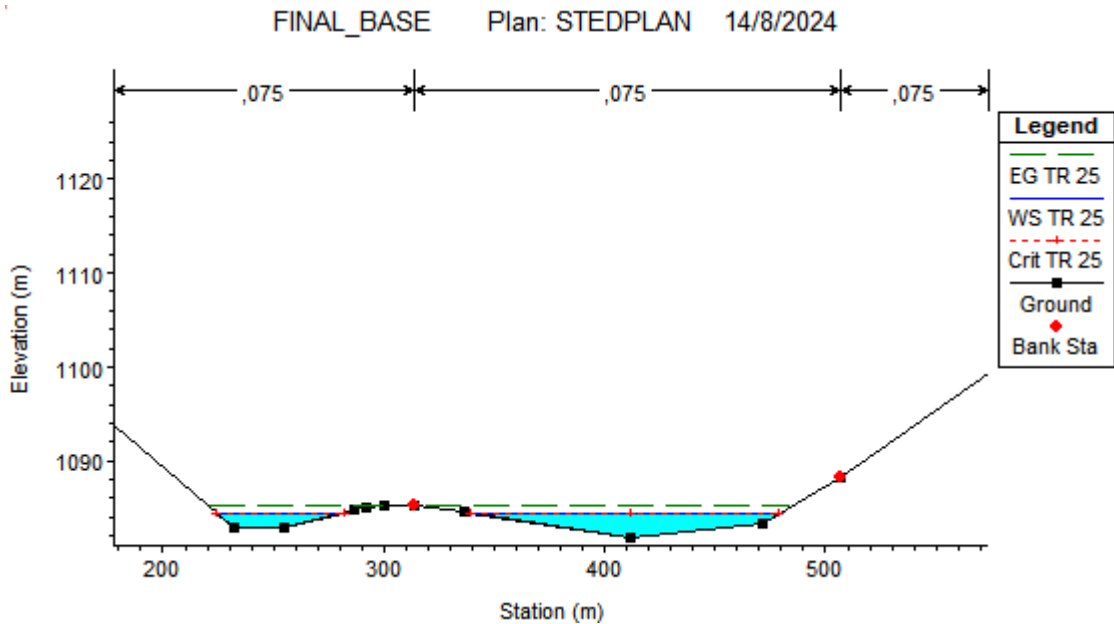


Figura 5.23. Nivel máximo de crecida TR 25 años sección 2.

- **Sección Transversal 3 (Figura 5.24):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 961,61 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 961,61 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 961,79 msnm.

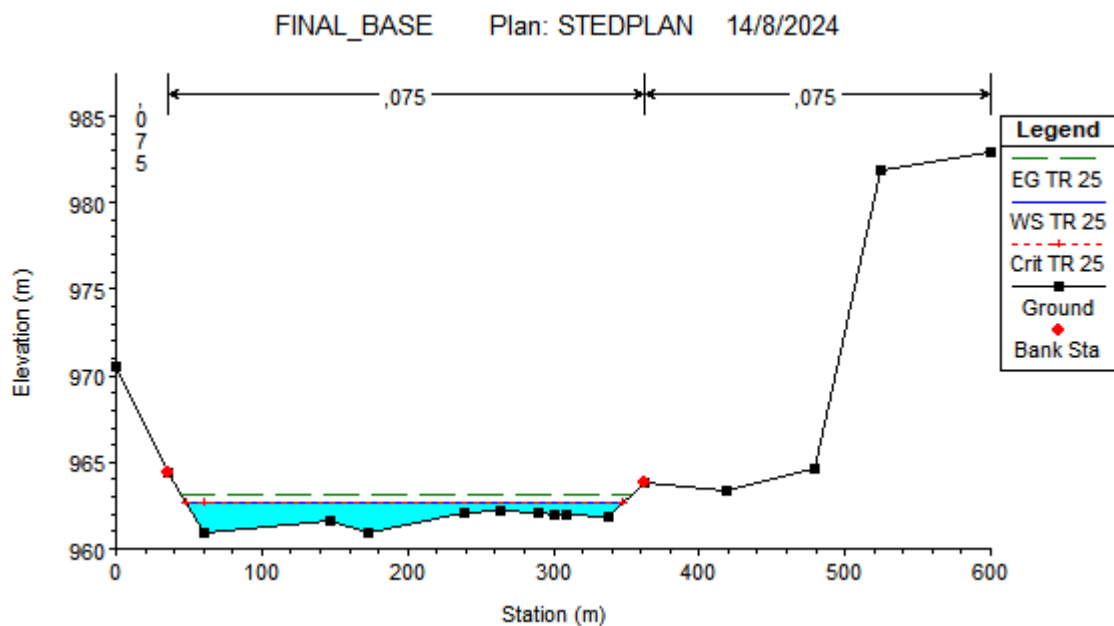


Figura 5.24. Nivel máximo de crecida TR 25 años sección 3.

Además, el coeficiente de rugosidad de Manning utilizado es de 0,075. En cuanto a las velocidades y los números de Froude en las secciones:

- En la **Sección Transversal 1**, la velocidad es de 2,36 m/s y el número de Froude es de 1,01, lo que indica un flujo supercrítico.

- En la **Sección Transversal 2**, la velocidad es de 2,13 m/s y el número de Froude es de 0,91, señalando un flujo subcrítico.
- En la **Sección Transversal 3**, la velocidad es de 1,84 m/s y el número de Froude es de 1, señalando un flujo crítico.

5.20.5. Niveles máximos de crecida TR 50 años

En la simulación de crecidas para un tiempo de retorno de 5 años, se observaron diferentes niveles en las secciones transversales del río Quindígua, como se detalla a continuación:

- **Sección Transversal 1 (Figura 5.25):** La altura de la lámina de agua (WS) se encuentra aproximadamente a la cota de 1642,78 msnm, mientras que la cota del calado crítico (Crit) es de 1642,79 msnm. La altura de la línea de energía es de 1643,09 msnm.

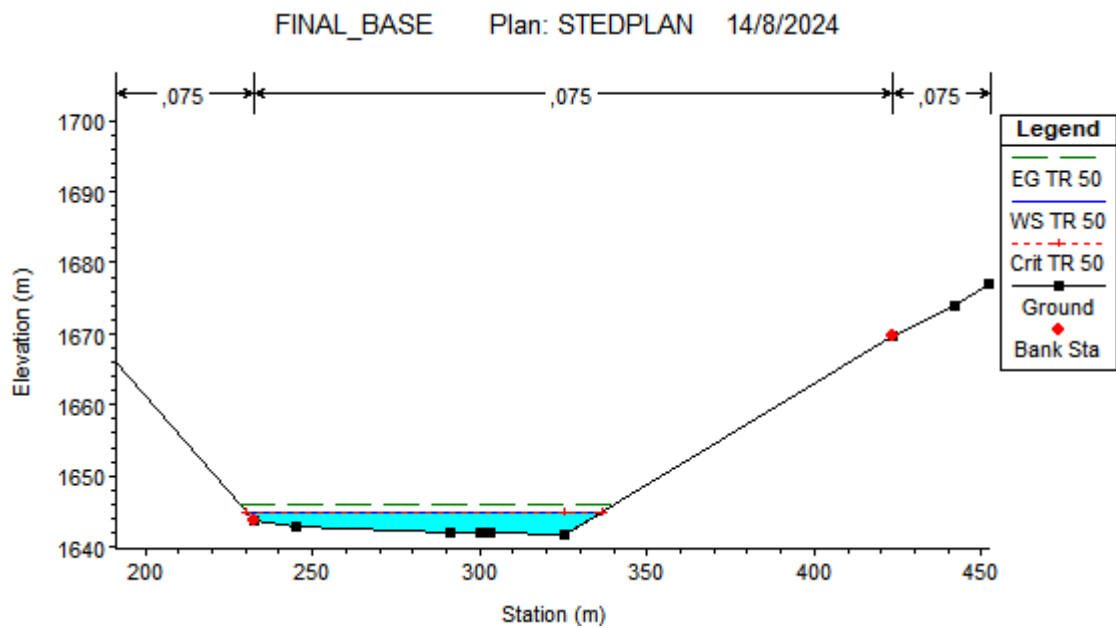


Figura 5.25. Nivel máximo de crecida TR 50 años sección 1.

- **Sección Transversal 2 (Figura 5.26):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 1083,07 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 1083,07 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 1083,32 msnm.

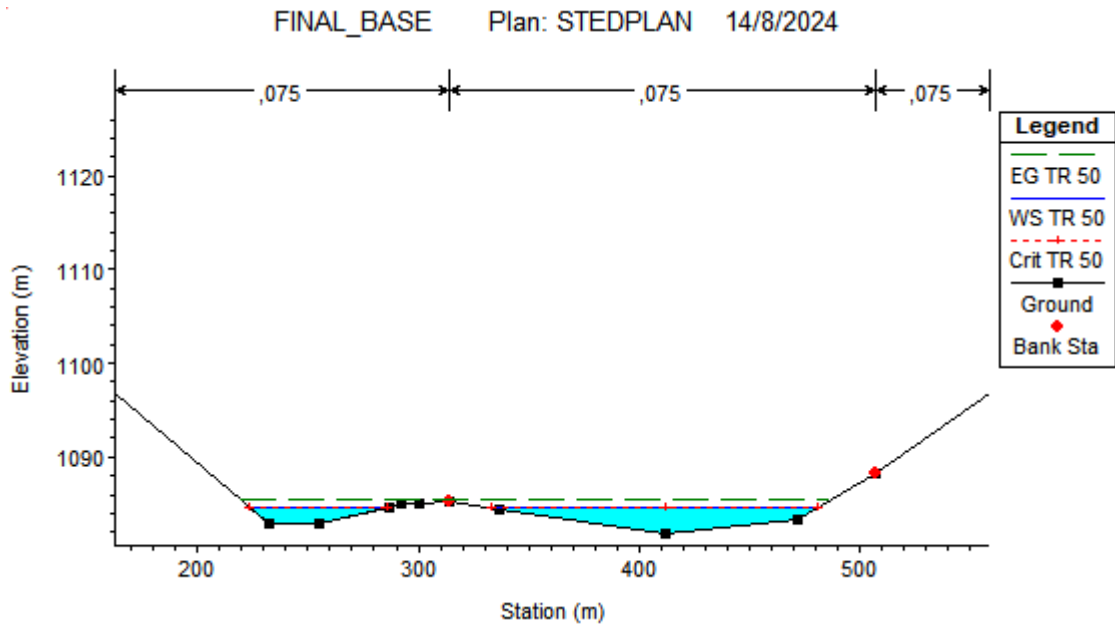


Figura 5.26. Nivel máximo de crecida TR 50 años sección 2.

- **Sección Transversal 3 (Figura 5.27):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 961,66 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 961,66 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 961,85 msnm.

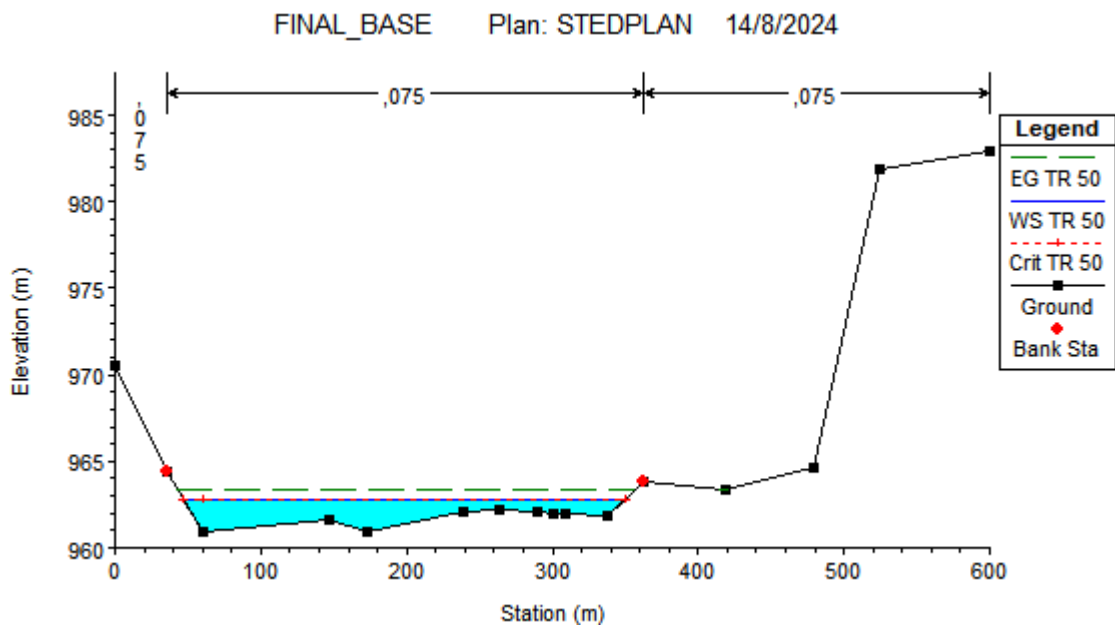


Figura 5.27. Nivel máximo de crecida TR 50 años sección 3.

Además, el coeficiente de rugosidad de Manning utilizado es de 0,075. En cuanto a las velocidades y los números de Froude en las secciones:

- En la **Sección Transversal 1**, la velocidad es de 2,45 m/s y el número de Froude es de 1,01, lo que indica un flujo supercrítico.

- En la **Sección Transversal 2**, la velocidad es de 2,26 m/s y el número de Froude es de 0,94, señalando un flujo subcrítico.
- En la **Sección Transversal 3**, la velocidad es de 1,94 m/s y el número de Froude es de 1,01, señalando un flujo supercrítico.

5.20.6. Niveles máximos de crecida TR 100

En la simulación de crecidas para un tiempo de retorno de 5 años, se observaron diferentes niveles en las secciones transversales del río Quindigua, como se detalla a continuación:

- **Sección Transversal 1 (Figura 5.28):** La altura de la lámina de agua (WS) se encuentra aproximadamente a la cota de 1642,86 msnm, mientras que la cota del calado crítico (Crit) es de 1642,86 msnm. La altura de la línea de energía es de 1643,18 msnm.

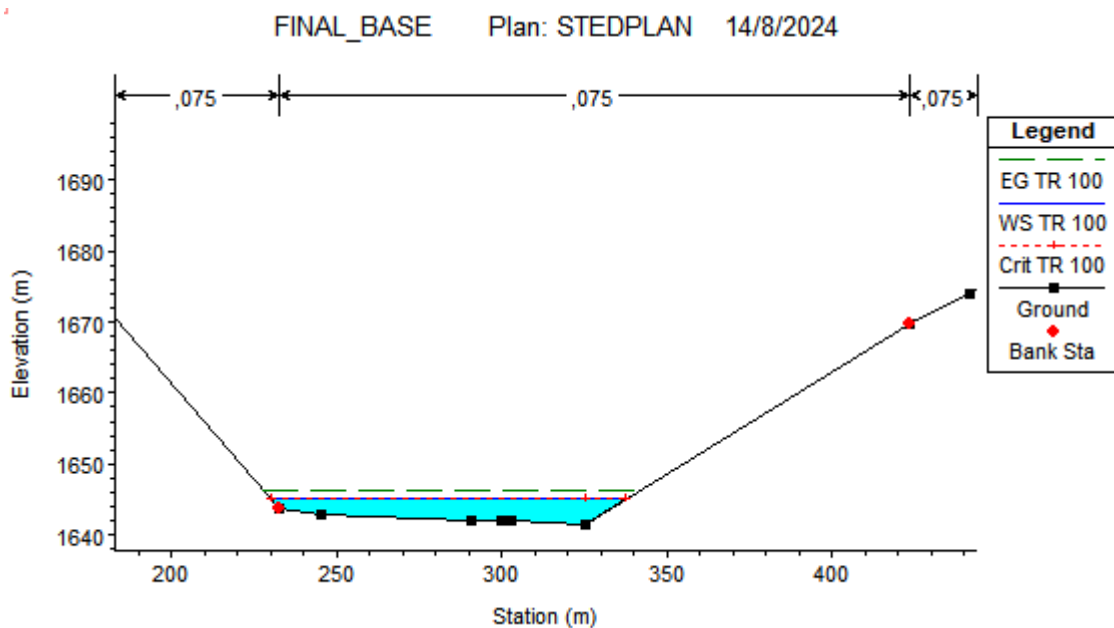


Figura 5.28. Nivel máximo de crecida TR 100 años sección 1.

- **Sección Transversal 2 (Figura 5.29):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 1083,13 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 1083,13 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 1083,40 msnm.

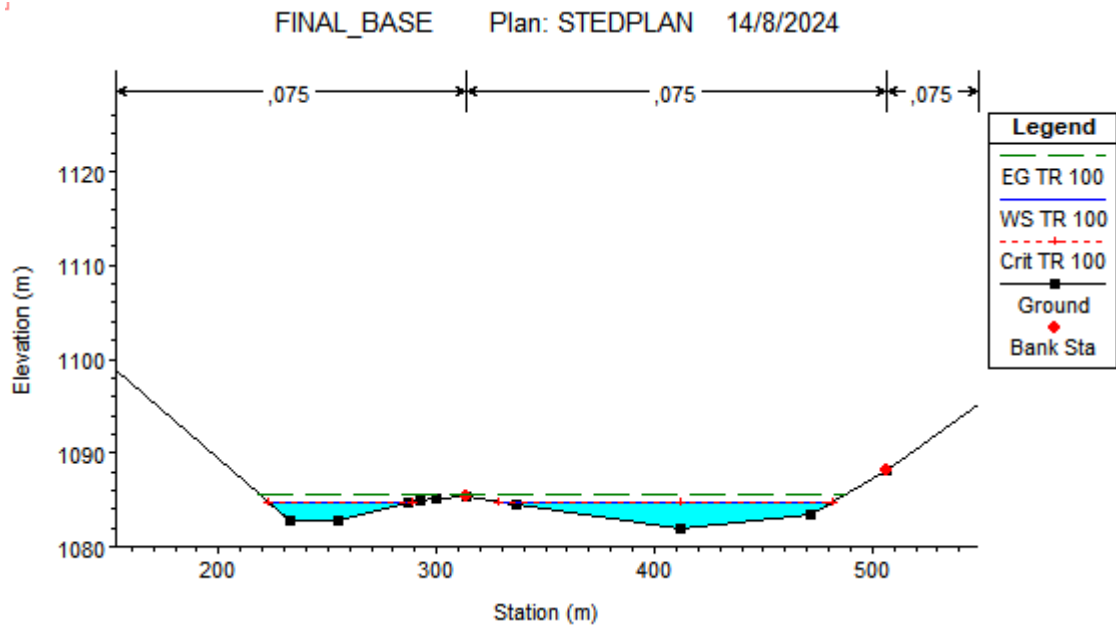


Figura 5.29. Nivel máximo de crecida TR 100 años sección 2.

- **Sección Transversal 3 (Figura 5.30):** La altura de la lámina de agua (WS) es de 961,70 msnm, con una cota del calado crítico (Crit) de 961,70 msnm. La altura de la línea de energía en esta sección es de 961,92 msnm.

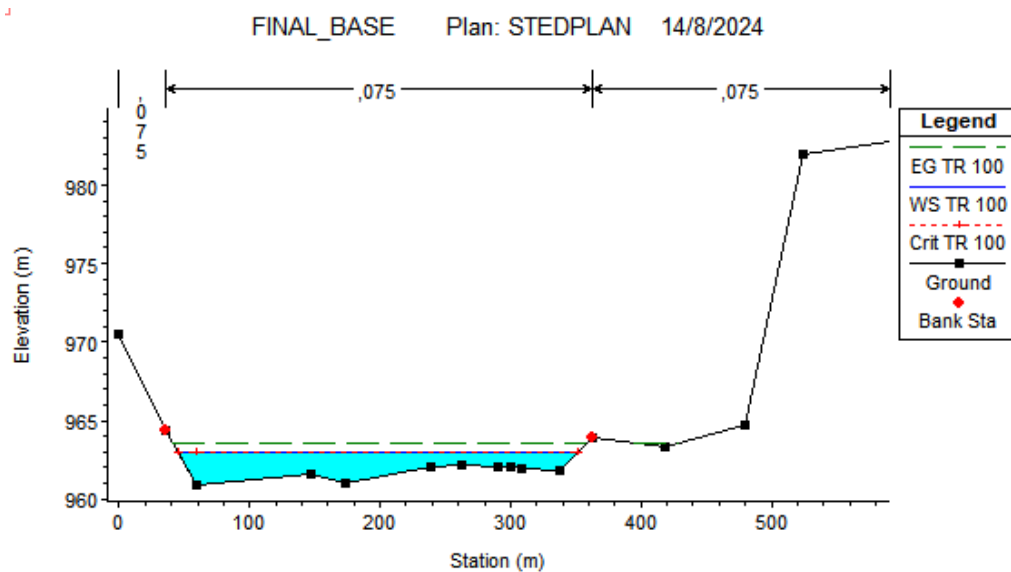


Figura 5.30. Nivel máximo de crecida TR 100 años sección 3.

Además, el coeficiente de rugosidad de Manning utilizado es de 0,075. En cuanto a las velocidades y los números de Froude en las secciones:

- En la **Sección Transversal 1**, la velocidad es de 2,51 m/s y el número de Froude es de 1, lo que indica un flujo crítico.

- En la **Sección Transversal 2**, la velocidad es de 2,34 m/s y el número de Froude es de 0,95, señalando un flujo subcrítico.
- En la **Sección Transversal 3**, la velocidad es de 2,03 m/s y el número de Froude es de 1,01, señalando un flujo supercrítico.

Después de realizado la simulación en los diferentes tiempos de retorno se identificó que los valores de velocidad y Froude varían en las secciones transversales analizadas, esto se produce a los cambios en la profundidad y la velocidad del flujo del Río al largo de su recorrido. Estas variaciones son causadas por la topografía del cauce, la rugosidad del canal, su pendiente, otros factores que afectan a la variación de las velocidades y numero de Froude son los cambios abruptos en la topografía.

5.21. Resultados Software HEC-RAS

Una vez realizada la simulación de inundaciones en la subcuenca del río Quindígua utilizando el software HEC-RAS, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla de la Figura 5.31. Esta tabla detalla las velocidades mínimas y máximas observadas en las tres secciones transversales evaluadas, así como el número de Froude correspondiente. Este último indicador es crucial para determinar el estado del flujo, permitiéndonos clasificarlo como subcrítico, crítico o supercrítico.

HEC-RAS Plan: TR 100 Locations: User Defined											
River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	Crit W.S. (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m2)	Top Width (m)	Froude # Chl
13600	TR 5	60,90	1641,58	1642,51	1642,51	1642,74	0,069977	2,11	28,80	61,92	0,99
13600	TR 10	77,70	1641,58	1642,61	1642,61	1642,86	0,067037	2,21	35,13	68,37	0,99
13600	TR 25	97,40	1641,58	1642,69	1642,69	1642,98	0,068406	2,36	41,31	74,12	1,01
13600	TR 50	117,40	1641,58	1642,78	1642,79	1643,09	0,066752	2,45	47,95	79,85	1,01
13600	TR 100	137,10	1641,58	1642,86	1642,86	1643,18	0,063542	2,51	54,71	84,78	1,00
6400	TR 5	60,90	1081,88	1082,79	1082,79	1083,02	0,074003	2,14	28,43	62,63	1,02
6400	TR 10	77,70	1081,88	1082,91	1082,91	1083,13	0,059676	2,09	38,46	94,95	0,93
6400	TR 25	97,40	1081,88	1083,01	1083,01	1083,23	0,055136	2,13	48,01	103,73	0,91
6400	TR 50	117,40	1081,88	1083,07	1083,07	1083,32	0,057660	2,26	54,77	109,51	0,94
6400	TR 100	137,10	1081,88	1083,13	1083,13	1083,40	0,057677	2,34	61,84	115,25	0,95
4422.89	TR 5	60,90	960,89	961,49	961,49	961,64	0,085750	1,69	36,03	126,40	1,01
4422.89	TR 10	77,70	960,89	961,55	961,55	961,71	0,082948	1,77	43,80	139,43	1,01
4422.89	TR 25	97,40	960,89	961,61	961,61	961,79	0,078443	1,84	53,00	153,43	1,00
4422.89	TR 50	117,40	960,89	961,66	961,66	961,85	0,077944	1,94	60,49	160,63	1,01
4422.89	TR 100	137,10	960,89	961,70	961,70	961,92	0,075869	2,03	67,42	163,54	1,01

Figura 5.31. Resultados HEC-RAS.

5.22. ANÁLISIS MODELO HIDRODINAMICO

5.22.1. Modelo Hidrodinámico caudal base.

En la Figura 5.32 se presenta el modelo hidrodinámico de la subcuenca del río Quindigua, configurado con un caudal base de $17,33 \text{ m}^3/\text{s}$. Este modelo será fundamental para evaluar y comparar los diferentes escenarios modelados, así como para identificar las áreas de inundación esperadas en función de los distintos tiempos de retorno.

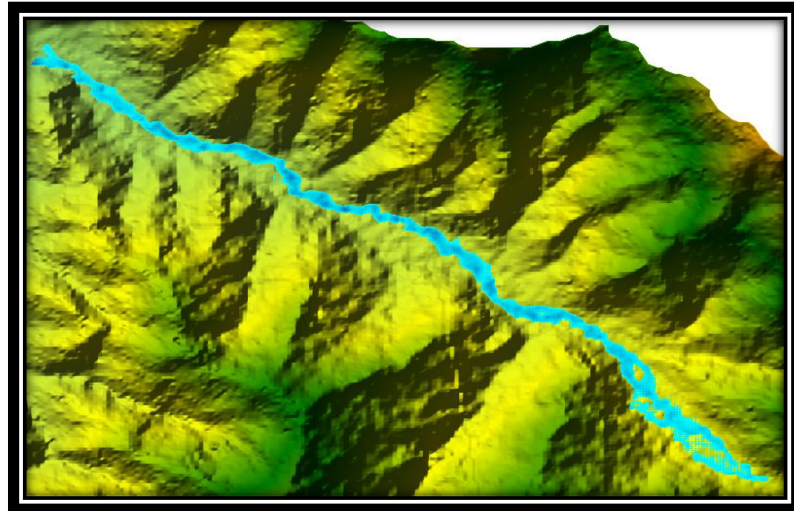


Figura 5.32. Modelo hidrodinámico Caudal Base.

5.22.2. Modelo Hidrodinámico Tr 5 años

En la Figura 5.33 se ilustran las áreas de inundación correspondientes a un tiempo de retorno de 5 años, con un caudal máximo de $60,90 \text{ m}^3/\text{s}$ obtenido mediante el software HEC-HMS. A pesar de que las áreas de inundación resultantes son menores, se observan velocidades máximas del flujo de $2,14 \text{ m/s}$ en la sección media del cauce principal.

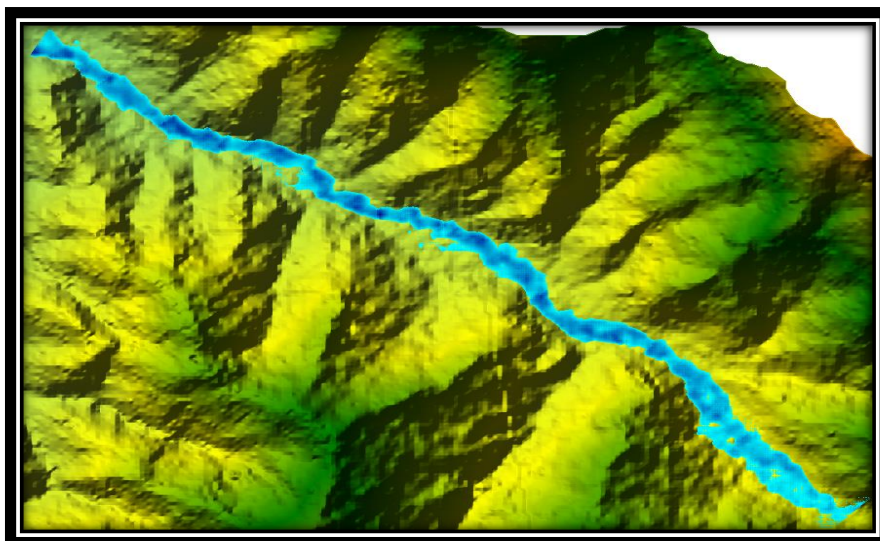


Figura 5.33. Modelo hidrodinámico Tr 5 años.

5.22.3. Modelo Hidrodinámico Tr 10 años

En la Figura 5.34 se muestra un área de inundación superior en comparación con la del tiempo de retorno de 5 años presentado en la Figura 5.33. De acuerdo con la Tabla de la Figura 5.31 de los resultados proporcionados por el software HEC-RAS, en este modelo la velocidad máxima del flujo en el cauce principal alcanza 2,21 m/s, ubicada en la parte alta del cauce, entre las tres secciones evaluadas.

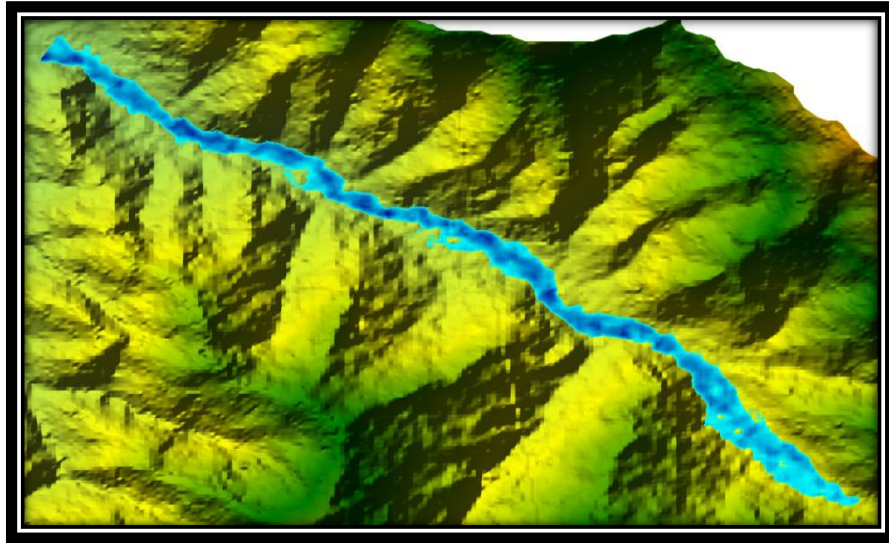


Figura 5.34. Modelo hidrodinámico Tr 10 años.

5.22.4. Modelo Hidrodinámico Tr 25 años

En la Figura 5.35 se observa un área de inundación significativa en comparación con los modelos presentados en las Figuras 5.34 y 5.33, donde el área de inundación era más reducida. En este modelo, la altura del agua es considerablemente mayor debido al caudal ingresado de 97,40 m³/s. Además, los resultados proporcionados por el software HEC-RAS indican que la velocidad máxima del flujo, registrada en la parte alta del cauce, alcanza 2,36 m/s entre las tres secciones estudiadas.



Figura 5.35. Modelo hidrodinámico Tr 25 años.

5.22.5. Modelo Hidrodinámico Tr 50 años

Observando la Figura 5.36 del modelo hidrodinámico correspondiente al tiempo de retorno de 50 años y comparándolo con los modelos previamente citados, se aprecia que este modelo presenta un área de inundación mucho más significativa, abarcando sectores que no estaban inundados en los modelos anteriores. Según los valores obtenidos con el software HEC-RAS, este modelo muestra una altura de agua superior a la de los modelos anteriores y una velocidad máxima del flujo de 2,45 m/s, localizada en la parte alta del cauce principal.

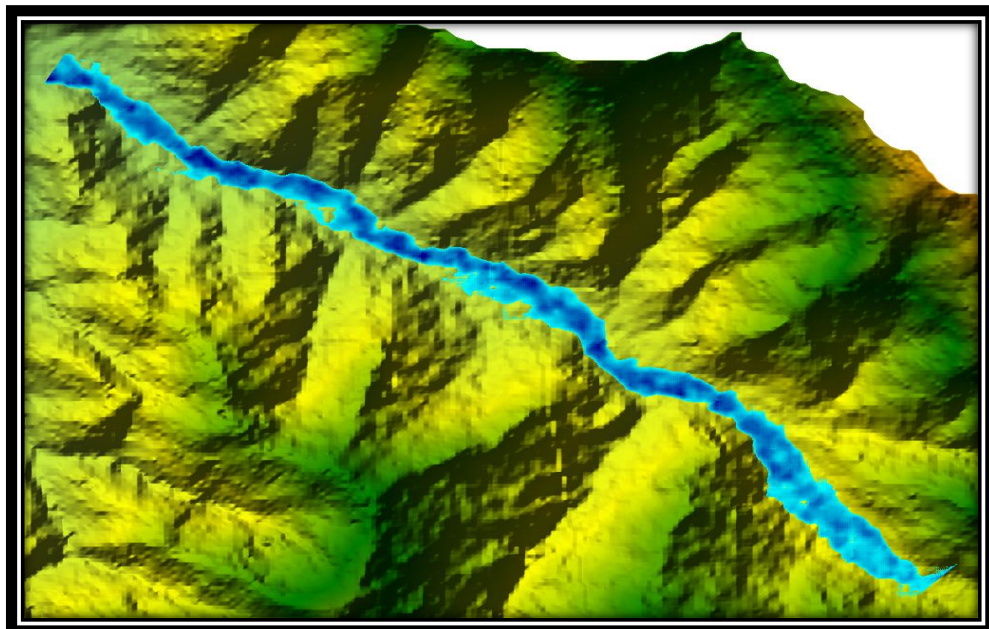


Figura 5.36. Modelo hidrodinámico Tr 50 años.

5.22.6. Modelo Hidrodinámico Tr 100 años

En la Figura 5.37 observamos que el área de inundación se encuentra claramente detallada, esto a causa del caudal máximo ingresado de 137,10 m³/s con el cual se observa que las áreas que

los otros modelos no inundaban este modelo ya lo hacen de forma clara mostrando así que el Río Quindígua puede sufrir inundaciones fuertes a lo largo de su cauce debido a las fuertes precipitaciones que se presenten en la zona de estudio. Este modelo de acuerdo a los resultados arrojados por el software HEC-RAS alcanza una altura elevada por el caudal y una velocidad máxima de 2,51 m/s ubicado en la sección alta del cauce.

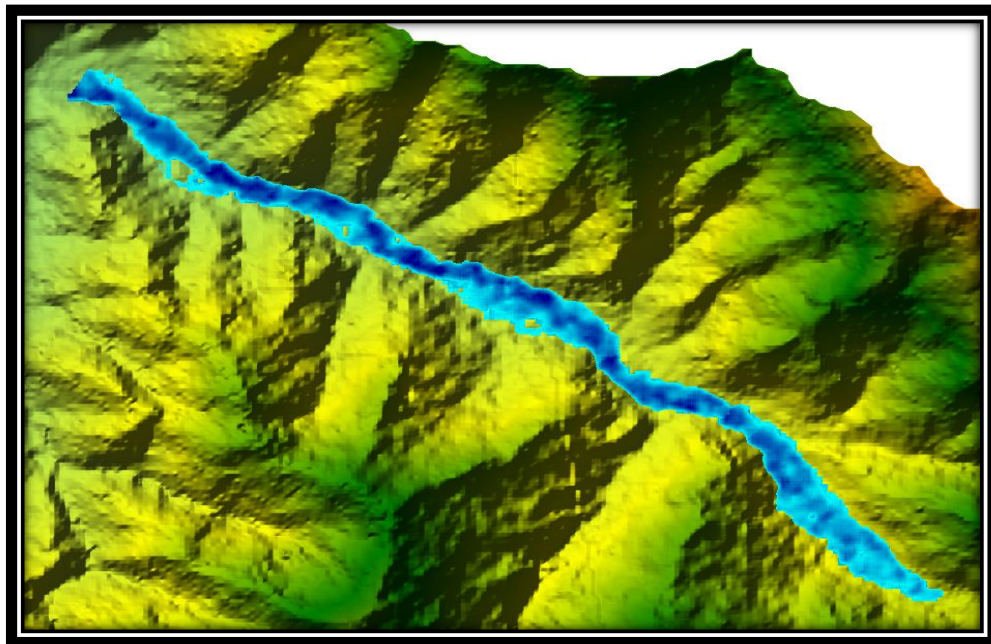


Figura 5.37. Modelo hidrodinámico Tr 100 años.

Al evaluar los diferentes modelos hidrodinámicos, se observa que las velocidades del flujo no superan los 3 m/s, lo cual se debe a que la subcuenca del río Quindígua tiene una pendiente de 0,06 m/m. Además, la comparación entre la Figura 5.31 y la Figura 5.36 permite identificar claramente el área de inundación que se producirá en eventos extremos de precipitación en la subcuenca.

5.23. DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la evaluación integral se basaron en una serie de parámetros, incluyendo el número de curva (CN), el área de la subcuenca, el tiempo de concentración y la descarga máxima para diferentes períodos de retorno. Al analizar estos resultados con estudios anteriores que abordan objetivos similares utilizando los mismos parámetros, se observan diferencias significativas. Por ejemplo, el CN obtenido para la subcuenca del Río Quindígua fue de 71, lo cual se debe a que más del 50% del área está compuesta por bosque natural, lo que sugiere un mayor potencial de retención en comparación con el proyecto de investigación titulado "*Evaluación hidrológica e hidráulica mediante la aplicación de modelos, del puente La Zompopera, Pantasma*"[54], donde el CN alcanzó un valor de 89. Además, esta diferencia

puede explicarse por la mayor cantidad de afluentes en la subcuenca del Río Quindigua, que tiene un orden de red hídrica de 5, frente al orden de 2 observado en la cuenca analizada.

Según el proyecto de titulación “*Estudio Hidrológico - Hidráulico, de un tramo de la quebrada 'El Chorro' en el sector de Ucubamba*” [55], los resultados obtenidos en la simulación de las secciones transversales muestran que, con un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,075 para la subcuenca del Río Quindigua, debido a que el lecho del río presenta una zona pedregosa en mal estado en la quebrada, es menor que los 0,040 de la quebrada El Chorro, lo que resulta en una menor pérdida de energía. El número de Froude en la quebrada “El Chorro” para un tiempo de retorno de 100 años es de 0,76, lo que indica un flujo subcrítico al no superar el valor de 1, a diferencia del número de Froude en el río Quindigua, que es de 2,14, siendo un flujo supercrítico. Aunque en estos resultados no se evidenció una propensión a inundaciones, en el caso del Río Quindigua, en el año 2022 ocurrió uno de los desastres naturales más devastadores de la zona, afectando a varias localidades como la parroquia Pucayacu, La Esperanza y El Tingo.

En base al proyecto “*Análisis de vulnerabilidad de inundaciones del río Yanuncay y evaluación de estructuras en el tramo comprendido entre Barabón y los tres puentes*” [56], se procedió a una comparación de resultados obtenidos en el software HEC-RAS para subcuenca del Río Quindigua obteniéndose así que el número de Froude en un tiempo de retorno de 25 años en el Río Quindigua es de 1,20 tratándose de un flujo supercrítico, mientras que el número de Froude del Río Yanuncay para el mismo tiempo de retorno es de 0,80 indicando un flujo, otra de las diferencias entre los ríos es que el Río Yanuncay tiene un CN de 69 siendo inferior al número de curva CN del Río Quindigua CN 71, por último tenemos una diferencia en las velocidades iniciales de cada Río teniendo en el Río Quindigua una velocidad en el inicio del cauce de 3,65 m/s a diferencia del Río Yanuncay que tiene una velocidad de 3,70 m/s observando que existe una diferencia mínima de 0,05 m/s entre ambos ríos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

El análisis bibliográfico de las precipitaciones mensuales en la cuenca del Río Quindigua proporciona una comprensión detallada de los patrones de lluvia en la región, crucial para cualquier modelado hidrológico y planificación de recursos hídricos. La información recopilada evidencia una variabilidad significativa en las precipitaciones, influenciada por factores climáticos estacionales y la orografía local. Este conocimiento permitió identificar períodos

críticos de alta precipitación, los cuales son determinantes para evaluar la capacidad de retención de la cuenca y el riesgo de escorrentía. Además, los datos históricos obtenidos han sido fundamentales para establecer escenarios de diseño y análisis en el modelado hidrológico, asegurando que los modelos reflejen con precisión las condiciones reales.

La aplicación de la técnica Rain-on-Grid (RoG) en la cuenca del Río Quindíagua ha permitido simular flujos máximos con un alto grado de precisión, proporcionando una herramienta efectiva para entender el comportamiento hidrológico bajo condiciones extremas de precipitación. Al realizar esta técnica, se logró identificar los puntos críticos de escorrentía en la cuenca, así como evaluar la respuesta del sistema hidrológico ante diferentes intensidades de lluvia. Los resultados obtenidos han demostrado que la técnica RoG es eficaz para predecir escenarios de inundación y gestionar riesgos asociados con eventos extremos, especialmente en regiones montañosas como la del Río Quindíagua. Esta simulación no solo facilita la identificación de áreas vulnerables a la inundación, sino que también proporciona información valiosa para el diseño de infraestructuras hidráulicas y la implementación de medidas de mitigación. En conclusión, la técnica RoG ha sido esencial para obtener un entendimiento más profundo del comportamiento hidrológico del Río Quindíagua y para mejorar la capacidad de respuesta ante eventos de lluvias intensas.

La evaluación del modelo hidrodinámico en la cuenca del Río Quindíagua, utilizando software especializado, ha permitido determinar con precisión las velocidades de flujo y las áreas potenciales de inundación. Este análisis ha sido crucial para comprender cómo las características geomorfológicas de la cuenca, combinadas con diferentes escenarios de precipitación, influyen en la dinámica del agua y la distribución de las inundaciones. Los resultados muestran que ciertas secciones de la cuenca presentan un mayor riesgo de inundación debido a las altas velocidades de flujo y la acumulación de agua en áreas bajas. Además, la evaluación ha revelado la eficacia del modelo hidrodinámico en simular eventos de inundación, lo que es esencial para el desarrollo de estrategias de gestión del riesgo y la planificación del uso del suelo en la cuenca.

6.2.RECOMENDACIONES

Dado el análisis detallado de las precipitaciones mensuales en la cuenca del Río Quindíagua, se recomienda la implementación de un sistema de monitoreo continuo de precipitaciones. Este sistema debe incluir estaciones meteorológicas equipadas con tecnología avanzada para recopilar datos en tiempo real sobre la intensidad y la distribución de las lluvias. La información

obtenida permitirá actualizar continuamente los modelos hidrológicos y ajustar las proyecciones de escorrentía e inundación según las condiciones actuales. Además, estos datos son cruciales para detectar cambios en los patrones de precipitación debido a variaciones climáticas o fenómenos extremos, lo que mejorará la capacidad de respuesta ante posibles eventos de inundación. La instalación de estas estaciones en puntos estratégicos de la cuenca permitirá una mejor comprensión de las dinámicas locales y regionales, facilitando la toma de decisiones informadas en la gestión del agua y la planificación territorial. En definitiva, un sistema de monitoreo robusto es esencial para mantener la precisión y la relevancia de los modelos utilizados en la cuenca del Río Quindigua y para minimizar los riesgos asociados con eventos hidrológicos extremos.

Con base en la evaluación del modelo hidrodinámico y los análisis de inundación en la cuenca del Río Quindigua, se recomienda desarrollar y adoptar planes de gestión de riesgos de inundación que se basen en las simulaciones hidrodinámicas realizadas. Estos planes deben considerar diferentes escenarios de precipitación y las proyecciones de flujo máximo para establecer zonas de riesgo y guías de actuación durante eventos extremos. Además, es fundamental que estos planes incluyan protocolos de evacuación, medidas de protección civil, y estrategias de mitigación que minimicen el impacto de las inundaciones en las poblaciones locales y en las infraestructuras críticas. La colaboración entre las autoridades locales, organismos de gestión del agua, y la comunidad es esencial para garantizar que los planes sean efectivos y se implementen de manera eficiente. También se recomienda realizar ejercicios de simulación periódicos para evaluar y mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias.

Con base en los análisis realizados sobre la cuenca del Río Quindigua y la identificación de zonas vulnerables a inundaciones, se recomienda la implementación de programas de educación y capacitación comunitaria enfocados en la gestión de riesgos hídricos. Estos programas deben estar orientados a fortalecer la conciencia y el conocimiento de la población local sobre los riesgos asociados con las inundaciones y otros eventos hidrológicos extremos. La capacitación debe incluir información sobre cómo interpretar alertas meteorológicas, identificar señales tempranas de inundaciones, y adoptar medidas preventivas en sus hogares y comunidades.

7. REFERENCIAS

- [1] Tavera Paredes Andrea Carolina, “Evaluación del Impacto de la Resolución de Modelado en la Simulación del Evento de Inundación de Mocoa en Abril de 2017,” p. 12, 2018.

- [2] M. J. Navas Muñoz, C. Matovelle Bustos, A. Vélez Arcentales, and F. Córdova, “Evaluación de modelos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para la generación de mapas de inundaciones en un río de montaña,” *AlfaPublicaciones*, vol. 4, no. 1, 2022, doi: 10.33262/ap.v4i1.181.
- [3] P. Duque-Sarango, D. M. Patiño, and X. E. López, “Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical,” *Información tecnológica*, vol. 30, no. 6, 2019, doi: 10.4067/s0718-07642019000600351.
- [4] Fernando Ivan Rodriguez Ballesteros, “Simulación de crecientes de diseño para el control de inundaciones del Río San Pablo en el Cantón Babahoyo,” p. 13, 2024.
- [5] R. W. Peters, “Hydrology and floodplain analysis, 5th edition,” *Environ Prog Sustain Energy*, vol. 31, no. 3, 2012, doi: 10.1002/ep.11677.
- [6] D. M. P. X. E. L. Paola Duque.Sarango, “Evaluación del Sistema de Modelamiento Hidrológico HEC-HMS para la Simulación Hidrológica de una Microcuenca Andina Tropical,” <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000600351> .
- [7] S. Frehiman Rodríguez-Corzo, “Dynamic simulation of flooding in a critical state of maximum runoff, under five return peRíods, in La Virgen stream in the San José de Miranda Municipality-Santander,” vol. 17, no. 1, pp. 251–270, 2018, doi: 10.18273/revuin.v17n1.
- [8] Agudelo Niño Jhon Jairo, “Simulación de escenarios de inundación para una sección longitudinal del Río Lebrija,” 2021.
- [9] A. N. A. Hamdan, S. Almuktar, and M. Scholz, “Rainfall-runoff modeling using the hec-hms model for the al-adhaim river catchment, northern iraq,” *Hydrology*, vol. 8, no. 2, Jun. 2021, doi: 10.3390/hydrology8020058.
- [10] Fernando Ivan Rodriguez Ballesteros, “Simulación de crecientes de diseño para el control de inundaciones del Río San Pablo en el Cantón Babahoyo,” 2024.
- [11] J. Lucio, R. Cabrera, L. Jelycka, C. Figueroa, I. Francisco, and J. M. Toala, “ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO OLÓN,” 2022.

- [12] M. D. Santos, “MODELAMIENTO DEL ESCURRIMIENTO POR EL SOFTWARE HEC-HMS PARA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO HÍDRICO DE LA SUBCUENCA DEL RÍO CARRIZAL,” 2017.
- [13] E. Ing Wilmer Guachamín Ing Fernando García Ing Miguel Arteaga Blgo Jorge Cadena, “DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA E HIDROLOGIA EQUIPO TÉCNICO 2015 DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE PRECIPITACIÓN Contenido,” 2015.
- [14] S. Geográfica De Lima, ““Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico’ ¿QUÉ ES CUENCA HIDRÓLOGICA? ¿QUÉ ES CUENCA HIDRÓLOGICA?,” 2011.
- [15] S. Geográfica De Lima, ““Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral del Recurso Hídrico’ ¿QUÉ ES CUENCA HIDRÓLOGICA? ¿QUÉ ES CUENCA HIDRÓLOGICA?,” 2011.
- [16] Andrea Fernanda Bravo Jaramillo, “Plan de Manejo Estratégico e Integral de la Microcuenca Minas,” pp. 1–81, 2007, [Online]. Available: https://dspace.utpl.edu.ec/bitstream/123456789/2197/3/UTPL_Bravo_Jaramillo_Andrea_Fernanda_1030692.pdf
- [17] A. Diego Fernando Baroja Llanos Diego Leopoldo Mejía Romo Álvaro Mauricio Cevallos Ramírez Galo Hernán Puetate Huera, *SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, APLICACIONES Y EJERCICIOS CON ARCGIS*. 2020. [Online]. Available: www.pucesi.edu.ec
- [18] C. R. Andy Ayala, ““SIMULACIÓN Y MODELADO DE PRECIPITACIONES Y ESCORRENTÍAS UTILIZANDO MODELOS HEC-HMS Y OBTENCIÓN DE NIVELES MÁXIMOS DE CRECIDA HEC-RAS,” 2024.
- [19] A. A. Gabriel, “MORFOMETRIA DE CUENCAS,” *Icassp*, vol. 21, no. 3, pp. 295–316, 1997, [Online]. Available: <http://julianrojo.weebly.com/uploads/1/2/0/0/12008328/morfometria.pdf>
- [20] M. Ramón, G. Blanquer, and J. Ml, “Morfología de las cuencas hidrográficas,” 2010.

- [21] J. Mireya Amagua CRíollo Gerardo David Huayracocha Vega, A. CRíollo Johanna Mireya, and H. Vega Gerardo David, “EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE TECHOS VERDES EN LA MITIGACIÓN DE VOLÚMENES DE ESCORRENTÍA EN EL DRENAJE URBANO MEDIANTE MODELOS HIDROLÓGICOS,” 2021.
- [22] J. Prieto Villarroya, H. D. Farias, and M. E. Amarilla, “Estimación del parámetro hidrológico del Número de Curva NC: Automatización del cálculo mediante S.I.G. y nuevas fuentes de información cartográfica. Caso del área urbana de Pozo Hondo,” 2013.
- [23] S. Ibañez Asensio, “Métodos para determinar el tiempo de concentración de una cuenca hidrográfica,” *Universidad Politecnica De Valencia.*, 2011.
- [24] I. José Antonio Coronel Delgado, ““GENERACIÓN DE INTENSIDADES MÁXIMAS DE LA ESTACIÓN PLUVIOMÉTRICA PUCARÁ,”” 2021.
- [25] M. John and E. F. Mera, “DETERMINACIÓN DEL HIETOGRAMA DE TORMENTA SINTÉTICO PARA LA MICROCUENCA ‘EL ZAPALLO’ EN LA ZONA PERIURBANA DE LA CIUDAD DE PORTOVIEJO,” 2020.
- [26] M. Ramírez, A. Ghanem, and H. Lárez, “Estudio Comparativo de los Diferentes Métodos Utilizados para la Predicción de Intensidades Máximas de Precipitación para el Diseño Adecuado de Estructuras Hidráulicas,” *Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, vol. 18, 2006.
- [27] J. Sanchez, “Precipitaciones,” *Geología--Univ. Salamanca (España)*, pp. 1–10, 2008, [Online]. Available: <http://hidrologia.usal.es>
- [28] S. N. M. Zad, Z. Zulkafli, and F. M. Muharram, “Satellite rainfall (TRMM 3B42-V7) performance assessment and adjustment over Pahang river basin, Malaysia,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 10, no. 3, 2018, doi: 10.3390/rs10030388.
- [29] K. Sunilkumar, A. Yatagai, and M. Masuda, “Preliminary Evaluation of GPM-IMERG Rainfall Estimates Over Three Distinct Climate Zones With APHRODITE,” *Earth and Space Science*, vol. 6, no. 8, 2019, doi: 10.1029/2018EA000503.
- [30] U. Santo Tomás Seccional Tunja Juan Alejandro Avila Galindo, “Procedimiento para la determinación y realización de HIETOGRAMAS SEMILLERO DE INVESTIGACIÓN SHWR,” 2022.
- [31] J. Cabrera and C. Eng, “Modelos Hidrológicos,” 2015.

- [32] P. C. F. F. Escamilla V, “Capacidades del modelo hidrológico TETIS versión 9,” 2017.
- [33] Yoel Esleiter Cordova Elera, “Software libre, un instrumento en la ingeniería de los recursos hídricos.” Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.iagua.es/blogs/yoel-esleiter-cordova-elera/software-libre-instrumento-ingenieria-recursos-hidricos>
- [34] J. Antonio, P. Aguilar, and M. D. Martín, *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. 2016.
- [35] Cersa, “DESARROLLO DE MODELOS HIDRÁULICOS.” Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://cersa.org.pe/capacitaciones/?q=content/blog/desarrollo-de-modelos-hidr%C3%A1ulicos>
- [36] saitec, “DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS EMPLEADOS,” 2023.
- [37] EdutoolsTec, “SWMM.” Accessed: Jul. 24, 2024. [Online]. Available: <https://edutools.tec.mx/es/colecciones/tecnologias/swmm?page=23%2C%2C%2C%2C%2C%2C%2C%2C%2C%2C%2C0>
- [38] J. Antonio, P. Aguilar, and M. D. Martín, *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. 2016.
- [39] E. DE Método Geometría De Cauces Aplicado A La Estimación De Caudales Máximos De Crecida En La Vega Alta Del, C. García, and A. Rogel, “El método de geometría de cauces aplicado a la estimación de caudales máximos de crecida en la Vega Alta del Segura,” 1996.
- [40] A. Y. Saneamiento Ambiental Nombre, L. Alfonso Hidalgo Tamayo, and D. Beatriz Rivela, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS GUÍA PRÁCTICA PARA AFORAR EN CANALES Y CAUCES NATURALES, UTILIZANDO INSTRUMENTACIÓN BÁSICA Y DE BAJO COSTO TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN.”
- [41] BRENDA STHEFANIE LUCERO, ““MODELACIÓN HIDRÁULICA UNIDIMENSIONAL CON MUROS TRANSVERSALES EN EL TRAMO KM 25+000 AL 40+700 DEL RÍO RÍMAC’ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA,” 2023.

- [42] D. Acosta *et al.*, “Uso de software para el procesamiento de imágenes digitales para la definición de cuencas hidrográficas,” *Journal of Undergraduate Research*, vol. 2, no. 1, 2016.
- [43] H. DE La Microcuenca Del Río San Francisco and I. Paola Jackeline Duque Sarango, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL "CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA Y ESTUDIO.”
- [44] V. Chow, D. Maidment, and L. Mays, “Hidrología aplicada,” 1994.
- [45] L. Bentancor, L. Silveira, and M. García Petillo, “Incidencia de la intensidad de lluvia en el tiempo de concentración de microcuencas del Uruguay,” *Agrociencia*, vol. 18, no. 2, 2014, doi: 10.31285/agro.18.471.
- [46] Z. P. Kirpich, “Time of concetration of small agricultural watersheds,” 1940.
- [47] F. Javier. Aparicio Mijares, *Fundamentos de hidrología de superficie*. Limusa, 2004.
- [48] E. Ruiz, R. Miren, and M. Santos, “HIDROLOGÍA APLICADA TEMA 5. ESCORRENTÍA.”
- [49] D. C. Gutierrez, D. Paredes Méndez, R. A. Alulema, and D. Salto, “Determination of the hydrological parameter curve number in the basin of the creek El Batán, using geographic information systems and remote sensing.”
- [50] Y. A. Tito Quispe, “Modelamiento hidráulico del río Cañete sector puente Sosci - altura puente colgante (9 km), con fines de diseño de defensas ribereñas,” *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 2017.
- [51] V. Te Chow, *Hidráulica de Canales abiertos*. 1985.
- [52] “DISEÑO HIDRAULICO SVIATOSLAV KROCHIN.”
- [53] P. Costabile, C. Costanzo, D. Ferraro, and P. Barca, “Is HEC-RAS 2D accurate enough for storm-event hazard assessment? Lessons learnt from a benchmarking study based on rain-on-grid modelling,” *J Hydrol (Amst)*, vol. 603, 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126962.

- [54] G. Keifer and F. Effenberger, “Evaluación Hidrológica e Hidráulica Mediante la Aplicación de Modelos, Del Puente La Zompopera, Pantasma,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 6, no. 11, 1967.
- [55] E. Hidrológico, X. Marcelo, and Z. Valdez, “UNIVERSIDAD DEL AZUAY FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA EN CONSTRUCCIONES,” 2020.
- [56] D. Sacoto, “ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE INUNDACIONES DEL RÍO YANUNCAY Y EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE BARABÓN Y LOS TRES PUENTES,” *Articulo Ecuador*, vol. 1, no. 5, 2017.