



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

APLICACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO

**BIDIMENSIONAL PARA EVALUAR ZONAS DE INUNDACIÓN:
CASO DEL RÍO YANUNCAY EN LA CIUDAD DE CUENCA-
ECUADOR.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR: BYRON STALYN GUAMAN ESPEJO

ANTHONY SANTIAGO SERPA TORRES

DIRECTOR: ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA.

CUENCA - ECUADOR


2020


*Yo me gradué en
los 50 años de La Cato!
... y sostuve la Universidad*

DECLARACIÓN

Nosotros Byron Stalyn Guamán Espejo y Anthony Santiago Serpa Torres; declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o clasificación profesional, y que he consultado la totalidad de las referencias bibliográficas que se incluyen en este proyecto, y eximimos a la UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este documento, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y normatividad institucional vigente.

F: 
Byron Stalyn Guamán Espejo
0105075949

F: 
Anthony Santiago Serpa Torres
0107067084

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de titulación denominado “APLICACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL PARA EVALUAR ZONAS DE INUNDACIÓN: CASO DEL RÍO YANUNCAY EN LA CIUDAD DE CUENCA-ECUADOR”, certifico que fue realizado por los estudiantes BYRON STALYN GUAMÁN ESPEJO y ANTHONY SANTIAGO SERPA TORRES, estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, bajo supervisión del suscrito; trabajo que reúne los requisitos necesarios para su presentación y sustentación ante el tribunal que se disponga.



ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA

PhD. C.I. 010415814-2

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Agradecimientos

Esta tesis va dedicada a toda mi familia. Por ellos que me enseñaron a nunca rendirme y me dan su apoyo incondicional.

Agradezco a mis padres Guillermo y Rosario por todo el apoyo incondicional que me han brindado, por la enseñanza día tras día, por estar conmigo en todos los momentos difíciles, por los innumerables consejos que han dado, sin ellos este proyecto no hubiera sido posible. Por ellos vale la pena sonreír y mejorar cada día.

A mi hermano José Andres, por estar junto a mi apoyándome siempre, por todo el cariño que me da, por todas las ayudas brindadas, por estar a mi lado en toda mi etapa formativa. El más sincero agradecimiento al tutor de tesis, Ing. Santiago Ochoa, por el apoyo y el interés para el progreso del trabajo, por todas las recomendaciones y asesoramientos a lo largo del estudio.

A todos los familiares y amigos que siempre me apoyaron y me han brindado su aprecio, por todo el tiempo que me acompañaron hicieron que cada recuerdo sea eterno y que cada sacrificio valiera la pena.

Anthony Santiago Serpa Torres

Esta tesis se la quiero dedicar a mis padres Gerardo y Francisca, quienes me animaron en este campo de estudio y me apoyaron incondicionalmente desde un inicio, ya que ustedes han formado parte de mi aprendizaje profesional y como ser humano.

Quiero agradecer a mi familia especialmente a mis padres por el apoyo incondicional que me han brindado en cada decisión y proyecto planteado, enseñándome siempre los valores de honestidad, esfuerzo y dedicación, siendo mi inspiración y un pilar fundamental en mi vida.

Además, agradezco a la Universidad Católica de Cuenca y docentes de la Facultad Ingeniería Civil en especial al Ing. Santiago Ochoa García por su valioso aporte académico y por la calidad de persona que lo define permitiéndome llegar a culminar mis estudios.

Y por su puesto a mi compañera fiel de vida Valeria, quiero agradecerte por tu amor y apoyo incondicional en todos los momentos que hemos compartido en esta etapa de mi vida.

Byron Stalyn Guamán Espejo

En el siguiente documento se presenta el análisis hidrodinámico en un tramo del río Yanuncay, comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la ciudad de Cuenca, el objetivo principal fue identificar zonas vulnerables por el desborde de este cauce natural.

Para este propósito, se consideraron diferentes Modelos Digitales de Elevación del Terreno (MDT) con resoluciones de 3, 12.5, 30 y 50 metros, validando los parámetros morfológicos para ser aplicados en un modelo hidrodinámico bidimensional; en este sentido, para los diferentes MDT se determinaron las características de los parámetros hidrológicos y de forma en la cuenca del río Yanuncay, con lo que se determinó que únicamente el MDT de 3 metros se asemeja a la morfología del cauce en la zona de estudio de acuerdo a los índices de similitud necesarios para ser aplicados en un análisis hidráulico de baja resolución.

Se consideró el software IBER para implementar la simulación de flujo a superficie libre bidimensional, para lo que se consideraron datos monitoreados por la estación limnigráfica Yanuncay AJ Tarqui (ETAPA EP). Después del procesamiento de los datos, se procedió con la calibración y validación del modelo hidrodinámico bidimensional implementado, utilizando los hidrogramas de crecida observados en diferentes periodos temporales, alcanzando errores de lo simulado respecto a lo observado de alrededor del 10% y con un muy buen ajuste de los índices estadísticos comparativos de las series.

También, se proyectaron eventos con periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años a través de una distribución de Gumbel, con lo que se estimaron zonas vulnerables a inundación, de acuerdo al análisis de los parámetros hidráulicos resultantes del modelo hidrodinámico bidimensional. Se identificaron zonas de inundaciones que afectan primordialmente las zonas aledañas a los parques lineales existentes (Primero de Mayo, Yanuncay y La Isla) y a la red vial de la zona (Av. Primero de Mayo, 27 de Febrero y Paseo Río Yanuncay).

Palabras clave: MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN, MORFOLOGÍA, MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL, INUNDACIÓN.

The following document presents the hydrodynamic analysis in a section of the Yanuncay River, between the Bridge of Loja Avenue, to the Botanical Garden of the city of Cuenca, where the main objective was to identify vulnerable areas due to the overflow of this natural channel.

For this purpose, different Digital Terrain Elevation Models (DTEM) with resolutions of 3, 12.5, 30, and 50 meters were considered, validating the morphological parameters to be applied in a two-dimensional hydrodynamic model. In this sense, for the different DTEMs, the characteristics of the hydrological parameters and shape in the Yanuncay river basin were determined, with which it was settled that only the 3-meter MDT resembles the morphology of the channel in the study area, according to the similarity indexes necessary to be applied in a low-resolution hydraulic analysis.

The IBER software was considered to implement the two-dimensional free surface flow simulation, for which data monitored by the Yanuncay AJ Tarqui streamflow measurement station (ETAPA EP) were considered. After data processing, we proceeded with the calibration and validation of the two-dimensional hydrodynamic model implemented, using the flood hydrographs observed in different periods, reaching errors of the simulated concerning the observed of around 10% and with a very good adjustment of the comparative statistical indices of the series.

Likewise, events with return periods of 5, 10, 25, and 50 years were projected through a Gumbel distribution, thus estimating areas vulnerable to flooding according to the analysis of the hydraulic parameters resulting from the two-dimensional hydrodynamic model. Flood areas were identified that primarily affect the areas surrounding the existing linear parks (“Primero de Mayo, Yanuncay”, and “La Isla”) and the road network in the area (“Primero de Mayo” Av., “27 de Febrero”, and “Paseo Río Yanuncay”).

KEYWORDS: DIGITAL ELEVATION MODEL, MORPHOLOGY, BIODIMENSIONAL HYDRODYNAMIC MODEL, FLOOD.

Capítulo I Introducción	2
1.1. Antecedentes	3
1.2. Justificación	5
1.3. Objetivo.....	6
1.4. Descripción Metodológica	7
Capítulo II Marco Teórico	9
2.1. Morfometría	9
2.1.1. Modelo Digital de Elevación	9
2.1.2. Parámetros de forma.	10
2.1.3. Parámetros de Relieve.....	11
2.1.4. Parámetros de la red de drenaje.	12
2.2. Caracterización del Flujo	15
2.2.1. Modelo hidrológico.....	15
2.2.2. Hidrograma	16
2.2.3. Hidrograma Unitario.....	19
2.2.4. Análisis de frecuencias	20
2.2.5. Modelo hidráulico.....	21
2.2.6. Modelos Matemáticos para flujos en superficie libre.	21
2.2.7. Software Modelo Bidimensional IBER.	27
2.2.8. Ecuaciones hidrodinámicas para flujo en superficie libre.	28
2.2.9. Tipos y Estados de Flujo.....	29
2.2.10. Módulo de turbulencia	32
Capítulo III Análisis de las Características Morfológicas de los MDE	37
3.1. Descripción de los Modelos Digitales	37
3.1.1. Modelo Digital Resolución 3 metros.	37
3.1.2. Modelo Digital Resolución 12.5 metros.	38
3.1.3. Modelo Digital Resolución 30 metros.	38
3.1.4. Modelo Digital Resolución 50 metros.	39
3.2. Análisis de las Características Morfométricas de los MDE.....	40
3.2.1. Parámetros superficiales.	41
3.2.2. Parámetros de la red hídrica.....	50
3.2.3. Análisis Zona de Estudio	57
3.2.4. Resumen de los resultados obtenidos	58
Capítulo IV Modelación Hidrodinámica Bidimensional	62
4.1. Identificación de la zona de estudio.....	62
4.2. Análisis de datos estación Yanuncay AJ Tarqui de ETAPA E.P	63
4.2.1. Análisis estadístico.....	65
4.2.2. Caudales máximos anuales.	70
4.2.3. Identificación Hidrograma Unitario.....	71
4.2.4. Periodos de retorno.	77
4.3. Modelación Hidrodinámica Bidimensional IBER	78
4.3.1. Datos Preliminares.	78
4.3.2. Modelación.	81
4.4. Calibración y Validación Modelo Numérico IBER.....	84

4.4.1. Análisis estadístico.....	viii
4.4.2. Calibración y Validación	88
Capítulo IV Resultados	94
5.1. Análisis de Resultados	94
Capítulo VI Conclusiones y Recomendaciones.....	114
6.1. Conclusiones	114
6.1. Recomendaciones	116
Bibliografía	118

Lista de tablas

Tabla 2. 1. Regímenes de Flujo.	32
Tabla 3. 1. Superficie y perímetro de la cuenca del río Yanuncay.	41
Tabla 3. 2. Clasificación de tamaños de cuencas hidrográficas.....	42
Tabla 3. 3. Elevación máxima, mínima y media de la cuenca del río Yanuncay.	42
Tabla 3. 4. Pendiente promedio de la cuenca a partir de los diferentes MDE	43
Tabla 3. 5. Rangos de pendientes y tipos de terrenos.	45
Tabla 3. 6. Coeficiente de compacidad obtenidos a partir de los diferentes MDE.....	47
Tabla 3. 7. Clasificación del índice de compacidad de Gravelius.	47
Tabla 3. 8. Factor de forma obtenidos a partir de los diferentes MDE.....	48
Tabla 3. 9. Valores interpretativos del factor de forma.	48
Tabla 3. 10. Relación de elongación.....	49
Tabla 3. 11. Clasificación relación de elongación.	49
Tabla 3. 12. Coeficiente de masividad.....	49
Tabla 3. 13. Clases de valores de Masividad.	49
Tabla 3. 14. Red de orden hídrica.	50
Tabla 3. 15. Longitud y pendiente promedio de la red hídrica.	52
Tabla 3. 16. Densidad de drenaje.....	54
Tabla 3. 17. Valores interpretativos de la densidad de drenaje.	54
Tabla 3. 18. Longitud del río principal.	54
Tabla 3. 19. Pendiente promedio del cauce principal.	56
Tabla 3. 20. Parámetros geomorfológicos de los diferentes MDE.	59
Tabla 4. 1. Intervalo de datos observados estación Yanuncay AJ Tarqui.	64
Tabla 4. 2 Parámetros curva de descarga.....	65
Tabla 4. 3. Media, mediana y coeficiente de asimetría registro de datos de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.	66
Tabla 4. 4. Desviación estándar y varianza de datos de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.	67
Tabla 4. 5. Curtosis de datos de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.	69
Tabla 4. 6. Cuartiles datos registrados de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.	70
Tabla 4. 7. Caudales máximos instantáneos anuales estación Yanuncay AJ Tarqui.	71
Tabla 4. 8. Volumen directo hidrogramas de crecida.	75
Tabla 4. 9. Datos preliminares	75

Tabla 4. 10. Cálculo del hidrograma unitario.	76
Tabla 4. 11. Caudales máximos proyectados para diferentes periodos de retorno.	77
Tabla 4. 12. Coeficientes de rugosidad de Manning.....	80
Tabla 4. 13. Análisis estadístico de los resultados de calado obtenidos a partir del modelo IBER en relación a los datos observados por la estación Yanuncay AJ Tarqui – año 2013.....	89
Tabla 4. 14. Análisis estadístico de los resultados de calado obtenidos a partir del modelo IBER en relación a los datos observados por la estación Yanuncay AJ Tarqui – años 2017 / 2013 / 2011 (Rugosidad 1).....	91
Tabla 5. 1. Áreas de drenaje e inundación en la zona de estudio.	112

Lista de figuras

Figura 2. 1. Pendiente promedio del cauce principal.....	13
Figura 2. 2. Pendiente promedio del cauce principal (Taylor y Schwarz).....	13
Figura 2. 3. Orden de la red hídrica establecida por Strahler.	14
Figura 2. 4 Hidrograma Anual rio Perenne.....	17
Figura 2. 5 Hidrograma Anual rio Efímero	17
Figura 2. 6 Hidrograma Anual rio fuente derretimiento de nieve.....	18
Figura 2. 7. Componentes de un hidrograma en una tormenta	18
Figura 2. 8 Hidrograma Unitario	19
Figura 2. 9. Notación para los esfuerzos (τ_{ij} = esfuerzos en la dirección j sobre la cara normal al eje i).	24
Figura 3. 1. Modelo Digital de Elevación tamaño 3 metros.	37
Figura 3. 2. Modelo Digital de Elevación tamaño 12.5 metros.	38
Figura 3. 3. Modelo Digital de Elevación tamaño 30 metros.	39
Figura 3. 4. Modelo Digital de Elevación tamaño 50 metros.	40
Figura 3. 5. Delimitación de la cuenca del río Yanuncay con diferentes MDE.	41
Figura 3. 6. Mapa de pendientes de la cuenca del río Yanuncay con diferentes MDE. ...	43
Figura 3. 7. Extensión de pendientes	44
Figura 3. 8. Curvas hipsométricas de la cuenca del río Yanuncay generadas por los diferentes MDE.....	46
Figura 3. 9. Curvas Hipsométricas – Potenciales Evolutivos.	46
Figura 3. 10. Red de orden hídrica de la cuenca del río Yanuncay para los diferentes MDE.....	51
Figura 3. 11. Formas de los sistemas de drenaje.....	52
Figura 3. 12. Análisis de las longitudes de la red hídrica.	53
Figura 3. 13. Recorrido cauce principal cuenca río Yanuncay.	55
Figura 3. 14. Comparación cauce principal MDE 3m – MDE 50m. Fuente: Propia.....	55
Figura 3. 15. Perfil cauce principal cuenca del río Yanuncay con diferentes MDE.....	56
Figura 3. 16. Zona de Estudio.	57
Figura 3. 17. Análisis de trayectoria de cause en la zona de estudio.	58
Figura 3. 18. Trayectoria del rio Yanuncay obtenida a partir del MDE de 3 metros.	60

Figura 4. 1. Zona de estudio río Yanuncay.	62
Figura 4. 2. Identificación estación limnigráfica Yanuncay AJ Tarqui.	63
Figura 4. 3. Representación gráfica de los diferentes tipos de curtosis.	68
Figura 4. 4 Hidrogramas de crecida en 24 horas.	72
Figura 4. 5. Hidrogramas de crecida 2017.	74
Figura 4. 6. Hidrogramas de crecida 2013.	74
Figura 4. 7 Gráfico hidrograma unitario base.	77
Figura 4. 8. Hidrogramas de crecida para diferentes periodos de retorno.	78
Figura 4. 9. Ortofoto usada como fondo en el modelo	79
Figura 4. 10. Usos de suelo obtenidos a partir de ortofoto	80
Figura 4. 11. Malla generada en el software IBER.	81
Figura 4. 12. Hidrograma interpretado por el software IBER	82
Figura 4. 13. Mapa de rugosidades interpretado por el software IBER.	82
Figura 4. 14. Ventana de cálculo del software IBER.	83
Figura 4. 15. Esquema de análisis de resultados del software IBER	84
Figura 4. 16. Gráfica comparativa calado – tiempo.	89
Figura 4. 17. Validación calado estación vs calado modelo – año 2017.	90
Figura 4. 18. Validación calado estación vs calado modelo – año 2011.	91
Figura 5. 1. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 5 años, generado por IBER.	95
Figura 5. 2. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 10 años, generado por IBER.	96
Figura 5. 3. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 25 años, generado por IBER.	97
Figura 5. 4. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 50 años, generado por IBER.	98
Figura 5. 5. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona Parque Lineal Primero de Mayo.	99
Figura 5. 6. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona Salones de Recepciones Quita Lucrecia.	100
Figura 5. 7. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona parque lineal Yanuncay.	101
Figura 5. 8. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona estación de Bomberos N° 3.	102
Figura 5. 9. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona parque lineal Primero de Mayo comprendida entre la calle Francisco de Orella y Av. 12 de Octubre, para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.	103

Figura 5. 10. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona Quinta Lucrecia para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.....	xi 104
Figura 5. 11. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona Parque Lineal Yanuncay Octubre para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.....	104
Figura 5. 12. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona de la Estación de Bomberos N ° 3 para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.	105
Figura 5. 13. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 5 años, generados en IBER.....	106
Figura 5. 14. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 10 años, generados en IBER.....	107
Figura 5. 15. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 25 años, generados en IBER.....	108
Figura 5. 16. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 50 años, generados en IBER.....	109
Figura 5. 17. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 5 años, resultados obtenidos en IBER.....	110
Figura 5. 18. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.....	110
Figura 5. 19. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.....	111
Figura 5. 20. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 50 años, resultados obtenidos en IBER.....	111

CAPÍTULO I
INTRODUCCIÓN

Capítulo I

Introducción

Para mejorar la calidad de vida, la Ingeniería Civil a lo largo del tiempo ha brindado una variedad de soluciones desde la construcción de puentes, carreteras, edificaciones hasta obras hidráulicas, con el propósito de garantizar la comodidad de las personas generando obras prácticas y seguras. Una de las ramas relevantes de la ingeniería es el estudio de los cauces naturales, ya que son fuentes naturales de agua que sirven para el consumo humano. Además, según la historia las ciudades fundadas cerca de los ríos han logrado un mayor desarrollo, pero de la misma manera pueden producir daños debido a diferentes factores (Arévalo, 2020).

En la ciudad de Cuenca existen cuatro ríos, los cuales han tomado importancia a nivel cultural y turístico, ya que estos cauces naturales atraviesan la ciudad. Por otro lado, a lo largo del tiempo el cauce ha presentado complicaciones de desborde por el incremento de caudal en las temporadas invernales. Este incremento de caudal causa un peligro hacia la sociedad que habita en las zonas aledañas, las cuales son propensas a inundaciones en épocas de crecidas.

La modelación hidrodinámica es una herramienta que tiene la finalidad de obtener información sobre parámetros importantes como: el comportamiento de la lámina de agua, caudales, altura de la superficie libre, presencia de contaminantes, para diferentes tipos de flujos (estacionarios, no estacionarios). Existe una variedad de softwares para la representación de los modelos hidrodinámicos, los cuales pueden ser estudiados en varias condiciones tales como: unidimensional(1D), bidimensional(2D) y tridimensional(3D) (Ochoa, y otros, 2016).

En el presente trabajo se plantea implementar simulaciones con el modelo bidimensional IBER (<https://iberaula.es/space/54/downloads>), considerando los datos del terreno en base a imágenes con distintas resoluciones (3, 12.5, 30 y 50 metros) para evaluar el

comportamiento de la dinámica fluvial del río Yanuncay y las zonas de riesgo ante distintos eventos de crecida del cauce en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico a la altura de la Estación de Bomberos N°3 de la Ciudad de Cuenca; tramo que tiene una longitud aproximada de 3 km.

1.1. Antecedentes

El río Yanuncay de ciudad de Cuenca, es un río de montaña que nace al Sur del Parque Nacional Cajas a más de 3900 msnm. Atraviesa varias zonas dispersas desde parroquias rurales hasta zonas urbanas donde converge con el río Tomebamba. Por otro lado, es necesario conocer e investigar los eventos naturales que suceden en estos cauces, una de las metodologías aplicadas para desenvolver estas problemáticas, es la generación de modelos digitales a través del uso de elementos finitos en softwares. Además, se debe tener en cuenta que para realizar o implementar los planes de ordenamiento territorial es necesario el uso de Sistemas de Información Geográfica, a través de herramientas aplicadas en un análisis espacial procedente de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), para determinar cartografías de riesgos que sirven para la toma de decisiones, protocolos de evacuación y obras de ingeniería.

En el año 2016 se delimitaron áreas de riesgo de inundaciones aplicando MDE en la localidad de San Luis del Plamar en Argentina en el arroyo Riachuelo. El análisis espacial permitió delimitar con precisión que 45 manzanas de su diseño urbano se encuentren en continuo riesgo de sufrir inundaciones (Contreras & Odriozola, 2016).

En el año 2016 se realizó una modelación matemática bidimensional para el cálculo de las tasas de transporte de sedimentos en un tramo del río Yanuncay con una longitud de 860 m y una pendiente de 1.34%, utilizando el programa IBER. La modelación se realizó sobre una malla estructura de 3 m de arista, donde se evaluaron caudales de crecida y se estableció que se requiere de un modelo físico para calibrar el modelo con fines aplicativos (Pesántes y Sánchez, 2016).

En el año 2017 se determinaron parámetros hidrológicos e hidráulicos característicos del río Yanuncay a través de modelos hidráulicos utilizando HEC-HMS y HEC-RAS aplicados en el tramo comprendido entre Barabón y Los Tres Puentes de la ciudad de Cuenca, proporcionando calados máximos en un rango de 2.7 m a 4.8 m, velocidades que varían entre 0.7 m/s a 5 m/s y un flujo en régimen subcrítico en la mayor parte del tramo analizado. Además, simultáneamente con el software ArcGIS y su complemento HEC-GeoRas se determinaron diferentes zonas con riesgos de inundación para diferentes periodos de retorno (5, 10, 25, 50 y 100 años), obteniendo los caudales máximos de diseño que varían desde 114.3 m³/s a 257.3 m³/s y se obtuvo un área efectiva de inundación de 34.1 ha para un periodo de retorno de 100 años en el tramo analizado (Sacoto, 2017).

En el año 2020, se realiza una comparación de los resultados de las manchas de inundación de un modelo hidráulico realizado en el 2017, generando un modelo actualizado con la finalidad de determinar los impactos producidos por los rellenos colocados al margen derecho del río Yanuncay en el tramo Misicata – Tres Puentes de la ciudad de Cuenca. Se efectúa un modelo hidráulico unidimensional en régimen impermanente con ayuda del software HEC-RAS, generando dos modelos uno con la construcción de relleno artificial en su margen derecho y otro sin los rellenos, estableciendo manchas de inundación con caudales desde los 150 m³/s hasta los 350 m³/s con variación de 50 m³/s. Además, por el efecto de los rellenos artificiales realizados en el tramo no se registraron nuevas zonas de inundación, sin embargo, se observó un aumento en las áreas de inundación ya registradas con anterioridad, siendo los sectores Av. Loja, Quinta Lucrecia, Av. Felipe II y los Tres Puentes los más afectados y se determina que los rellenos artificiales cumplen la función de retener cierta cantidad de caudal dependiendo de su diseño, sin embargo, al aumentar el caudal debido a su intensidad, los rellenos dejan de cumplir su función produciendo áreas de inundación iguales a las que se producían antes de su construcción (Gutiérrez, 2020).

En el año 2020, se realiza una modelación hidráulica en dos dimensiones en un tramo del río Yanuncay comprendido entre el Puente de Misicata y Av. De las Américas en la ciudad de Cuenca empleando el programa IBER. Se realizó a partir de fotogrametría con

resolución de 6 centímetros, generando un modelo digital de elevaciones para las simulaciones, obteniendo llanuras de inundación críticas en las calles Primero de Mayo, Darío Ordoñez Espinoza, Alfonso María Mora, Lizandro Abad, Carmela Malo, Cañuelas, Cantón Sígsig, Cantón Chunchi, alcanzando hasta 0.5 m de altura de agua y velocidades de flujo desde 1 m/s con caudales bajos hasta adquirir velocidades de 5 m/s con caudales cercanos a los 350 m³/s en el cauce del río. Además, se determinó a través de los gráficos de velocidad que a medida que el caudal incrementa específicamente al superar los 250 m³/s, se producen velocidades críticas que están alrededor de 4m/s en un 80% del tramo analizado (Arévalo, 2020).

1.2. Justificación

El río Yanuncay forma parte de uno de los cuatro ríos que atraviesa la ciudad de Cuenca, siendo catalogado como un río de montaña debido a sus pendientes pronunciadas y laderas, transportando en él un importante caudal. Cuando existen precipitaciones continuas e intensas en la cuenca hidrográfica del río Yanuncay genera incertidumbre e inseguridad en las zonas residenciales de la ciudad de Cuenca, debido a que el afluente sobrepasa la capacidad de su cauce.

Existen varios registros en el cual se indican eventos extraordinarios presentados en el cauce, en el año 1950 se generó un desbordamiento donde no se registraron daños, en el año 1989 afecto a varias vías que se encontraban junto al río (Basabe, 1996) , en el año 2007 con un caudal registrado de 240 m³/s se generaron desbordamientos, de igual manera en el año 2012, 2018 y 2019 se han registrado varias crecidas con desbordamientos del río que han causado daños en la propiedad pública y privadas (Vallejo Llerena , 2014).

Actualmente, a través de estudios hidrológicos y modelaciones hidrodinámicas, es posible predecir el comportamiento de los ríos, determinando zonas con alto riesgo de inundaciones y elaborando obras de control para evitar su desbordamiento, con el fin de prevenir catástrofes hacia la población (Ochoa, y otros, 2016). Existen varios estudios

realizados en el río Yanuncay mencionados con anterioridad, en los cuales se analiza el comportamiento hidrodinámico unidimensional y bidimensional en distintos tramos del cauce.

El tramo propuesto entre el Puente Av. Loja hasta el Jardín Botánico de Cuenca (longitud aproximada de 3 km) carece de una modelación bidimensional, por ende, se plantea un análisis hidrodinámico, con la finalidad de identificar las zonas más vulnerables a inundaciones en base a caudales con periodos de retorno que representen eventos de desborde del cauce natural. Además, se realizará un análisis de las características morfométricas de los modelos digitales de elevación con diferentes resoluciones, con el fin de determinar un MDE adecuado para la implementación de un modelo hidrodinámico.

Para el análisis es importante aclarar que no es necesario la generación del caudal mediante la implementación de un módulo hidrológico, la razón de esto es que se cuentan con los datos de nivel del río Yanuncay monitoreados por los limnógrafos automáticos de la estación Yanuncay AJ Tarqui de ETAPA E.P y su respectiva curva de descarga que servirá como dato de entrada y datos para la calibración y validación de los modelos implementados con IBER (Información Histórica desde 1997 hasta 2019).

1.3. Objetivo

El objetivo general de la tesis es determinar el comportamiento hidrodinámico del río Yanuncay a partir de un Modelo Digital de Elevación en el tramo comprendido entre el puente de la Av. Loja a nivel de la Av. Primero de Mayo y Jardín Botánico de Cuenca junto a la Av. 27 de Febrero, utilizando el modelo hidrodinámico bidimensional IBER. De este objetivo general se desprenden los siguientes objetivos específicos:

- Analizar imágenes con distinta resolución (3, 12.5, 30 y 50 metros) para la construcción de los MDT utilizados como información base para implementar en el modelo hidrodinámico bidimensional.

- Estimar caudales de crecida para diferentes periodos de retorno (5, 10, 25 y 50 años) en base a la distribución de Gumbel a partir de los datos de caudales observados.
- Implementar, calibrar y validar modelos numéricos de flujo bidimensional en el dominio del tramo Puente Av. Loja hasta el Jardín Botánico de Cuenca, considerando la herramienta computacional de modelación hidrodinámica IBER.
- Construir mapas de las zonas de inundación de acuerdo a los resultados de los modelos hidrodinámicos implementados.

1.4. Descripción Metodológica

En el Capítulo II se presenta la base teórica de todos los componentes a tratar en el estudio, describiendo toda la información requerida para el análisis de la morfología e hidrodinámica. El Capítulo III se basa en la descripción de cada uno de los modelos digitales de elevación del terreno, donde se analiza las características morfológicas de las imágenes con su diferente resolución, con la finalidad de determinar los MDE más idóneos para implementarlos en un estudio hidrodinámico. En el Capítulo IV, se implementa un modelo hidrodinámico bidimensional utilizando el software IBER en el dominio de estudio, con su respectiva calibración y validación, analizando los datos observados en relación a los modelados. Finalmente, en el Capítulo V, se analizan los resultados obtenidos por el modelo hidrodinámico implementado en el río Yanuncay desde el puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico en la ciudad de Cuenca, dando como resultado mapas de áreas coloreadas de las zonas de inundación con sus respectivos parámetros hidráulicos.

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

Capítulo II

Marco Teórico

2.1. Morfometría

La morfometría se basa en el estudio de la orografía y relieve de una superficie, caracterizándola a través de parámetros con análisis focales, a partir de mediadas geométricas y estadísticas (Olaya, 2014).

En el presente estudio se analizarán los parámetros morfométricos a partir de un Sistema de Información Geográfica (SIG), utilizando como capa base los Modelos Digitales de Elevaciones con diferentes resoluciones. Para una mejor interpretación de los resultados se plantea el análisis de la cuenca hidrográfica del río Yanuncay y del domino de estudio.

2.1.1. Modelo Digital de Elevación

Un modelo digital de elevación (MDE) es un conjunto de datos numéricos que representan la altura de la superficie del terrestre, el MDE se compone por un sistema de georreferenciación, en el caso del sistema de coordenadas planas los valores abscisas y ordenadas cuentan con un valor en z representando la cota del terreno. Existen diferentes formas de construir un MDE, entre esas tenemos: levantamientos topográficos, fotogrametría, mapas topográficos, etc (Felicísimo Pérez, 1994).

Los Modelos Digitales a utilizarse se generan a partir de plataformas áreas y satelitales, representadas por un modelo ráster con diferente resolución, donde cada uno de los pixeles que conforman el MDT cuenta con una altitud. Actualmente, los satélites más conocidos que proporcionan esta información de manera gratuita son: ASTER, ALOS PALSAR, STRM y GMTED2010.

2.1.2. Parámetros de forma.

Superficie. Se establece como la proyección horizontal de toda el área de drenaje de un sistema hidrográfico, delimitada por la divisora de aguas, si se establece una línea imaginaria para una mejor interpretación esta debe delimitarse por los puntos de mayor altura topográfica, separando la cuenca de estudio de otras cuencas adyacentes, expresado normalmente en Km² (Mijares, 1989).

Para estimar el tamaño de la cuenca, se utiliza como herramienta fotografías aéreas, cartografías o la estimación directa en campo (Gámez, 2009).

Perímetro. Hace referencia a la longitud sobre un plano horizontal, el cual recorre la divisoria de aguas, delimitando el área de la cuenca hidrográfica de forma irregular. Este parámetro se expresa generalmente en metros o kilómetros (Villón, 2002).

Coefficiente de compacidad. Es un índice adimensional que evalúa la forma de la cuenca hidrográfica, el cual se define por la relación de dos diferentes perímetros, de la cuenca hidrográfica y una circunferencia con la misma área de la cuenca. El caudal de salida depende directamente de la forma de la hoya, expresada por un factor “K” denominado coeficiente de Gravelius (Villón, 2002):

$$K = \frac{0.28 * P}{A^{0.5}}$$

Donde:

K: coeficiente de compacidad o de Gravelius.

P: perímetro de la cuenca (Km).

A: área de la cuenca (Km²).

Índice de forma. Relaciona el ancho promedio con la longitud del cauce principal de la cuenca. Para definir el ancho promedio se debe dividir el área de la cuenca para la longitud del cauce principal, expresando como (Villón, 2002):

$$K_f = \frac{B}{L} = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

K_f: índice de forma (adimensional).

B: ancho promedio de la cuenca (Km).

A: área de la cuenca (Km²).

L: longitud del cauce principal de la cuenca (Km).

2.1.3. Parámetros de Relieve.

Elevación máxima, mínima y media. Las elevaciones son parámetros elementales para identificar varias características de las cuencas hidrográficas. A continuación, se describen las altitudes más representativas (Verdugo Cárdenas, 2017):

- Cota máxima: Es la mayor altura donde se encuentra la divisoria de la hoya.
- Cota mínima: Se define como la altura en la cual la cuenca descarga su caudal a un cauce mayor.
- Elevación media: Es la altura promedio de la cuenca y define la cota que divide la cuenca en dos zonas con áreas equivalentes.

Pendiente media de la cuenca. La pendiente se define como el valor medio del desnivel de la superficie con respecto a la horizontal sobre la cual se encuentra la cuenca. El cálculo se determina a partir de una media ponderada de todas las pendientes de la cuenca hidrográfica (Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2008).

Curva hipsométrica. Es una gráfica que representa la variación altitudinal vs el área acumulada de la cuenca generando una curva área acumulada (%) – elevación. Esta curva permite identificar que porcentaje de área de la cuenca se encuentra a una altura determinada (Villón, 2002).

Relación de elongación. Es la relación del diámetro de un círculo definido a partir del área y longitud de la cuenca analizada entre la longitud más larga de la cuenca. Cuando la cuenca presenta una forma plana y circular la relación tiende a la unidad y cuando posee una forma plana y delimita por porciones accidentales esta relación toma valores entre 0.5 a 0.8 (Campos Aranda, 1998).

$$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{Lc}$$

Donde:

A: Área de la cuenca en Km².

Lc: Longitud más larga de la cuenca, paralela al cauce principal en Km.

Coefficiente de masividad. Relación que se establece entre la altitud media y el área de la cuenca. En cuencas con altitudes altas se establecen valores elevados y bajos en cuencas donde predominan los terrenos llanos con superficies similares (Martonne, 1940).

$$k = \frac{\text{Elevación media (m)}}{\text{Área de la Cuenca (Km}^2\text{)}}$$

2.1.4. Parámetros de la red de drenaje.

Longitud y pendiente media del río principal. La longitud se define como la distancia horizontal del río principal, el cual se puede identificar desde la parte más alta de

la cuenca hasta su cota más baja, expresado generalmente en kilómetros (Verdugo Cárdenas, 2017).

La pendiente media del río principal generalmente se identifica a partir de la diferencia entre su cota máxima y mínima dividido entre su distancia horizontal en planta (Figura 2. 1).

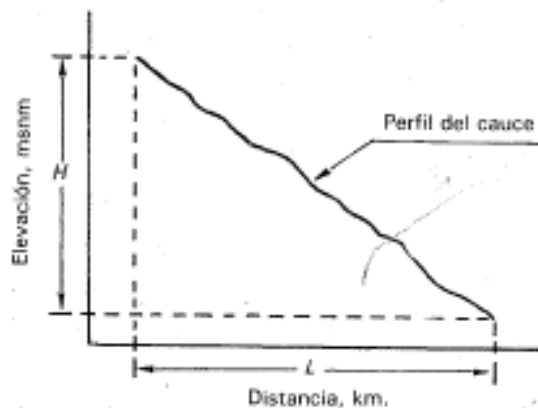


Figura 2. 1. Pendiente promedio del cauce principal.

Fuente: (Mijares, 1989)

Existen varios métodos para definir la pendiente media, uno de los más utilizados fue proporcionado por Taylor y Schwarz, proponiendo el cálculo a partir de una serie de canales de sección transversal uniforme que tenga la misma longitud y tiempo de recorrido, generando un promedio de pendiente de todos los tramos analizados (Figura 2. 2) (Mijares, 1989).

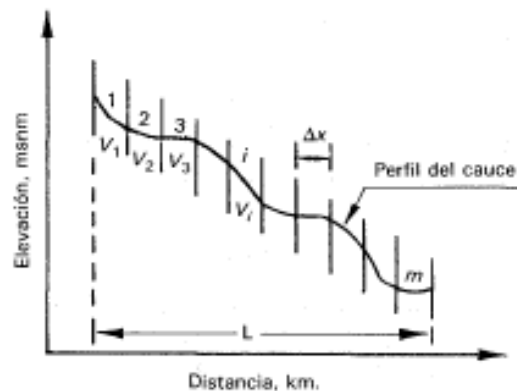


Figura 2. 2. Pendiente promedio del cauce principal (Taylor y Schwarz).

Fuente: (Mijares, 1989)

La ecuación definida por Taylor y Schwarz se expresa de la siguiente forma:

$$S = \left[\frac{m_i}{\frac{1}{\sqrt{S_1}} + \frac{1}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{1}{\sqrt{S_m}}} \right]$$

Donde:

S: pendiente media del cauce.

m_i: número de fragmentos iguales en los que se divide el cauce principal.

Orden de la red. La red hídrica se representa a partir de una corriente principal y una serie de afluentes, para ordenar las corrientes, se realiza una categorización. Existe diferentes métodos para jerarquizar la red fluvial, uno de los más utilizados es la técnica de Strahler (Figura 2. 3), el cual identifica a la corriente de primer orden como aquella que no tiene afluentes, una de segundo orden cuando dos corrientes de primer orden convergen, una de tercer orden aquella donde se reúnen dos de segundo orden y así correspondientemente (Ibañez, Moreno, & Gisbert, 2008).

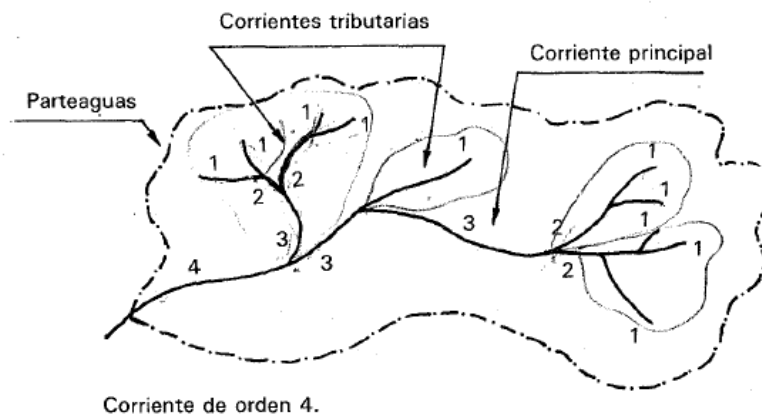


Figura 2. 3. Orden de la red hídrica establecida por Strahler.
Fuente: (Mijares, 1989)

Longitud y pendiente promedio de la red hídrica. La longitud de la red hídrica es la suma de todos los afluentes naturales que forman parte del sistema de drenaje de la cuenca.

La pendiente promedio de la red hídrica representa cada una de las pendientes de los cauces que constituyen del sistema de drenaje, siendo un parámetro relevante para la evaluación de la respuesta de la cuenca frente a una tormenta y su potencial de erosión a partir de la velocidad de flujo (ETAPA EP, 2015).

Densidad de drenaje. Parámetro que establece la posible naturaleza de los suelos y el grado de cobertura de la cuenca. Además, identifica la dificultad que pueda presentar una cuenca hidrográfica al momento de descargar el agua en a una tormenta (Villón, 2002). Se expresa con la siguiente formula:

$$D_d = \frac{L_t}{A}$$

Donde:

D_d: densidad de drenaje.

L_t: longitud total de las corrientes (Km).

A: área total de la cuenca (Km²).

2.2. Caracterización del Flujo

2.2.1. Modelo hidrológico

Los modelos hidrológicos tienen una representación matemática, los cuales se basan en las leyes de conservación de masa, momento y varias formas de energía cuyo objetivo es la transformación de la precipitación en escurrimiento. En un análisis matemático, los modelos se idealizan de manera empírica, teórica y de solución numérica (Bergstrom, 2002).

Existen varias técnicas de modelación las cuales pueden ser aplicadas para todas las cuencas sin depender del su tamaño, lo que quiere decir es que no importa si su superficie es de poca, mediana o de gran magnitud (Arévalo, 2020).

2.2.2. Hidrograma

Un hidrograma es la representación gráfica de la variación del caudal con respecto al tiempo en un lugar específico. Además, se pueden definir como "una expresión integral de las características fisiográficas y climáticas que rigen las relaciones entre la lluvia y la escorrentía de una cuenca de drenaje particular" (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Existen dos tipos de hidrogramas relevantes:

Hidrograma Anual. Es una gráfica del caudal vs tiempo durante un año, representa el balance de la precipitación en ese periodo, la evaporación y el caudal en una cuenca hidrográfica.

Existen tres tipos principales de hidrogramas anuales:

- En la Figura 2. 4 se representa un hidrograma característico de un flujo continuo (perenne) típico en climas húmedos. Se puede observar que los máximos caudales son producto de las tormentas y se los conoce como escorrentía directa, por otro lado, cuando no existe la presencia de lluvias el flujo se mantiene constante y se denomina flujo base. Además, se debe tener en cuenta que la capacidad de la cuenca generalmente proviene del flujo base para un río perenne, es decir, que una gran cantidad de lluvia se infiltra en la hoya hidrográfica y generando flujo subterráneo.

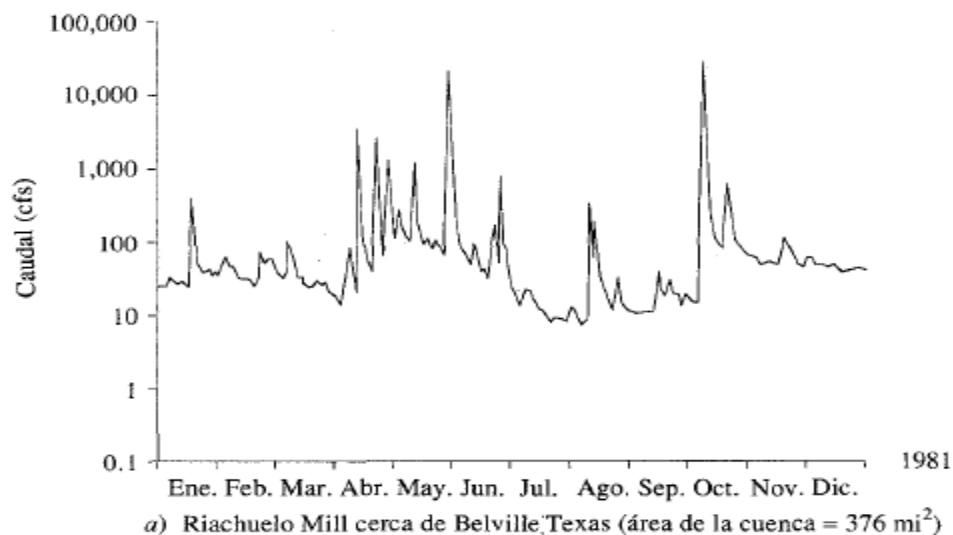


Figura 2. 4 Hidrograma Anual rio Perenne
Fuente: (Chow, 1994)

- En la Figura 2. 5 hace referencia a un río intermitente en un clima árido, donde existen extensos periodos de sequía. Se observa que la mayor parte de la tormenta se convierte en escorrentía directa y existe poca infiltración. En este caso la capacidad de la cuenca esta dada por la escorrentía directa generado por grandes tormentas.

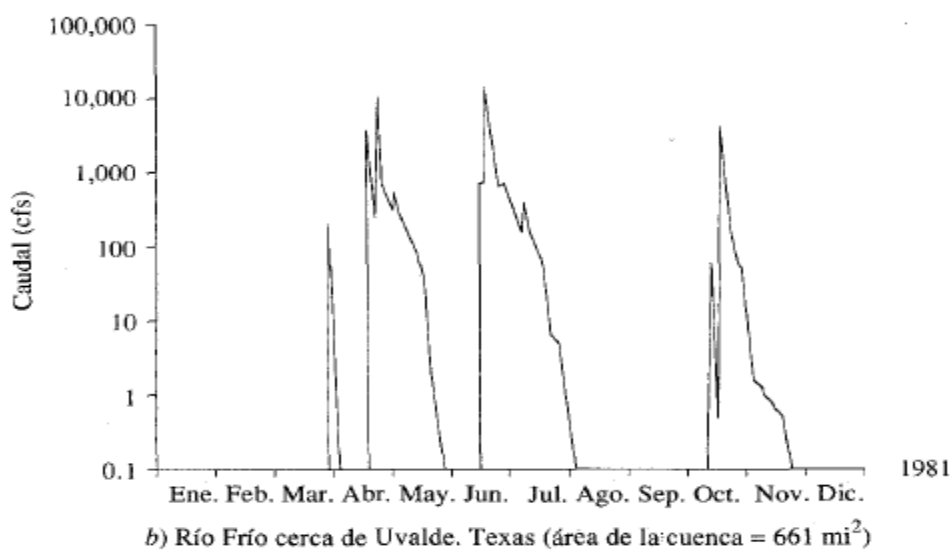


Figura 2. 5 Hidrograma Anual rio Efímero
Fuente: (Chow, 1994)

En la Figura 2. 6, se identifica un tercer hidrograma, el cual es característico de un río que se alimenta por el derretimiento de nieve. El gran volumen de agua que se almacena en la nieve, genera un hidrograma anual con una variación más suave a lo largo de todo el año con relación a las corrientes perennes o efémeras ilustradas con anterioridad.

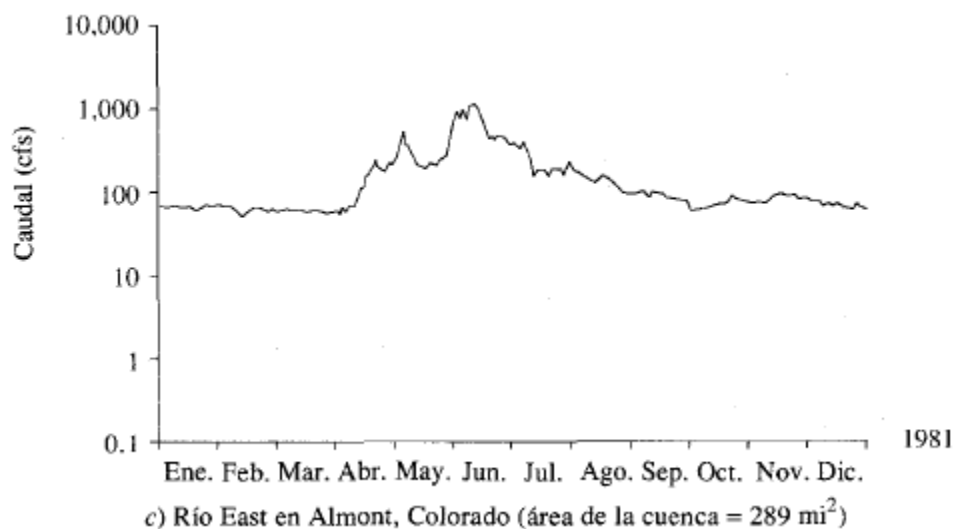


Figura 2. 6 Hidrograma Anual río fuente derretimiento de nieve
Fuente: (Chow, 1994)

Hidrograma de Tormenta. En la Figura 2. 7, se identifica un hidrograma de caudal durante una tormenta (pico de una creciente) con sus principales componentes:

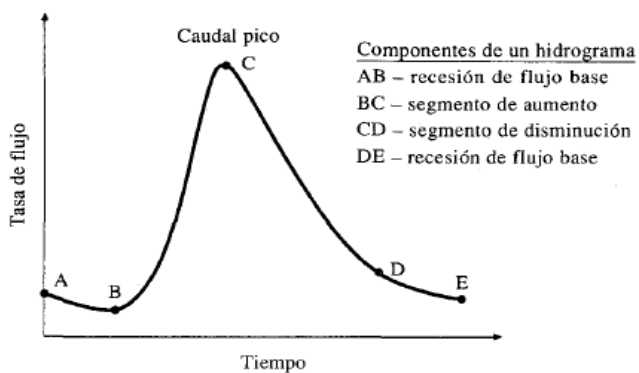


Figura 2. 7. Componentes de un hidrograma en una tormenta
Fuente: (Chow, 1994)

Es necesario establecer que la forma del hidrograma producido por una tormenta particular puede variar tanto por la cuenca hidrográfica o por la tormenta, sin embargo, es posible identificar de manera general sus componentes (Gómez, 2009). En la se observa Figura 2. 7 que en el segmento AB, el flujo base disminuye gradualmente antes de que comience la lluvia en forma intensa, en el punto B da inicio a la escorrentía directa donde alcanza su pico en el punto C y termina en el punto D. Finalmente, en el segmento DE se establece nuevamente una recesión normal del flujo base.

2.2.3. Hidrograma Unitario

Se define como el hidrograma de escorrentía directa resultante de exceso de lluvia, se puede considerar como un impulso unitario en un sistema lineal. Además, se establece como hidrograma unitario, debido a que el volumen de escorrentía bajo el hidrograma se ajusta generalmente a 1 cm o 1 pulgada (Figura 2. 8) (Kohler, 1977).

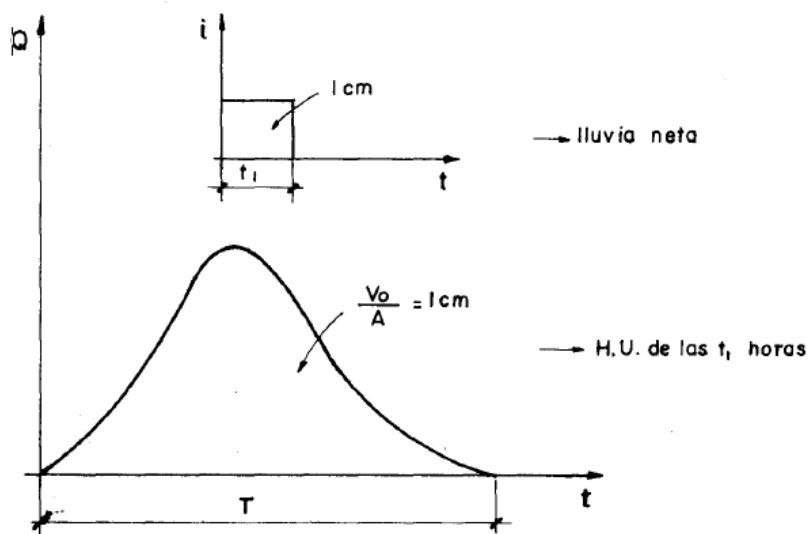


Figura 2. 8 Hidrograma Unitario
Fuente: (Chereque, 1989)

El hidrograma unitario es necesario para sintetizar los hidrogramas de una creciente a partir de una serie de períodos, los cuales se calculan utilizando las relaciones de escorrentía multiplicando el hidrograma unitario por el valor de escorrentía en el período. Al sumar los

incrementos del hidrograma y el flujo base estimado da como resultado el hidrograma total (Kohler, 1977).

2.2.4. Análisis de frecuencias

Un sistema hidrológico puede ser afectado en distintas ocasiones por eventos extremos, como lo son: sequías, tormentas y crecientes. El tamaño de un evento extremo es inversamente proporcional con su frecuencia de ocurrencia, es decir, eventos muy severos suceden con menor frecuencia que eventos más moderados (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

La finalidad de un análisis de frecuencia de información hidrológica, se basa en relacionar el tamaño de los eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia mediante el uso de distribuciones de probabilidad. Los resultados de este análisis de flujo de crecientes sirven para: el diseño de presas, puentes y estructuras de control de crecientes y para delimitar llanuras de inundación (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Periodo de retorno. Por definición un evento extremo sucede si una variable aleatoria X es mayor o igual que un cierto nivel x_τ . Siendo " τ " el intervalo de recurrencia de tiempo de $X > x_\tau$. Por otro lado, la probabilidad de ocurrencia de dicho evento $p = P(X > x_\tau)$, se representa por dos posibles resultados: éxito ($X > x_\tau$; probabilidad "p") o falla, ($X < x_\tau$; probabilidad "1 - p") (Chow, Maidment, & Mays, 1994). La probabilidad de un intervalo de recurrencia con una duración " τ " es el producto de las probabilidades de " $\tau - 1$ " fallas seguidas por un éxito, se expresa como:

$$E(\tau) = \sum_{\tau=1}^{\infty} \tau(1-p)^{\tau-1}p$$

Resolviendo la forma de expansión de la serie de potencia, se puede expresar como:

$$E(\tau) = \frac{p}{[1 - (1 - p)^2]} = \frac{1}{p} = T$$

En conclusión, se define que la probabilidad de ocurrencia de un evento es el inverso de su periodo de retorno (T), es decir:

$$P(X > x_\tau) = \frac{1}{T}$$

2.2.5. Modelo hidráulico.

Los modelos hidráulicos representan el estudio del campo hidrográfico, donde al igual que los modelos hidrológicos pueden ser representados matemáticamente mediante una simulación numérica. Estos modelos son usados para la resolución de problemas en estructuras hidráulicas, fenómenos de infiltración y el transporte de sedimentos (Sacoto, 2017).

Es importante un modelo hidráulico por los siguientes motivos: el manejo de redes; toma de decisiones en operación, mantenimiento, ampliación de sistemas; evitar instalaciones y desinstalaciones innecesarias y, por último, posibilita el análisis de calidad de agua. Para realizar esos modelos se requiere una representación virtual del terreno y un software computacional, el cual resolverá mediante técnicas o métodos numéricos que representa el fenómeno (Arévalo, 2020).

2.2.6. Modelos Matemáticos para flujos en superficie libre.

Ecuaciones de conservación de la masa y momento. Las leyes de conservación para canales están aplicadas en forma Lagrangeanos (sistemas fijos) y por otro lado en un sistema Euleriano, aplicados en lugares específicos en el espacio (White, 1991).

En términos fijos o Lagrangeanos se expresa como:

$$m = \rho\gamma = \text{constante}$$

En términos Eulerianos se interpreta como:

$$\frac{Dm}{Dt} = \frac{D}{Dt}(\rho\gamma) = 0 = \rho \frac{D\gamma}{Dt} + \gamma \frac{D\rho}{Dt}$$

Donde:

m = masa.

ρ = densidad.

γ = volumen del fluido.

Existe una relación entre $\frac{D\gamma}{Dt}$ y la velocidad del flujo, cuando la tasa normal de deformación es equivalente a la tasa de incremento del volumen de una partícula por unidad de volumen:

$$\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{1}{\gamma} \frac{D\gamma}{Dt}$$

Sustituyendo por las ecuaciones que relacionan las tasas de deformación con las velocidades en las 3 direcciones, se establece:

$$\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \text{div}V = \nabla \cdot V$$

Donde:

u, v, w = componentes de velocidad en las direcciones x, y, z .

Al combinar la ecuación Euleriana y la ecuación que relaciona las tasas de deformación con las velocidades, con la intención de eliminar γ (volumen del fluido), da como resultado la ecuación general de continuidad para flujos (White, 1991):

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \operatorname{div}V = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \operatorname{div}\rho V = 0$$

Además, considerando que el flujo es incompresible, es decir, la densidad es constante se reduce a:

$$\operatorname{div}V = 0$$

Con la finalidad de definir las ecuaciones de la conservación de momento, el análisis parte con la aplicación de la segunda ley de Newton:

$$F = m a$$

Donde:

F = vector fuerza.

m = masa de la partícula.

a = vector de aceleraciones.

Con el propósito de que la densidad trabaje en vez de la masa en el sistema de un flujo, se divide para el volumen de la partícula a analizar:

$$\rho \frac{DV}{Dt} = f = f_{\text{cuerpo}} + f_{\text{superficie}}$$

Donde:

f = fuerza aplicada por unidad de volumen sobre la partícula de fluido.

f_{cuerpo} = fuerza aplicada a toda la masa del elemento.

$f_{\text{superficie}}$ = fuerza aplicada por esfuerzos externos sobre los lados del elemento.

Las fuerzas aplicadas a toda la masa del elemento, debidos a factores externos como la gravedad o electromagnéticas, se las conoce como fuerzas del cuerpo, si no se toma en cuenta los efectos magneto-hidrodinámico y se consideran las fuerzas gravitatorias, se obtiene:

$$f_{cuerpo} = \rho g$$

Por otro lado, se conoce como fuerzas de superficie a aquellas fuerzas producida por esfuerzos externos sobre los lados del elemento, en la Figura 2. 9 se determina la convención de signos para los componentes de esfuerzo sobre un elemento cartesiano (Ochoa García, 2014).

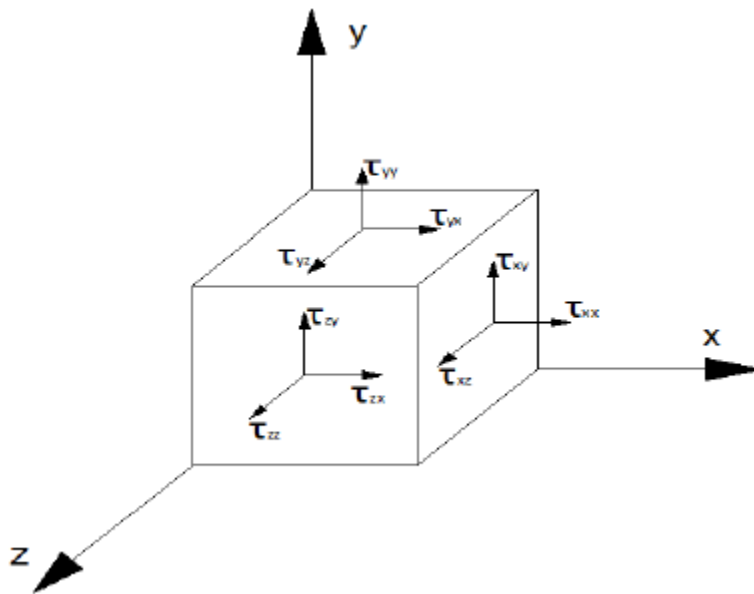


Figura 2. 9. Notación para los esfuerzos (τ_{ij} = esfuerzos en la dirección j sobre la cara normal al eje i).
Fuente: (Ochoa García, 2014)

El tensor de esfuerzos se expresa como:

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix}$$

Del tensor de esfuerzos se identifica que $\tau_{ij} = \tau_{ji}$ (tensor simétrico), necesario para equilibrar los momentos sobre los tres ejes:

$$dF_x = \tau_{xx} dydz + \tau_{yx} dx dz + \tau_{zx} dx dy$$

$$dF_y = \tau_{xy} dydz + \tau_{yy} dx dz + \tau_{zy} dx dy$$

$$dF_z = \tau_{xz} dydz + \tau_{yz} dx dz + \tau_{zz} dx dy$$

Para lograr un equilibrio en el elemento, se debe igualar con fuerzas opuestas de la misma magnitud. La obtención de la fuerza neta se lo realiza en el eje x derivando la fuerza diferencial en las tres caras en la orientación correspondiente:

$$dF_{x,net} = \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} dx \right) dydz + \left(\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} dy \right) dx dz + \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} dz \right) dx dy$$

Dividiendo el volumen del elemento y definiendo que $\tau_{ij} = \tau_{ji}$, se tiene la ecuación correspondiente a la línea superior del tensor de esfuerzos:

$$f_x = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z}$$

Adicionalmente, las fuerzas f_y y f_x se adquieren a partir de la segunda y tercera línea del tensor de esfuerzos. El vector resultante de las fuerzas se expresa como:

$$f_{superficie} = \nabla * \tau_{ij} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

Posteriormente, reemplazando las fuerzas de superficiales y de cuerpo en relación a la segunda ley de Newton para una partícula de un fluido, se concluye (White, 1991):

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho g + \nabla * \tau_{ij}$$

A través de esta ecuación, expresa el tensor de deformaciones en términos del vector velocidad, mediante la hipótesis de una ley de la tasa de deformación viscosa de un fluido Newtoniano, se alcanza a las relaciones de Navier Stokes (Ochoa García, 2014).

Ecuaciones de Navier Stokes. Esta ecuación, considera una hipótesis basada en que el esfuerzo viscoso, es linealmente proporcional a la tasa de deformación en la partícula de un fluido, la cual es aplicada a los gases y los fluidos en general (Panton, 2013). Además, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El tensor de esfuerzos “ τ_{ij} ” es una función lineal de la tasa de deformación “ ϵ_{ij} ”, generando un fluido continuo.
- La ley de deformación no depende de los ejes coordenados (propiedades son independientes de la dirección), es decir, un fluido isotrópico.
- Sí, la tasa de deformación es cero, se debe reducir la ley de deformación hasta obtener una presión hidrostática.

Las ecuaciones que rigen el movimiento de un flujo Newtoniano incompresible son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes. En notación vectorial, los fluidos homogéneos, se expresa de la siguiente forma (Panton, 2013):

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} + (V * \nabla) * V \right\} = -\nabla \hat{p} + \mu \nabla^2 V$$

Donde:

μ = viscosidad dinámica del fluido.

\hat{p} = presión piezométrica.

Esta ecuación presenta cuatro incógnitas, debido a cada componente del vector de la velocidad “V” y la presión termodinámica “p”. Para su resolución, se debe tener en cuenta la ecuación de la continuidad expuesta con anterioridad.

En las siguientes ecuaciones, se considera las tres coordenadas ($x_1 = x$, $x_2 = y$, $x_3 = z$) y los tres componentes del vector velocidad ($u_1 = u$, $u_2 = v$, $u_3 = w$), obteniendo:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}$$

Donde:

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$ es la viscosidad cinemática.

2.2.7. Software Modelo Bidimensional IBER.

IBER es un software basado en modelo numérico, el cual genera un flujo turbulento en lámina libre con régimen no permanente. Su aplicación alcanza la evaluación de zonas inundables, hidrodinámica fluvial, el cálculo de transporte de sedimentos, el flujo de marea en estuarios y la simulación de rotura de presas (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2014).

El programa resuelve las ecuaciones de aguas poco profundas promediadas, conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE) o ecuaciones de Saint Venant bidimensionales (conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales) (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2014). Las ecuaciones se ajustan a una distribución de presión hidrostática y la velocidad presenta una distribución uniforme generándose en ríos y estuarios. Por lo tanto, las hipótesis mencionadas con

anterioridad se generan regularmente en ríos y estuarios. Sin embargo, debido a la generación de flujos tridimensionales, estas hipótesis no cumplen con la distribución del flujo (Ochoa García, 2014).

Aplicando el método de volúmenes finitos se puede llegar a la resolución de las ecuaciones hidrodinámicas, donde es necesario clasificar espacialmente la zona de estudio, generando una malla de cálculo acorde a la discretización (Ochoa, y otros, 2016).

2.2.8. Ecuaciones hidrodinámicas para flujo en superficie libre.

El módulo hidrológico se soluciona a partir de las ecuaciones de la conservación de la masa y de momento en las dos direcciones horizontales, representadas a continuación (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2014):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial hU_x}{\partial t} + \frac{\partial hU_x^2}{\partial x} + \frac{\partial hU_xU_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \sin \lambda U_y + \frac{\partial h\tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial y} + M_x$$

$$\frac{\partial hU_y}{\partial t} + \frac{\partial hU_xU_y}{\partial x} + \frac{\partial hU_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{g}{\rho} \frac{h^2}{2} \frac{\partial p}{\partial y} + 2\Omega \sin \lambda U_x + \frac{\partial h\tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h\tau_{yy}^e}{\partial y} + M_y$$

Donde:

h = calado.

U_x, U_y = velocidades horizontales promediadas en profundidad.

g = aceleración de la gravedad.

Z_s = elevación de la lámina libre.

τ_s = fricción en la superficie libre debido al rozamiento producido por el viento.

τ_b = fricción debido al rozamiento del fondo.

ρ = densidad del agua.

Ω = velocidad angular de rotación de la tierra.

λ = latitud del punto considerado.

$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$ = tensiones tangenciales efectivas horizontales.

M_s, M_x, M_y = términos fuente / sumidero de masa y de momento.

2.2.9. Tipos y Estados de Flujo.

Tipos de flujo. El flujo en canales naturales puede comportarse de diferentes formas y según su comportamiento definir un cierto tipo de flujo. La siguiente clasificación se establece de acuerdo al cambio en la profundidad del flujo en relación al tiempo y al espacio (Chow, 1994).

A partir del criterio tiempo el flujo se puede clasificar en:

- A. Flujo Permanente. Se considera permanente cuando la profundidad de flujo no varía con respecto al tiempo, generalmente cuando el flujo es permanente el caudal es constante y continuo, satisfaciendo la ecuación de la continuidad:

$$Q = A_{s1} * V_1 = A_{s2} * V_2$$

Donde:

Q = Caudal del flujo (m³/s).

A_s = área de la sección transversal (m²).

V = velocidad de flujo (m/s).

- B. Flujo no permanente. Un flujo no permanente se considera, si la profundidad de flujo cambia con respecto al tiempo.

De igual manera, los flujos se pueden clasificar a partir del criterio espacio:

- A. Flujo uniforme (fundamental), producido si la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal abierto.
- B. Flujo variado, considerado cuando el flujo cambia a lo largo del canal (producido por las salidas y entradas del agua en el curso).

Además, el flujo variado puede clasificarse en:

- a. Flujo gradualmente variado, producido si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en distintas relativamente pequeñas.
- b. Flujo rápidamente variado, conocido como un fenómeno local (resalto hidráulico, caída hidráulica).

Para una mejor interpretación, a continuación, se presenta la clasificación de flujos en canales abiertos estableciendo los criterios espacio y tiempo (Chow, 1994):

- A. Flujo permanente
 - 1. Flujo uniforme
 - 2. Flujo variado
 - 2.1. Flujo gradualmente variado
 - 2.2. Flujo rápidamente variado
- B. Flujo no permanente
 - 3. Flujo uniforme no permanente
 - 4. Flujo variado no permanente
 - 4.1. Flujo gradualmente variado no permanente
 - 4.2. Flujo rápidamente variado no permanente

Estados de flujo. El comportamiento del flujo en canales abiertos se determina fundamentalmente por los alcances de la viscosidad y la gravedad en relación con las

fuerzas inerciales del flujo. El efecto de la viscosidad se puede presentar en flujo laminar, turbulento o transicional en relación con la inercia.

Se produce un flujo laminar si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación a las fuerzas inerciales, además, las partículas de agua se trasladan en recorridos suaves definidas (líneas de corriente). Un flujo turbulento es generado si las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales, las partículas se desplazan en recorridos irregulares. De igual manera, entre los estados de flujo laminar y turbulento existe un estado mixto denominado transicional (Chow, 1994).

El número de Reynolds, representa el efecto de la viscosidad en relación con la inercia:

$$Re = \frac{VL_a}{\nu} = \frac{\text{Inercia}}{\text{Viscosidad}}$$

Donde:

V = velocidad.

L_a = longitud característica / radio hidráulico R de un conducto.

ν = viscosidad cinemática.

El número de Reynolds se considera pequeño si el flujo es laminar, por otro lado, se considera turbulento cuando el número de Reynolds es grande. Los estados laminar, turbulento y transicional de un flujo en canales abiertos se pueden expresar a través de un diagrama donde se relaciona el número de Reynolds y la ecuación de Darcy-Weisbach.

Además, se debe considerar que en el estado de flujo existe el efecto de la gravedad, definida por la relación entre las fuerzas inerciales y gravitacionales, conocida como el número de Froude (Chow, 1994):

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL_a}}$$

Donde:

V = velocidad del flujo.

g = aceleración de la gravedad.

L_a = longitud característica / profundidad hidráulica D en canales abiertos.

En la Tabla 2. 1 se define los valores para los regímenes de flujo en canales abiertos por los efectos producidos por la viscosidad y la gravedad:

Tabla 2. 1. Regímenes de Flujo.

Régimen de flujo	Froude (Fr)	Reynolds (Re)
Subcrítico - laminar	< 1	rango laminar
Supercrítico - laminar	> 1	rango laminar
Supercrítico - turbulento	< 1	rango turbulento
Subcrítico - turbulento	> 1	rango turbulento

Fuente: (Chow, 1994)

2.2.10. Módulo de turbulencia

El análisis de flujos en lámina libre, generalmente en flujos poco profundos o aguas someras, es decir, relaciones mínimas entre dimensiones vertical y horizontal. Usualmente, la mayor parte de flujos en lámina libre son turbulentos, en los cuales se observan la generación de pequeños remolinos en el cauce, generando los principales procesos de mezcla y difusión de sustancias solubles, de sólidos en suspensión, entre otros.

En determinadas condiciones, la turbulencia no es lo suficientemente alta para influir en los cambios de velocidades medias en el cauce, uno de los casos es el flujo en ríos ubicados en zonas costeras constituidos por una geometría suavizada, en el cual no se producen zonas de recirculación en planta. No obstante, un punto relevante de la modelación hidrodinámica es la turbulencia, ya que es un parámetro primordial en los procesos de

transporte y mezcla de contaminantes y sedimentos (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2014).

En el siguiente apartado se presentan modelos de turbulencia para aguas someras aplicados en diversos modelos tipo RANS, por orden progresivo de complejidad:

- Viscosidad turbulenta constante.
- Modelo parabólico.
- Modelo de longitud de mezcla.
- Modelo k-ε de Rastogi y Rodi (Rastogi y Rodi, 1978).

Una de las principales aplicaciones de los modelos de turbulencia es definir las tensiones de Reynolds, en los cuales se basan en la hipótesis de Boussinesq, las tensiones de Reynolds se evalúan a partir de la expresión (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2014):

$$-u_i u_j = V_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}$$

Donde:

V_t = viscosidad turbulenta.

K = energía cinética turbulenta.

$u_i u_j$ = tensiones turbulentas.

Un modelo de longitud de mezcla se usa en canales con lámina libre con curvas pronunciadas y zonas de recirculación, es decir, un modelo k-ε. Además, se debe tener en cuenta que la selección del modelo de turbulencia más adecuado se establece en base a la experiencia del usuario, teniendo en consideración que mientras mayor sea la complejidad del modelo, su cálculo tomará mayor tiempo y por ende la resolución será más complicada.

Modelo k-ε de Rastogi y Rodi (1978). Es un modelo de cálculo, el cual soluciona una ecuación planteada para la energía cinética turbulenta “k” y para la tasa de disipación de energía turbulenta “ε”. Además, se debe tomar en cuenta que el modelo considera el rozamiento del fondo, gradientes de velocidad, disipación y el transporte convectivo. El modelo” k-ε”, se define por las siguientes ecuaciones (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2014):

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(V + \frac{V_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2V_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(V + \frac{V_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2V_t S_{ij} S_{ij} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$V_t = c_u \frac{k^2}{\varepsilon} \quad c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{\varepsilon 2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho |U|^2}$$

Constantes:

$$c_u = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.31$$

Donde:

K = energía cinética turbulenta.

ε = es la tasa de disipación de turbulencia.

S_{ij} = es el tensor de deformación.

U_f = velocidad de fricción de fondo.

Este modelo es aplicable para flujos turbulentos en aguas someras proporcionando resultados veraces. No obstante, los resultados necesitan ser analizados y valorados de forma crítica, para lo cual es fundamental la experiencia del usuario en la modelización de flujos turbulentos (Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, 2014).

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LOS MDE

Capítulo III

Análisis de las Características Morfológicas de los MDE

3.1. Descripción de los Modelos Digitales

Para la implementación en el modelo hidrodinámico, se analizará la utilización 4 tipos de MDE, los cuales serán diferenciados por su resolución y procedencia, detallados a continuación:

3.1.1. Modelo Digital Resolución 3 metros.

El MDE con resolución espacial de 3 metros (Figura 3. 1), se obtuvo a partir de las fotografías aéreas tomadas por la Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica del Ecuador (SIGTIERRAS), entidad que proporciona información para la planificación y desarrollo y ordenamiento territorial. Además, el levantamiento territorial cuenta con una resolución espacial de 3m para la región Sierra, 4m para la región Costa y 5m para la región Amazónica con una precisión altimétrica de 1,5 m en Costa y Sierra, y 3m en la Amazonía (SIGTIERRAS, 2019).

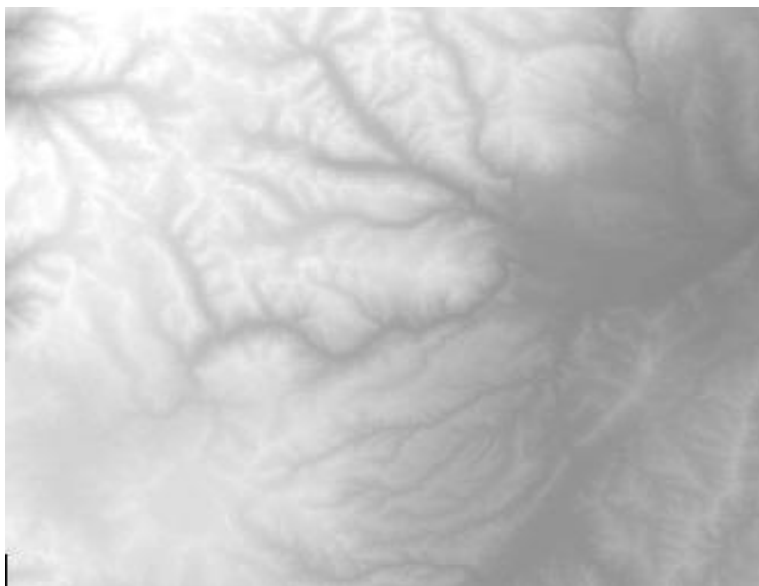


Figura 3. 1. Modelo Digital de Elevación tamaño 3 metros.

Fuente: (SIGTIERRAS, 2016)

3.1.2. Modelo Digital Resolución 12.5 metros.

El MDE con resolución de 12.5 metros (Figura 3. 2) procede del servidor Earth Data proporcionado por la NASA que abarca la recopilación, análisis y presentación de datos. El satélite ALOS esta conformado por 3 sistemas independientes (PRSIM, AVNIR-2, PALSAR), los cuales obtienen fotografías ópticas y RADAR con varias resoluciones y coberturas. La imagen fue tomada a partir del satélite ALOS PALSAR, el cual fue lanzado en enero del 2006 por la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), proporcionando información con resolución espacial de 6.25 a 12.5 metros (GeoSpatial, 2013).

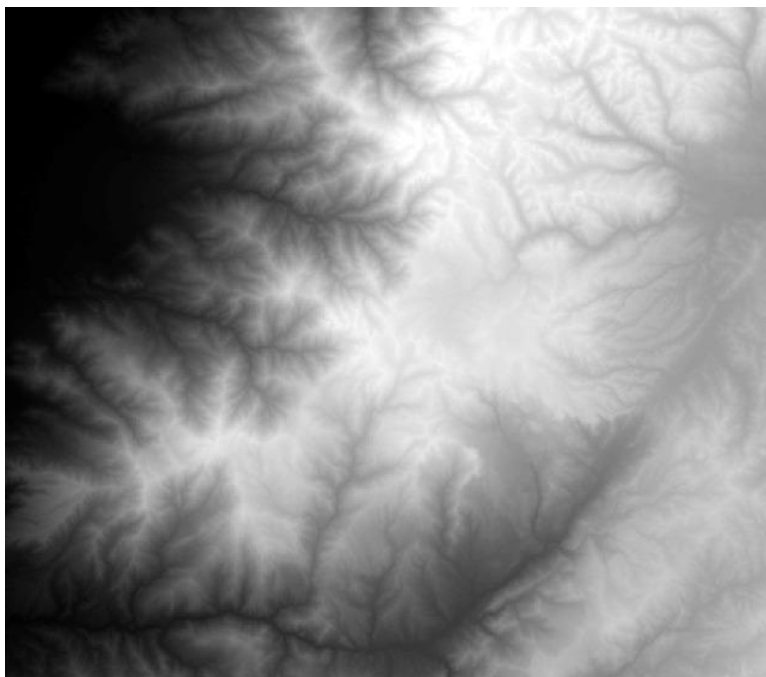


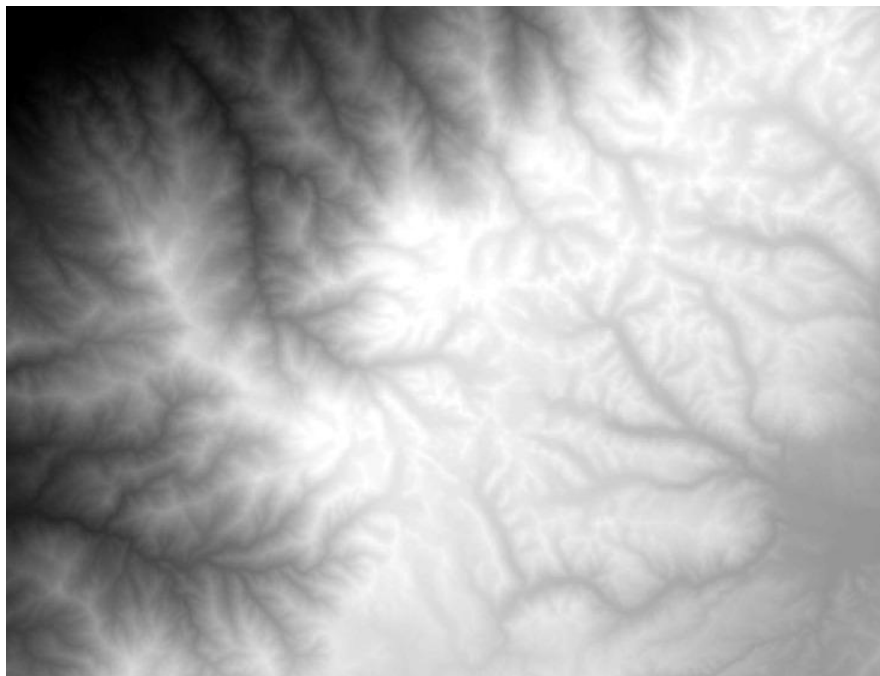
Figura 3. 2. Modelo Digital de Elevación tamaño 12.5 metros.

Fuente: (Earth Data, 2010)

3.1.3. Modelo Digital Resolución 30 metros.

El MDE de 30 metros (Figura 3. 3) se obtuvo a través de la herramienta USGS EarthExplorer, cuyo objetivo es brindar gratuitamente imágenes satelitales, fotografías aéreas y productos cartográficos de varias fuentes. La imagen fue tomada por el satélite

ASTER, lanzado entre los años 2009 y 2013, el cual captura datos de alta resolución espacial en 14 bandas, desde las longitudes de onda visibles hasta las infrarrojas térmicas, proporcionando capacidad de visualización estéreo para la creación de modelos de elevación digital. Además, su lanzamiento se produjo por la cooperación, el cual se generó por convenios entre la NASA, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI) y Japan Space Systems (J-spacesystems), con la finalidad de acceder a la generación de mapas detallados de la temperatura, reflectancia y elevación de la superficie del terreno (NASA, 2004).

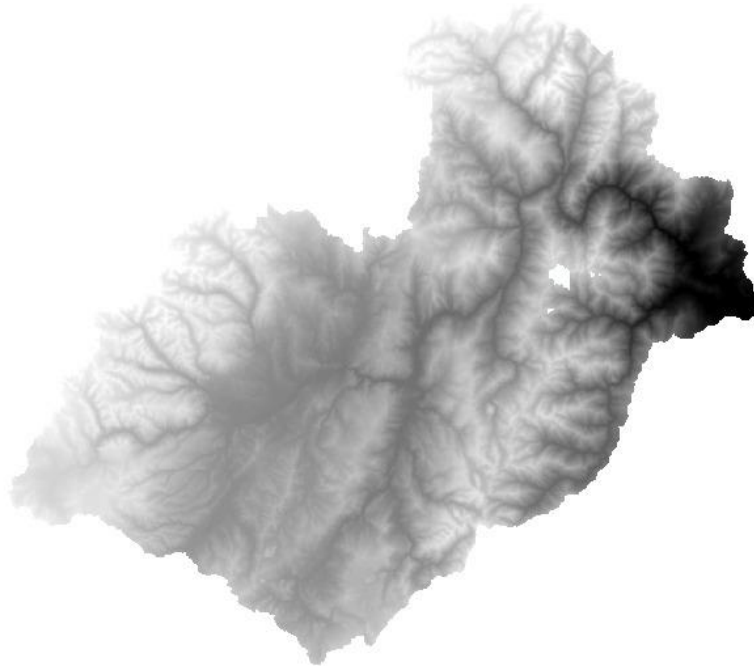


*Figura 3. 3. Modelo Digital de Elevación tamaño 30 metros.
Fuente: (Earth Data, 2013)*

3.1.4. Modelo Digital Resolución 50 metros.

El MDE de 50 metros (Figura 3. 4) de resolución fue proporcionado por el satélite TRMM, el cual formó parte de un proyecto de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) conjunta entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA) para estudiar la lluvia para el clima y la investigación climática. El satélite fue lanzado a finales de noviembre de 1997 y terminó de recopilar datos el 15 de abril de 2015, generando

información durante 17 años. Los datos proporcionados ayudan a determinar la precipitación y a investigaciones de la estructura y evolución del ciclón tropical. Además, sirve de respaldo para aplicaciones operativas como el monitoreo de inundaciones, sequías y el pronóstico del tiempo (NASA, 2018).



*Figura 3. 4. Modelo Digital de Elevación tamaño 50 metros.
Fuente: (Geoportal de la Universidad del Azuay, s.f.)*

3.2. Análisis de las Características Morfométricas de los MDE

En el estudio de los diferentes Modelos Digitales de Elevación, se planteó el análisis de la cuenca del río Yanuncay y el tramo de estudio (Puente Av. Loja hasta el Jardín Botánico de Cuenca) con el propósito de determinar sus parámetros morfométricos.

El análisis se basa en obtener las características principales de una cuenca hidrográfica tales como: superficie, perímetro, elevación máxima, mínima y media, pendiente promedio, longitud del eje del río principal, orden de la red, longitud y pendiente promedio de la red hídrica, coeficiente de compacidad, curva hipsométrica, índice de forma y relación de elongación, densidad de drenaje, coeficiente de masividad.

Para la obtención de los parámetros se utilizó el software ArcGIS, en el cual se procesa cada MDE de 3, 12.5, 30 y 50 metros de resolución, a través de las diferentes herramientas que describen las características morfológicas de la superficie.

3.2.1. Parámetros superficiales.

Superficie y perímetro de la cuenca. En la representación de la superficie de la cuenca del río Yanuncay se define a partir del espacio delimitado por la curva del perímetro tomando como punto de interés la unión con el río Tarqui, proporcionando su delimitación a partir de los diferentes MDE dando como resultado cuenca hidrográficas con una geometría similar. Sin embargo, se puede observar en la Figura 3. 5 que la delimitación de la cuenca varía según la resolución, generando cambios notorios en la imagen de 50 m.

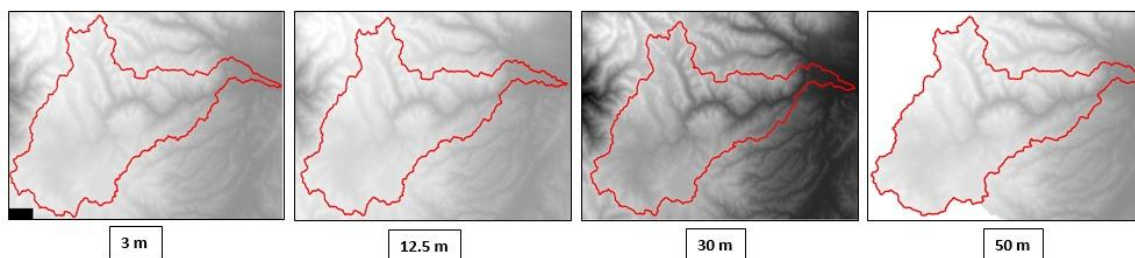


Figura 3. 5. Delimitación de la cuenca del río Yanuncay con diferentes MDE.

Fuente: Propia.

Como se puede observar en la Tabla 3. 1, la superficie generada por el MDE de 3m, 12.5m y 30m varía $\pm 0.6\%$ entre ellas. Sin embargo, existe una variación mayor al 2% en la superficie de 50m con respecto de las otras. Por otro lado, en el perímetro existe una gran diferencia entre los valores de cada MDE, incrementando su longitud mientras la resolución de la imagen mejora.

Tabla 3. 1. Superficie y perímetro de la cuenca del río Yanuncay.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Superficie	414.48	415.76	413.20	404.06	Km ²
Perímetro	148.21	143.42	139.57	137.58	Km

Fuente: Propia

El área obtenida por los diferentes MDE no presentan una dispersión considerable que afecte su clasificación a partir de su tamaño, como se puede observar en la Tabla 3. 2 la cuenca del río Yanuncay es categoriza como Intermedia-Pequeña.

Tabla 3. 2. Clasificación de tamaños de cuencas hidrográficas

Clasificación	Área(km²)
Microcuenca	< 25
Pequeñas	25 a 250
Intermedia - pequeña	250 a 500
Intermedia - grande	500 a 2500
Grande	2500 a 5000
Muy Grande	> 5000

Fuente: (Campos Aranda, 1998)

Elevación máxima, mínima y media. Con respecto a las elevaciones de la cuenca existe un intervalo de variación máximo comprendido entre ± 50 metros que se genera en los Modelos Digitales de Elevación (Tabla 3. 3).

Tabla 3. 3. Elevación máxima, mínima y media de la cuenca del río Yanuncay.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Elevación Máxima	4264.99	4315.34	4293.82	4278.35	m.s.n.m
Elevación Mínima	2521.88	2515.38	2522.15	2560.00	m.s.n.m
Elevación Media	3607.82	3625.84	3611.29	3642.40	m.s.n.m

Fuente: Propia

La Cuenca del río Yanuncay nace en el Parque Nacional Cajas, formando parte de la cordillera de los Andes, su gran cadena montañosa, ríos, lagos, vegetación, etc, son parte de su paisaje. La altitud máxima se encuentra registrada al suroccidente del parque, con una elevación de 4445 m.s.n.m. (INSIGMA, 2018), comparando con las altitudes máximas obtenidas de la Tabla 3. 3, se aprecia valores aproximados y relacionados con la altura máxima del parque. Por otro lado, la culminación del cauce se encuentra dentro de la ciudad de Cuenca, donde la altitud promedio de la ciudad se encuentra entre los 2560 m.s.n.m. (Espinoza Veinitimilla, 2013), siendo un valor aproximado las elevaciones son similares y se encuentran dentro del rango altitudinal presente en la ciudad.

Pendiente promedio de cuenca. El análisis de las pendientes de la cuenca se realizó a través de la herramienta Slope, posteriormente se reclasificó en porcentajes con intervalos de 10, con la finalidad de interpretar de mejor manera los resultados, como se puede identificar en la Figura 3. 6. En los modelos digitales de 3 y 12.5 m se puede apreciar que existe una gran similitud en sus pendientes. Por lo contrario, las imágenes de 30 y 50 m identifican pendientes en un rango más elevado, doblando los valores correspondientes a las imágenes de 3 y 12.5 m (Tabla 3. 4).

Tabla 3. 4. Pendiente promedio de la cuenca a partir de los diferentes MDE

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Pendiente promedio de la cuenca	6.75	7.59	13.12	16.53	%

Fuente: Propia

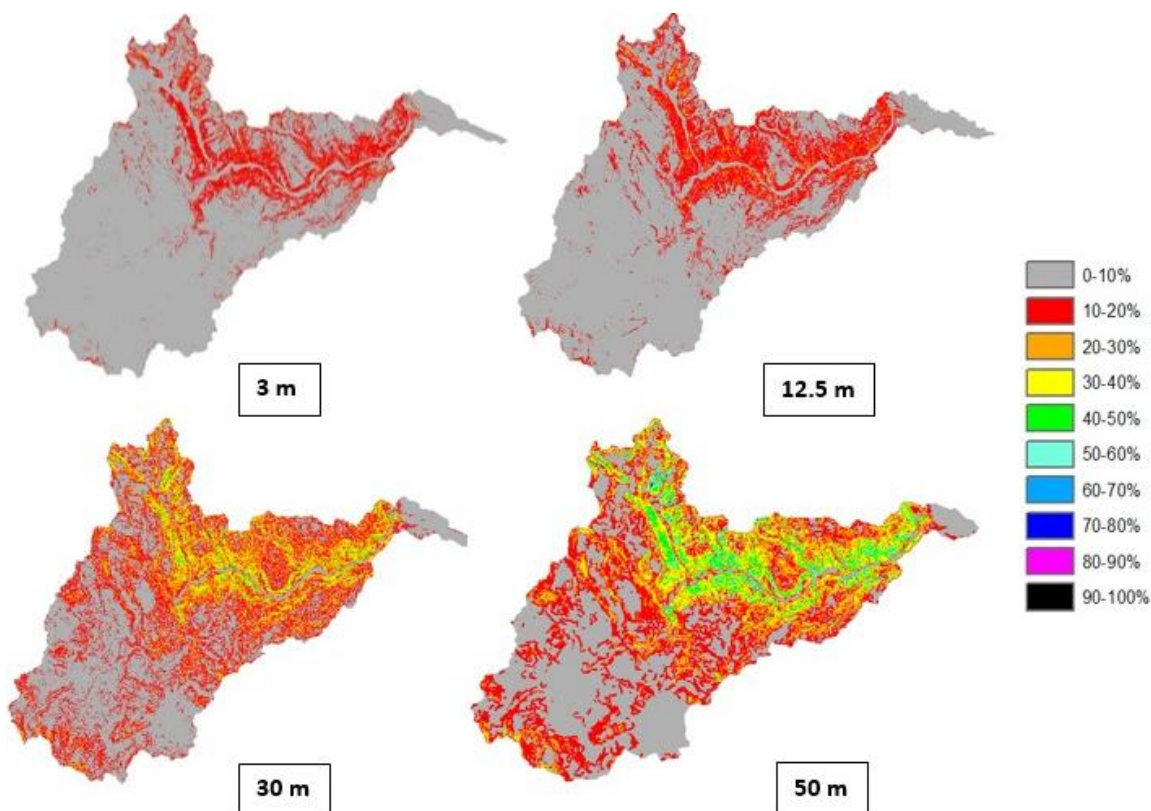


Figura 3. 6. Mapa de pendientes de la cuenca del río Yanuncay con diferentes MDE.

Fuente: Propia

En la Figura 3. 7, se puede observar que en los diferentes MDT en toda la superficie predomina las pendientes de 0 – 10 % sobre el resto, siendo más notable en las imágenes de 3 y 12.5 m, donde ocupa más del 50% de su extensión. Además, se puede observar una tendencia negativa en todos los modelos mientras mayor es la pendiente. Por otro lado, los modelos de 30 y 50 m, registran pendientes mayores, donde a partir del 20% representa una mayor extensión con respecto a los otros modelos e identifican pendientes hasta el 60%, cubriendo aproximadamente un 15% de la superficie de su cuenca.

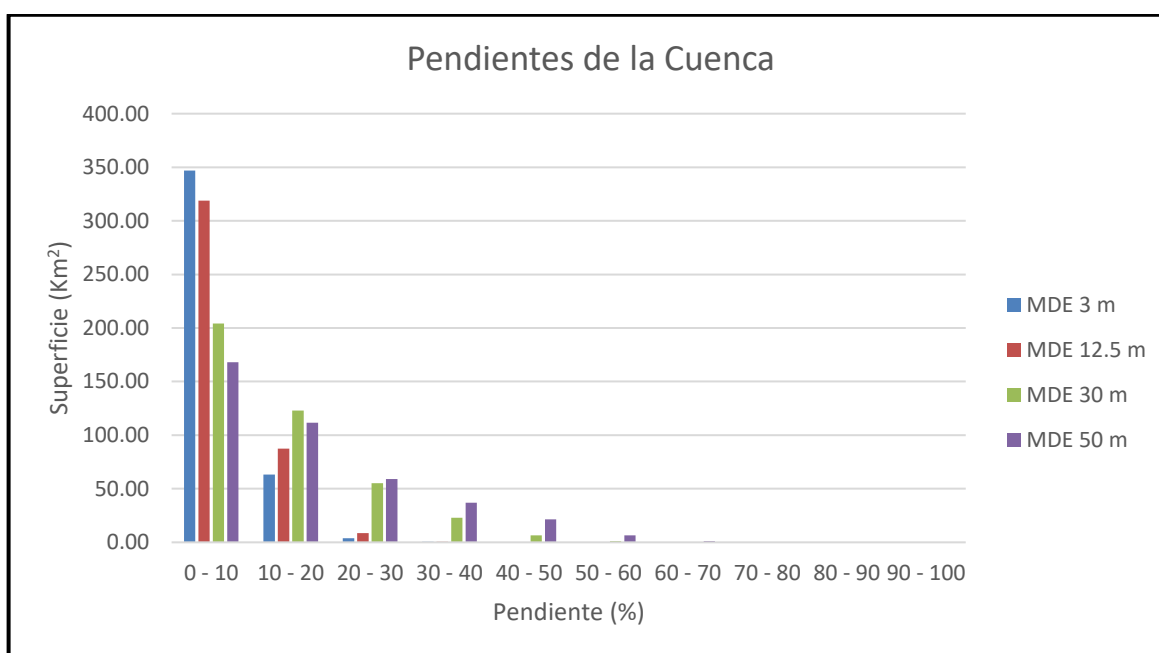


Figura 3. 7. Extensión de pendientes
Fuente: Propia

Las pendientes medias generadas por los diferentes modelos de digitales proporcionan diversos valores que influyen en una clasificación para identificar el tipo de terreno que constituyen la cuenca hidrográfica, estableciendo a los MDE de 3 y 12.5 m como un tipo de terreno Accidentado Medio y los MDE de 30 y 50 m como un terreno accidentado (Tabla 3. 5).

Tabla 3. 5. Rangos de pendientes y tipos de terrenos.

Rango de Pendiente (%)	Tipo de Terreno
0 - 2	Plano
2 - 5	Suave
5 - 10	Accidentado medio
10 - 15	Accidentado
15- 25	Fuertemente Accidentado
25 -50	Escarpado
> 50	Muy Escarpado

Fuente: (Gámez, 2009)

La superficie de la cuenca se encuentra rodeada de cadenas montañosas, debido a que forma parte de la Cordillera de los Andes, las zonas comprendidas entre Soldados, Barabón y parte de la parroquia San Joaquín se registran las mayores pendientes, ya que están situadas en las zonas más accidentadas de la cuenca. Por otra parte, en la zona urbana de Cuenca las pendientes disminuyen considerablemente debido a que la ciudad se encuentra asentada en un valle.

Curva hipsométrica. En relación a las curvas hipsométricas obtenidas por los diferentes MDE de la cuenca del río Yanuncay, se tiene como resultado la misma forma evaluando la superficie con respecto a su altitud (Figura 3. 8). Consecuentemente, las curvas obtenidas no infieren en su clasificación potencial evolutiva, formando una curva intermedia en fase de equilibrio denominada Adulta o Madura (Figura 3. 9).

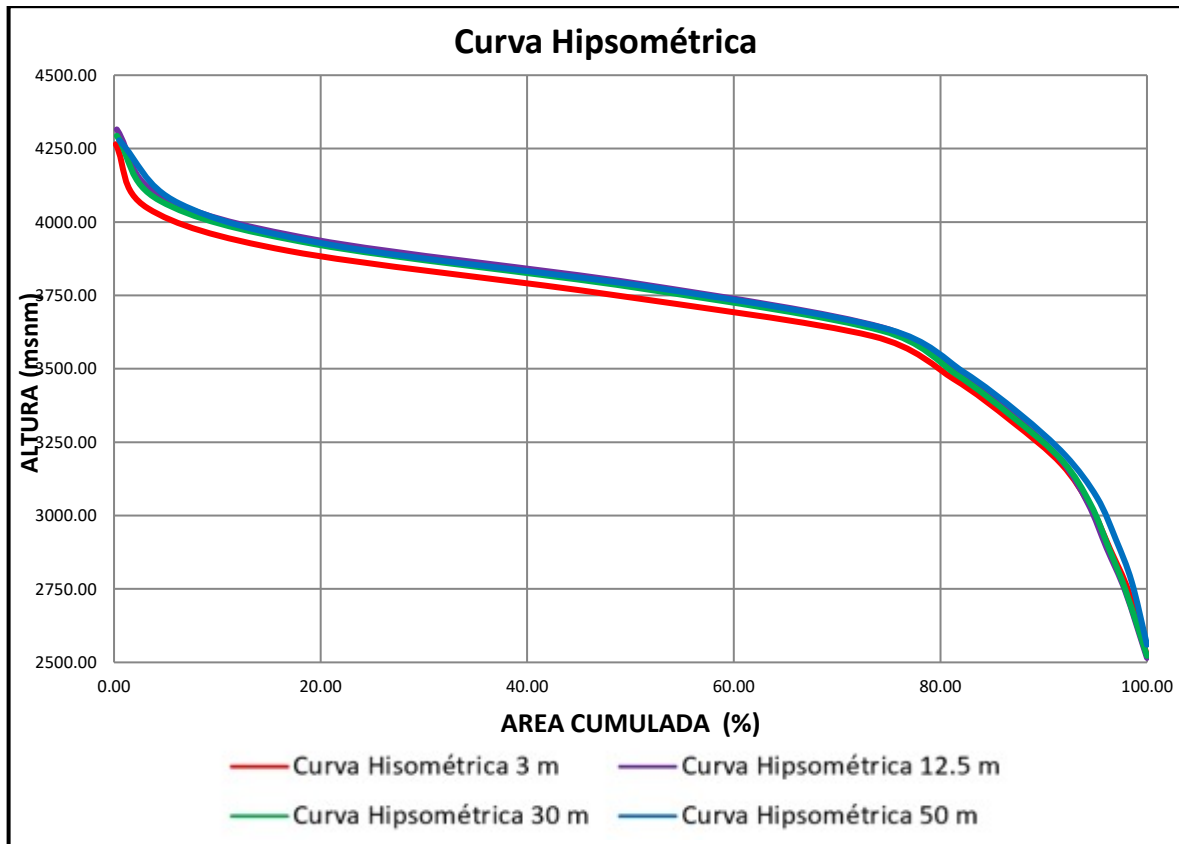


Figura 3. 8. Curvas hipsométricas de la cuenca del río Yanuncay generadas por los diferentes MDE
Fuente: Propia

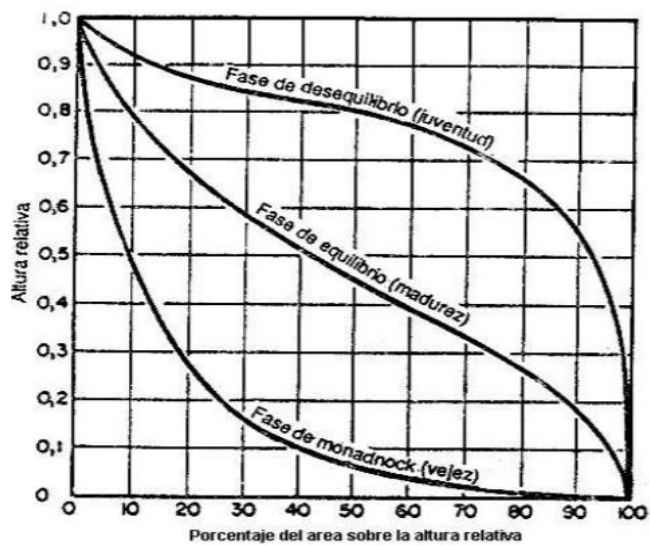


Figura 3. 9. Curvas Hipsométricas – Potenciales Evolutivos.
Fuente: (Guerra & González, 2002)

La curva hipsométrica de la cuenca del río Yanuncay, presenta en su inicio una pendiente fuerte desde la altitud 4270 hasta 4100 m.s.n.m aproximadamente, a partir de los 4100 hasta los 3600 m.s.n.m, tiene una pendiente ligeramente suave, la cual indica la existencia de llanuras lo que representa un posible peligro de inundación y un bajo potencial erosivo, además se observa que a partir de la altitud 3600 a 2500 m.s.n.m la curva tiene una pendiente moderadamente fuerte representando zonas montañosas y erosión mínima.

Coefficiente de compacidad (Kc). En la evaluación del coeficiente que relaciona el perímetro con el área de un círculo semejante al de cuenca, se determinó que los valores obtenidos de los MDE 3, 12.5, 30, 50 metros son similares como se puede observar en la Tabla 3. 6.

Tabla 3. 6. Coeficiente de compacidad obtenidos a partir de los diferentes MDE.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Kc	2.05	1.98	1.94	1.93	-

Fuente: Propia

Tabla 3. 7. Clasificación del índice de compacidad de Gravelius.

Valores de "Kc"	Tipos o clases de formas
de 1.00 a 1.25	de casi redonda a oval redonda
de 1.26 a 1.50	de oval redonda a oval oblonga
de 1.51 a 1.75	de oval oblonga a rectangular oblonga
>1.75	Rectangular oblonga

Fuente: (Gaspari, y otros, 2012)

Con respecto a los resultados, debido a su semejanza no afectan la clasificación de la Tabla 3. 7, identificando a la cuenca del río Yanuncay como Rectangular Oblonga, es decir predomina la longitud en su forma.

Factor de forma. El cálculo de la relación de Horton permite identificar la forma de la cuenca, proporcionando resultados similares en los diferentes modelos digitales de 3,

12.5, 30 y 50 metros (Tabla 3. 8). Usando el sistema de categorización de la Tabla 3. 9, los resultados obtenidos no infieren en su clasificación, definiendo la forma de la cuenca como Ligeramente Alargada.

Tabla 3. 8. Factor de forma obtenidos a partir de los diferentes MDE

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Factor de forma	0.31	0.30	0.32	0.36	-

Fuente: Propia

Tabla 3. 9. Valores interpretativos del factor de forma.

Valores Aproximados	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 ensachada
0.45 - 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 - 0.80	Ensanchada
0.80 - 1.2	Muy ensachada
>1.2	Redondeado el desague

Fuente: (Horton, 1932)

La cuenca del río Yanuncay al tener un factor de forma bajo (Alargada), tiene menor probabilidad de poseer una lluvia intensa simultáneamente sobre toda su área, además, el escurrimiento tarda en concentrarse, a diferencia de una cuenca de forma redonda (Horton, 1932).

Relación de elongación. Con respecto a la elongación, el cual relaciona el diámetro de un círculo con la longitud y área de la cuenca, se determinó los resultados expuestos en la Tabla 3. 10, los cuales se encuentran en un rango de 0.6 – 0.8, según el sistema de clasificación de la Tabla 3. 11, definiendo a la cuenca del río Yanuncay como “Amplia variedad de climas y geología con fuertes relieves y pendientes”.

Tabla 3. 10. Relación de elongación.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Relación de elongación	0.63	0.62	0.64	0.68	-

Fuente: Propia

Tabla 3. 11. Clasificación relación de elongación.

Rango	Clasificación
0.6 - 0.8	Amplia variedad de climas y geología está asociada a fuertes relieves y pendientes fuertes
Cercanos a 1.00	Regiones con relieve suave bajo

Fuente: (Campos Aranda, 1998)

A lo largo del recorrido del río Yanuncay, se encuentran diversos ecosistemas, desde cadenas montañosas, paramos y valles con una amplia variedad de pendientes y climas.

Coefficiente de masividad. Al relacionar la elevación media y la superficie de la cuenca, se obtienen los diferentes resultados determinados en la Tabla 3. 12, los cuales se encuentran dentro del rango 0-35.

Tabla 3. 12. Coeficiente de masividad.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Masividad	8.70	8.72	8.74	9.01	-

Fuente: Propia

Tabla 3. 13. Clases de valores de Masividad.

Rango	Clase de Masividad
0 - 35	Muy Montañosa
35 - 70	Montañosa
70 - 105	Moderadamente Montañosa

Fuente: (Fuentes, 2004)

Según la Tabla 3. 13, la superficie de la cuenca se define como zona Muy Montañosa, este resultado se justifica debido a que el río Yanuncay nace en el Parque Nacional Cajas recorriendo zonas montañosas que pertenecen a la Cordillera de los Andes.

3.2.2. Parámetros de la red hídrica.

Orden de la red hídrica. Para la obtención la red de drenaje, se partió del flujo acumulado generado desde el MDE, se utiliza la herramienta Raster Calculator, donde se asignan valores a los píxeles de acuerdo a la acumulación de flujo, para identificar la red hídrica se asigna un valor pertinente, el cual depende de la resolución de píxeles, con la finalidad de evitar la selección de datos que no forman parte de la red. En el presente estudio en los modelos de 12.5, 30 y 50 metros se asignaron valores ≥ 2 , sin embargo, al utilizar esta condición en el MDE de 3m se seleccionaron valores no pertenecientes a la red, al incrementar este valor a ≥ 3 se delimitó de mejor manera la red hídrica como se observa en la Figura 3. 10 (Puerta, 2013).

Luego de ser identificada la red hídrica, se procede a determinar el orden por el método de Strahler. En la Figura 3. 10 se puede identificar la clasificación generada por cada modelo de 3, 12.5, 30 y 50 metros. Como se puede observar en la Tabla 3. 14, los resultados son diferente en todos los modelos incrementando el orden de la red según se reduce el tamaño del píxel, este parámetro tiene relación directa con la resolución de la imagen, es decir, mientras más alta sea su calidad, la red de drenaje se identificará de mejor manera.

Tabla 3. 14. Red de orden hídrica.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Red de orden hídrica	8	7	6	5	-

Fuente: Propia

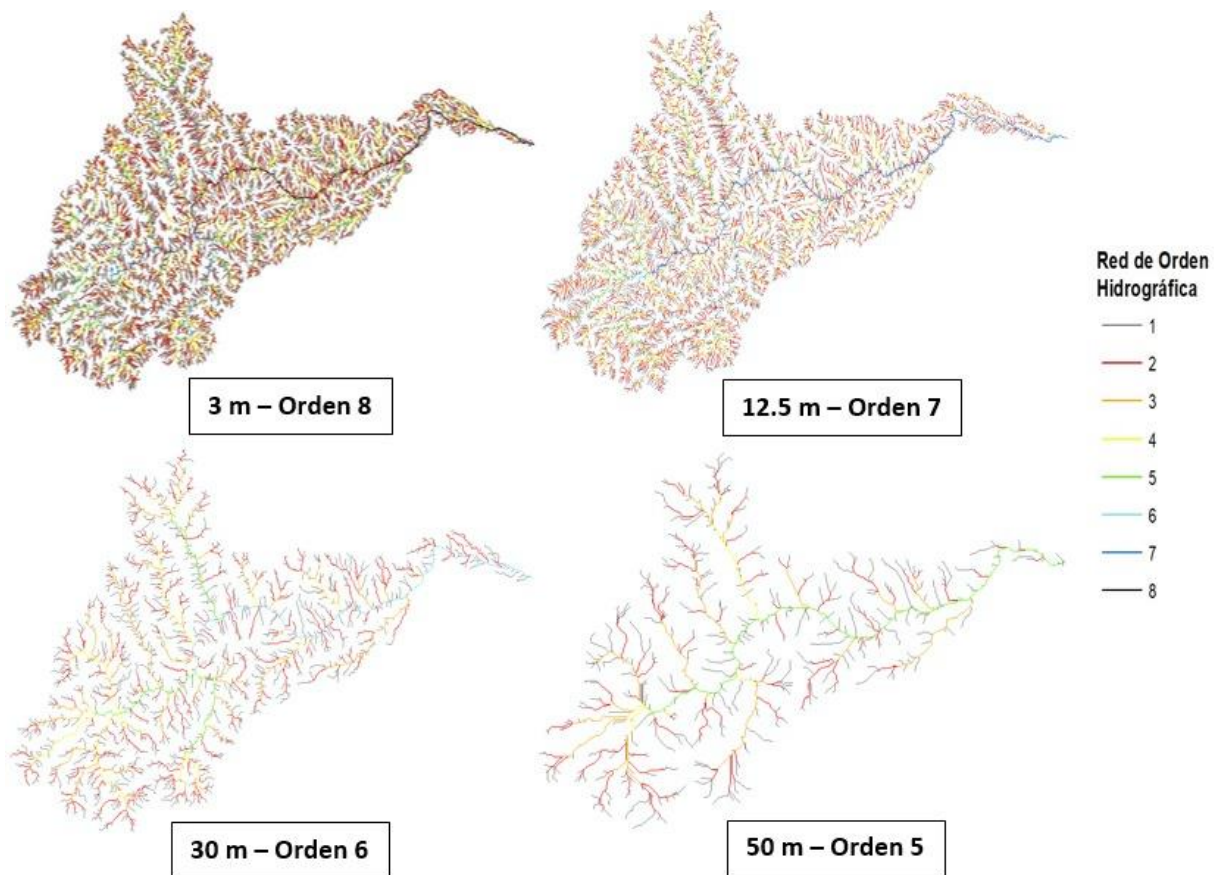


Figura 3. 10. Red de orden hídrica de la cuenca del río Yanuncay para los diferentes MDE.
Fuente: Propia

A pesar de la diferencia de su orden y la variación de las redes de drenaje de cada modelo observado con anterioridad en la Figura 3. 10, la clasificación de su forma del sistema de drenaje es la misma, identificándose como Dendrítica (Figura 3. 11).

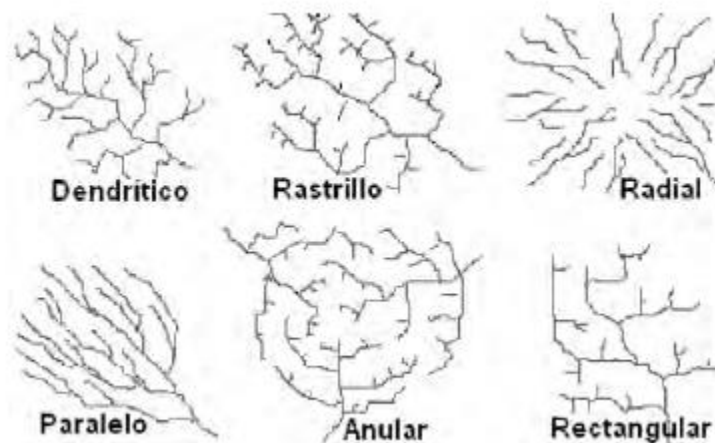


Figura 3. 11. Formas de los sistemas de drenaje.
Fuente: (Gómez, 2009)

Longitud y pendiente promedio de la red hídrica. Estos parámetros se determinan a partir de la identificación de la red hídrica y posteriormente se combinó con el mapa de pendientes de la cuenca para determinar la pendiente unitaria de cada drenaje y conjuntamente obtener la pendiente promedio total de la red. Los datos se encuentran afectados de la misma manera como se estableció en la determinación el orden de la red de hídrica, modificando de forma significativa la longitud total de la red en cada uno de los modelos, sin embargo, la pendiente promedio de la red no se encuentra afectada, manteniendo resultados similares (Tabla 3. 15).

Tabla 3. 15. Longitud y pendiente promedio de la red hídrica.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Longitud de la Red Hídrica	3145.90	2471.10	987.12	538.48	Km
Pendiente Promedio de la Red Hídrica	1.08	1.15	1.36	1.66	%

Fuente: Propia

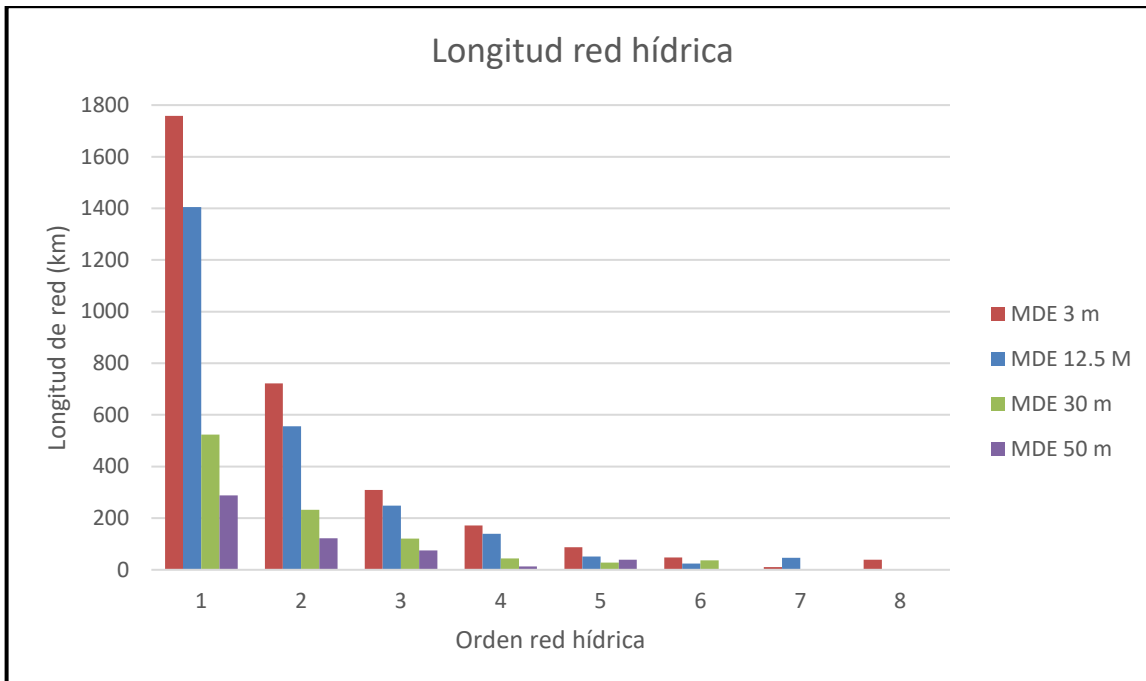


Figura 3. 12. Análisis de las longitudes de la red hídrica.

Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura 3. 12, en las imágenes de 3 y 12.5 m se determinó una mayor longitud de la red de orden 1, siendo significativamente mayores a los valores obtenidos a partir de las imágenes de 30 y 50 m, a partir de la red de orden 2 hasta el orden 5, la diferencia de valores es menor entre los diferentes MDE evaluados.

Densidad de drenaje. En el análisis de los modelos de 3, 12.5, 30 y 50 metros existen valores dispersos, los cuales indican el grado de dificultad que tiene la cuenca para evacuar el agua frente a una tormenta como se puede observar en la Tabla 3. 16. Debido a que el cálculo de este parámetro tiene como variable la longitud total de la red hídrica, la cual está en relación directa con la identificación de la red de cada MDE, explicado anteriormente. La imagen de 3 y 12.5 metros, se encuentran en el rango de drenaje > 3 , el cual según la Tabla 3. 17, su densidad de drenaje es Muy Alta. Por otro lado, la imagen de 30 y 50 metros cambia de categoría, clasificándose como: densidad de drenaje Alta y densidad de drenaje Moderada, respectivamente.

Tabla 3. 16. Densidad de drenaje.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Densidad de drenaje	7.59	5.94	2.39	1.33	Km/Km ²

Fuente: Propia

Tabla 3. 17. Valores interpretativos de la densidad de drenaje.

Densidad de Drenaje (km/km ²)	Categoría
<1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
>3	Muy alta

Fuente: (Delgadillo & Páez, 2008)

El MDE de 3, 12.5 y 30 m proporcionan resultados de una densidad de drenaje muy alta y alta, los cuales se relacionan con materiales impermeables y relieves montañosos (Strahler, 1964). Estos resultados concurren con el relieve y material rocoso, presente a lo largo de la cuenca hidrográfica. Por otro lado, la clasificación del MDE de 50 m, no se asemeja con la interpretación y representación de la hoya hidrográfica.

Longitud y Pendiente del eje del río principal. Para determinar la longitud del río principal, se identifica la dirección del flujo y las subcuencas que aportan al cauce. En la Figura 3. 13, se observa el recorrido generado por cada uno de los MDE es similar. Sin embargo, las longitudes obtenidas varían según los modelos, como se puede observar en la Tabla 3. 18.

Tabla 3. 18. Longitud del río principal.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Longitud del río principal	62.78	59.55	59.31	51.33	Km

Fuente: Propia

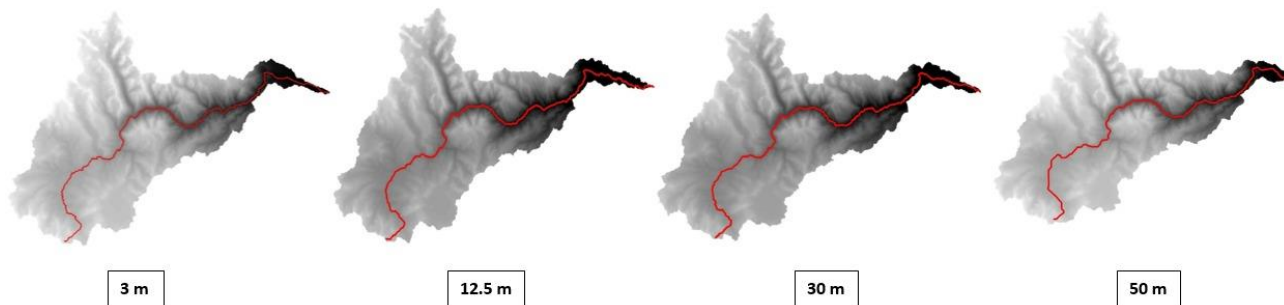


Figura 3. 13. Recorrido cauce principal cuenca río Yanuncay.

Fuente: Propia

Los recorridos de los modelos de 3, 12.5 y 30 metros son equivalentes, pese a la similitud del recorrido, existe una diferencia en los extremos del cauce principal generado por el modelo de 50 metros. En la Figura 3. 14, se representa esta diferencia comparando los resultados del cauce principal 3 metros versus el de 50 metros.

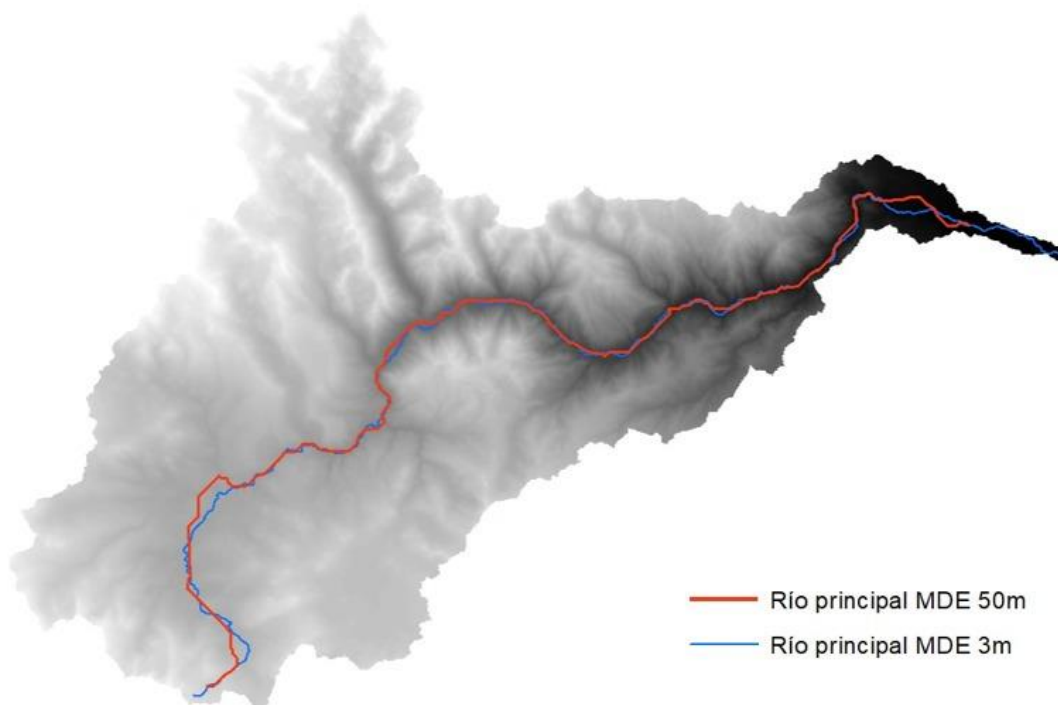


Figura 3. 14. Comparación cauce principal MDE 3m – MDE 50m.

Fuente: Propia

La pendiente promedio del cauce principal se determinó a partir del teorema Taylor y Schwarz, proporcionando valores semejantes, como se puede apreciar en la Tabla 3. 19.

Tabla 3. 19. Pendiente promedio del cauce principal.

Parámetro	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Pendiente promedio del río principal	1.89	2.01	2.37	2.44	%

Fuente: Propia

Además, en la interpretación del perfil vertical de la Figura 3. 15, se observa similitud en su relieve, sin embargo, debido a la resolución de la imagen de 50 metros su perfil genera de forma escalonada.

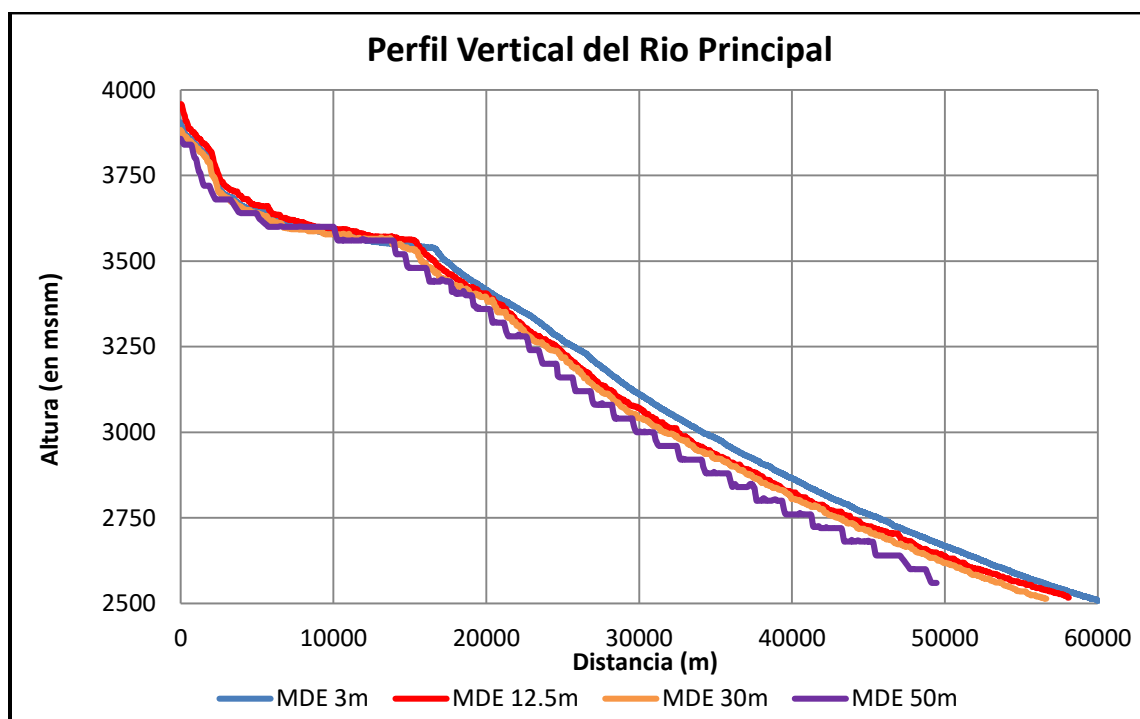


Figura 3. 15. Perfil cauce principal cuenca del río Yanuncay con diferentes MDE.

Fuente: Propia

Tanto el análisis de la longitud y pendiente del río principal, son afectados directamente por el tamaño de los píxeles (resolución), el trayecto es afectado de tal forma que cambia su curso, sin embargo, a una mayor escala los recorridos son similares. Por otro lado, el perfil vertical y la pendiente obtenida a partir de cada uno de los modelos, siendo más semejantes los modelos de 3, 12.5 y 30 m.

3.2.3. Análisis Zona de Estudio

La zona de estudio se encuentra establecida entre el puente de la Av. Loja y Av. Primero de Mayo, recorriendo aproximadamente 3 km de longitud hasta el Jardín Botánico de Cuenca, como se indica en la Figura 3. 16. El área de estudio se determinó a partir de la ribera del cauce y las vías junto al mismo.



Figura 3. 16. Zona de Estudio.
Fuente: (Google Earth Pro, 2020)

Para realizar el análisis de la zona, se digitalizó el área de estudio y la trayectoria de río principal siguiendo su eje a través del software “Google Earth Pro” para determinar los límites y usarlos en formato vectorial en ArcGIS. Se planteó que el recorrido del río principal obtenido a partir de los diferentes MDE debe ser igual al recorrido digitalizado, para evaluar su exactitud en zonas determinadas, como se puede observar en la Figura 3. 17.

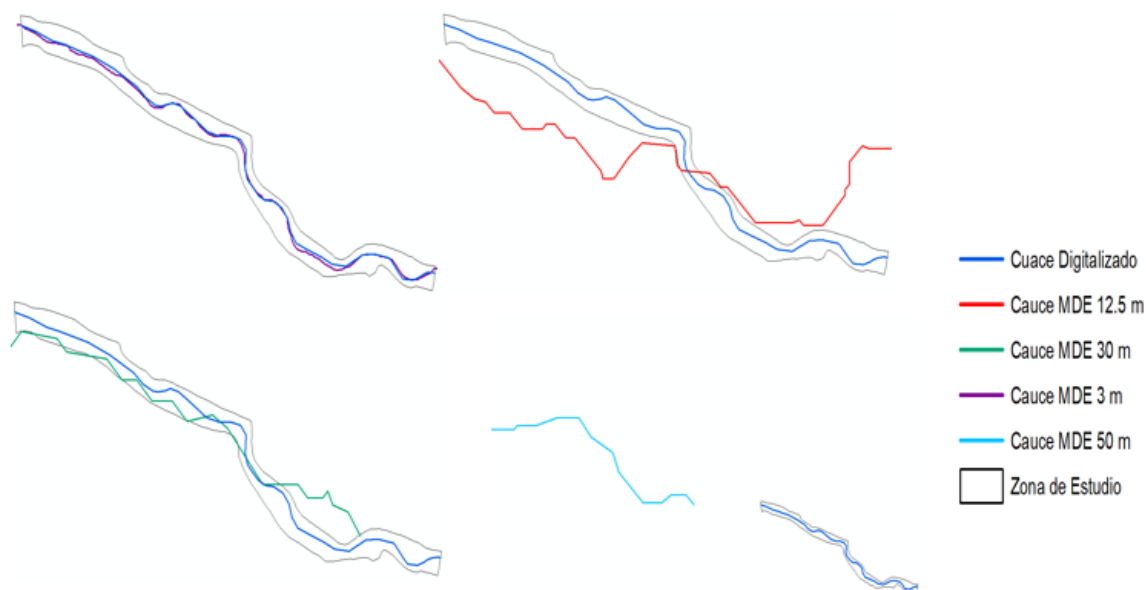


Figura 3. 17. Análisis de trayectoria de cauce en la zona de estudio.
Fuente: Propia

Como se puede observar en la Figura 3. 17, la trayectoria del cauce generado por el MDE de 3 metros es igual al digitalizado, siguiendo su trayecto con una variación mínima, por otro lado, el resto de los MDE dan un resultado con una gran variación, incluso sus trayectorias se encuentran fuera de la zona de estudio, además, el cauce delimitado por los MDE de 30 metros no cubre totalmente la zona de estudio y el MDE de 50 metros no se encuentra dentro de la zona. Estos resultados se generan debido a la información almacenada en cada uno de sus pixeles, mientras más grande sea el pixel del MDE menos información nos presentara, en este caso es muy notable la diferencia entre los diferentes modelos, siendo el de 3 metros una información semejante a la realidad.

3.2.4. Resumen de los resultados obtenidos

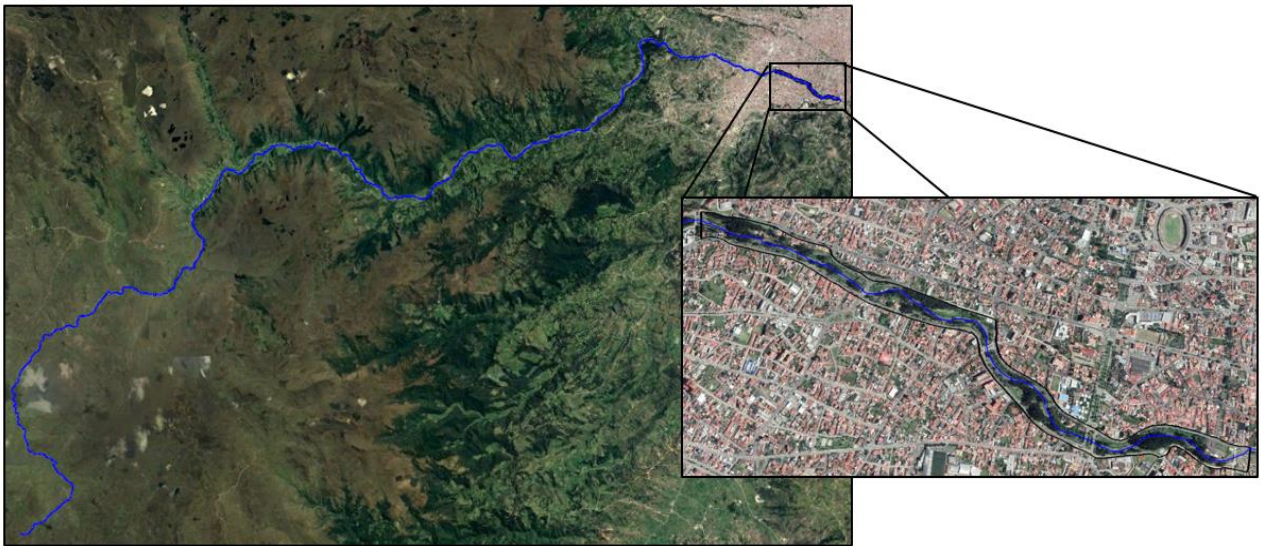
A partir del análisis morfológico de la cuenca del río Yanuncay generado por los diferentes MDE se determinó que sus parámetros son similares, a excepción de la pendiente promedio, longitud del curso principal, orden y longitud de la red hídrica y la densidad de drenaje, debido a que tienen una relación directa con la información almacenada en los pixeles de cada MDE (Tabla 3. 20).

Tabla 3. 20. Parámetros geomorfológicos de los diferentes MDE.

Descripción	MDE				Unidad
	3 m	12.5 m	30 m	50 m	
Superficiales					
Superficie	414.48	415.76	413.20	404.06	km ²
Perímetro de la Cuenca	148.21	143.42	139.57	137.58	Km
Elevación Máxima	4264.99	4315.34	4293.82	4278.35	m.s.n.m
Elevación Mínima	2521.88	2515.38	2522.15	2560.00	m.s.n.m
Elevación Media	3607.82	3625.84	3611.29	3642.40	m.s.n.m
Pendiente promedio de la Cuenca	6.75	7.59	13.12	16.53	%
Coefficiente de compacidad	2.05	1.98	1.94	1.93	-
Factor de Forma	0.31	0.30	0.32	0.36	-
Relación de elongación	0.63	0.62	0.64	0.68	-
Coefficiente de masividad	8.70	8.72	8.74	9.01	-
Red Hídrica					
Longitud del Curso Principal	59.89	58.11	56.64	49.46	Km
Pendiente Promedio del Curso Principal	1.89	2.01	2.37	2.44	%
Orden de la Red Hídrica	8.00	6.00	6.00	5	-
Longitud de la Red Hídrica	3145.90	2471.10	987.12	538.48	Km
Pendiente Promedio de la Red Hídrica	1.08	1.15	1.36	1.66	%
Densidad de Drenaje	7.59	5.94	2.39	1.33	Km/Km ²

Fuente: Propia

En el análisis de la zona de estudio se determinó que en el MDE de 3 metros los resultados se asemejan a la realidad, validados a través de una comparación como se puede observar en la Figura 3. 18, la trayectoria del río principal a través de la cuenca encaja con su recorrido referenciado en una ortofoto, incluso en la zona de estudio no existen problemas de desfase.



*Figura 3. 18. Trayectoria del rio Yanuncay obtenida a partir del MDE de 3 metros.
Fuente: (Google Earth Pro, 2020)*

Comparando los resultados obtenidos de los diferentes análisis aplicados a los MDE, se establece que, para un estudio a gran escala como lo son las cuencas hidrográficas se puede utilizar varios modelos digitales de elevación con distinta resolución dependiendo de los parámetros que se requieran. Por otro lado, para un análisis a menor escala como lo es en este caso una zona de 3 kilómetros, es necesario un MDE con mayor resolución, siendo el modelo de 3 metros el que más se asemeja a la realidad.

Para implementar un modelo hidrodinámico bidimensional, del cual se obtendrán resultados de baja resolución como lo son las velocidades cuasi puntuales promedio del flujo, será necesario considerar un modelo digital que se adapte a las condiciones topográficas del cauce natural analizado. De los resultados obtenidos en este capítulo se concluye que, de los MDE analizados, solamente la imagen con resolución de 3 metros representa las condiciones topográficas en la escala adecuada para implementar un modelo hidrodinámico de inundaciones.

CAPÍTULO IV

**MODELACIÓN HIDRODINAMICA
BIDIMENSIONAL**

Capítulo IV

Modelación Hidrodinámica Bidimensional

4.1. Identificación de la zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra establecida entre el Puente de la Av. Loja y Av. Primero de Mayo hasta el Jardín Botánico a la altura de la Estación de Bomberos N°3 de la Ciudad de Cuenca, siendo un área densamente poblada en toda su trayectoria, con una variedad de viviendas, edificaciones, vías impermeabilizadas, parques lineales, zonas de importancia cultural y cuatro puentes que conectan diferentes lugares de la ciudad, formando parte del área residencial. Por otro lado, existe una gran variedad de vegetación aledaña al cauce como: pasto natural, eucaliptos, pencos, entre otros.

El tramo establecido para el estudio, inicia en el Puente ubicado en la Av. Loja y Av. Primero de Mayo (719390.97, 9678586.431), finalizando en el Jardín Botánico de Cuenca a la altura de la calle Roberto Crespo Toral (721871.47, 9677504.667), estableciendo una longitud de 3 km (Figura 4. 1) y un pendiente promedio del 1.6% aproximadamente, obtenida a través del software Google Earth Pro.

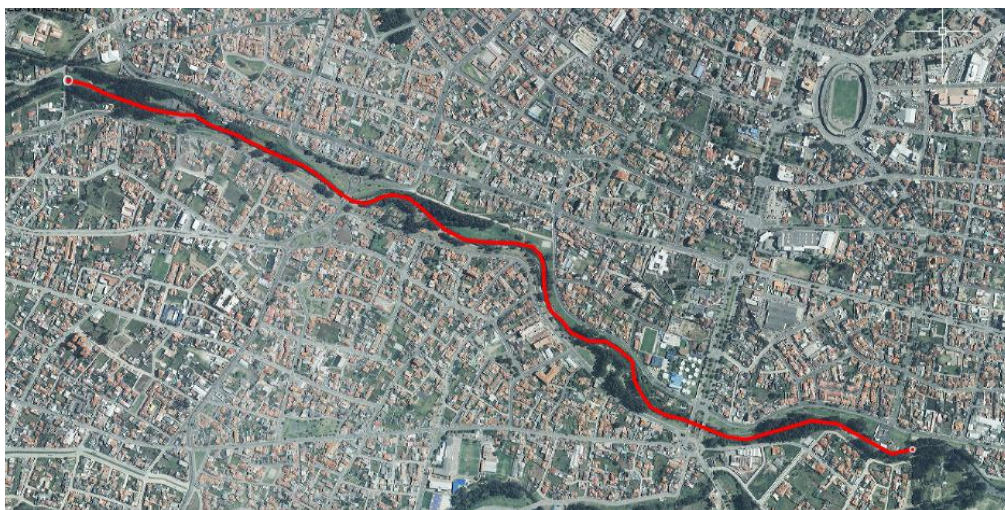


Figura 4. 1. Zona de estudio río Yanuncay.
Fuente: (Google Earth Pro, 2020).

4.2. Análisis de datos estación Yanuncay AJ Tarqui de ETAPA E.P

Los datos fueron obtenidos de la estación limnigráfica Yanuncay AJ Tarqui, la cual funcionaba en la parte posterior de la escuela de bomberos N° 3 ubicada en la calle 27 de Febrero. Para la calibración y validación de los modelos, se realizó una visita in situ y se encontró indicios de la existencia de la estación como se puede observar en la Figura 4. 2, concluyendo en la actualidad la estación se encuentra fuera de servicio.



*Figura 4. 2. Identificación estación limnigráfica Yanuncay AJ Tarqui.
Fuente: propia*

Se debe aclarar que la estación se encuentra aguas abajo del punto inicial del tramo en estudio (puente Av. Loja y Av. Primero de Mayo), considerando que la distancia entre ambos puntos es mínima, la variación de caudales no afecta considerablemente en la aplicación del modelo hidrodinámico. Para el análisis de los datos observados de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui, se identificó el registro existente de cada año con su respectivo estado como se puede observar en la Tabla 4. 1.

Tabla 4. 1. Intervalo de datos observados estación Yanuncay AJ Tarqui.

Año	Registro	Estado
1997	27 agosto - 09 noviembre	Ausencia de datos de: 01 enero - 26 agosto 10 noviembre - 31 diciembre
1998	23 enero - 31 diciembre	Ausencia de datos de: 1 enero - 22 enero 29 mayo - 14 septiembre
1999	01 enero - 31 diciembre	Completo
2000	01 enero - 31 diciembre	Completo
2001	01 enero - 31 diciembre	Ausencia de datos de: 16 marzo - 27 mayo Datos intermitentes desde: enero - septiembre
2002	01 enero - 09 mayo	Ausencia de datos de: 21 febrero - 13 marzo 10 mayo - 31 diciembre
2003	No existe registro	
2004	No existe registro	
2005	No existe registro	
2006	No existe registro	
2007	No existe registro	
2008	04 abril - 31 diciembre	Ausencia de datos de: 01 enero - 03 abril Datos intermitentes desde: abril - junio septiembre - noviembre
2009	01 enero - 31 diciembre	Ausencia de datos de: 12 enero - 07 marzo 10 mayo - 31 diciembre
2010	01 enero - 31 diciembre	Completo
2011	01 enero - 31 diciembre	Completo
2012	01 enero - 31 diciembre	Completo
2013	01 enero - 31 diciembre	Completo
2014	19 junio - 31 diciembre	Ausencia de datos de: 01 enero - 18 junio
2015	01 enero - 31 diciembre	Completo
2016	01 enero - 31 diciembre	Completo
2017	01 enero - 31 diciembre	Completo

Fuente: Propia

Como se puede identificar en la Tabla 4. 1, existe información desde el año 1997 hasta 2002 y desde 2009 hasta 2017. Además, en la mayoría de los años evaluados se registran datos continuos desde enero hasta diciembre, con excepción de los años 1997, 2002, 2008 y 2014.

Curva de Descarga. Relaciona el caudal del río con un nivel de referencia, los niveles de agua se miden con limnómetros, los cuales generalmente se instalan al costado de la estación de aforo. Se debe tener en cuenta que la curva de descarga es producto de una serie de aforos por largos periodos de tiempo para que se ajusten a la realidad.

En este estudio se usó a la curva de descarga generada por la empresa ETAPA EP. Utilizando la siguiente función, lo cuales tomaran lo valores expresados en la Tabla 4. 2.

$$Q = a_e * (H - H_o)^p$$

Donde:

Q = caudal

a_e y p = parámetros de ajuste

H_o = nivel al cual el caudal es 0

H = nivel del agua

Tabla 4. 2 Parámetros curva de descarga

ESTACIÓN	a	p	Ho	r ²
TARQUI A.J. YANUNCAY	7,63569E-6	3.01851	26	0.9949

Fuente: ETAPA EP.

4.2.1. Análisis estadístico.

Para caracterizar un conjunto de datos es necesario disponer de valores representativos de la muestra a evaluar, en el siguiente apartado se definirá los siguientes parámetros

estadísticos: media aritmética, mediana, desviación estándar, los diferentes cuartiles, varianza, coeficiente de asimetría y curtosis.

Media, Mediana y Coeficiente de asimetría. Para identificar la tendencia central, generalmente se utiliza la media aritmética, pero en algunos casos este valor puede proporcionar resultados erróneos por la variedad de datos (atípicos), es necesario evaluar la mediana para identificar el valor central de la muestra. Además, se debe tener en cuenta cuando la media y la mediana coinciden se consideran distribuciones simétricas. El grado en que los datos no son simétricos se determina a partir de un coeficiente de asimetría, a medida que los datos se vuelven más equilibrados, el coeficiente de asimetría tiende a cero.

En la evaluación de los datos registrados de caudales se observa que hasta el año 2012 los valores tienen un orden de magnitud semejante, existe variación entre cada uno de los resultados, siendo normal, debido a que, los sistemas hidrológicos tienen características estocásticas, como se puede observar en la Tabla 4. 3.

Tabla 4. 3. Media, mediana y coeficiente de asimetría registro de datos de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.

Año	Mediana	Media	Asimetría
1997	7.452	10.960	1.263
1998	14.127	17.862	1.351
1999	16.686	19.934	1.126
2000	14.832	18.894	1.501
2001	5.509	8.537	4.495
2002	6.765	7.504	2.450
2008	10.064	13.811	3.895
2009	7.340	10.503	3.501
2010	5.773	8.208	3.598
2011	8.358	11.797	3.402
2012	7.340	8.580	2.610
2013	3.808	6.720	5.656
2014	2.374	3.525	7.616
2015	3.267	5.070	4.231
2016	3.247	4.912	5.802
2017	3.316	6.699	7.661

Fuente: Propia

Los valores de la mediana y media en los años con registro continuo de datos, reflejan una similitud entre ellos, por lo contrario, debido a la carencia de datos en algunos años se puede observar que el resultado establece valores muy dispersos en comparación a la muestra de registros completos. Por otro lado, los menores coeficientes de asimetría que refleja una tendencia a cero, representando un equilibrio de datos se pueden observar en los años 1997, 1998, 1999 y 2000.

Desviación Estándar, Varianza. Con la finalidad de interpretar la distribución y dispersión de los datos alrededor de su media, se identifican parámetros cuantitativos tales como varianza y desviación estándar. Se utiliza la varianza para establecer valores únicamente positivos, ya que su interpretación se encuentra en unidades elevadas al cuadrado, por lo contrario, la desviación estándar asimila valores negativos y positivos, generando resultados positivos cuando el elemento evaluado es más grande que la media y negativo cuando el elemento es menor al de la media.

Tabla 4. 4. Desviación estándar y varianza de datos de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.

Año	Desviación Estándar	Varianza
1997	9.095	82.723
1998	15.676	245.749
1999	15.982	255.420
2000	16.765	281.075
2001	10.915	119.141
2002	5.354	28.660
2008	12.579	158.228
2009	11.088	122.948
2010	8.889	79.014
2011	12.748	162.507
2012	6.532	42.669
2013	9.780	95.652
2014	5.074	25.743
2015	5.988	35.855
2016	6.641	44.099
2017	10.460	109.412

Fuente: Propia

En la Tabla 4. 4 se observa que los resultados obtenidos de la desviación estándar se encuentran por encima de la media generando valores positivos con una dispersión máxima de 16.765 en el año 2000. De la misma forma, en la interpretación de la varianza representa la distribución obtenida elevada al cuadro, determinando al año 2000 con su mayor dispersión.

Curtosis. Es una medida estadística, que determina el grado de mayor o menor concentración que presentan los valores alrededor de la tendencia central de la distribución de frecuencias. Existen tres categorías para identificar que tan apuntada o achatada se encuentra su distribución (Figura 4. 3), cuando sus datos están muy concentrados hacia la media el valor es mayor a cero y se denomina distribución leptocúrtica, si se obtiene un resultado a menor a cero presenta una distribución platicúrtica y finalmente si su valor es igual a cero conlleva un comportamiento normal o distribución mesocúrtica.

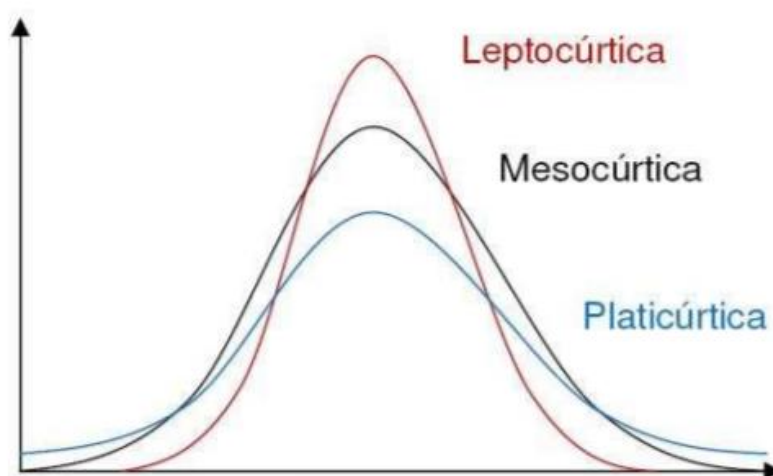


Figura 4. 3. Representación gráfica de los diferentes tipos de curtosis.
Fuente: (Contero, s.f.)

Tabla 4. 5. Curtosis de datos de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.

Año	Curtosis
1997	0.819
1998	2.275
1999	1.310
2000	2.957
2001	25.225
2002	11.812
2008	22.849
2009	23.132
2010	20.734
2011	17.324
2012	12.176
2013	52.632
2014	82.001
2015	27.301
2016	47.179
2017	99.707

Fuente: Propia

Según la Tabla 4. 5, expresa todos los resultados de la curtosis mayor a 0, es decir, obteniendo una distribución leptocúrtica representando una alta concentración de sus valores hacia la media. Además, se puede interpretar como decaimiento abrupto generando un apuntamiento positivo.

Cuartiles. Los diferentes cuartiles de la muestra evaluada representan la repartición de la muestra en cuatro partes iguales, siendo el primer cuartil 25%, el segundo cuartil (mediana) 50% y el tercer cuartil el 75% de los datos.

Tabla 4. 6. Cuartiles datos registrados de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui.

Año	Cuartiles		
	Q1 \leq 25%	Q2(M) \leq 50%	Q3 \leq 75%
1997	4.071	7.452	15.928
1998	5.708	14.127	26.471
1999	7.690	16.686	28.020
2000	5.509	14.832	26.981
2001	3.448	5.509	8.949
2002	3.448	6.765	9.760
2008	6.865	10.064	16.207
2009	3.228	7.340	13.804
2010	2.713	5.773	10.064
2011	4.288	8.358	13.804
2012	4.457	7.340	10.684
2013	2.053	3.808	7.340
2014	1.607	2.374	3.413
2015	1.750	3.267	5.986
2016	1.937	3.247	5.237
2017	2.142	3.316	7.327

Fuente: Propia

En el análisis de los cuartiles de la muestra, existe una gran variabilidad de datos tanto en la evaluación del primero, segundo y tercer cuartil, generando valores dispersos para cada año evaluado, además, el máximo primero, segundo y tercer cuartil se sitúa en el año 1999 con Q1=7.69, Q2=16.686 y Q3=28.02, respectivamente como se observa en la Tabla 4. 6.

4.2.2. Caudales máximos anuales.

Para la determinación de los caudales máximos instantáneos anuales, se obtuvo un registro de caudales de la estación Yanuncay AJ Tarqui desde los años 1997 hasta 2002 y desde 2008 hasta 2017, por consiguiente, existiendo carencia de información entre los años 2003 – 2007. Con la finalidad de complementar los datos faltantes, se realizó una correlación directa con los datos de la estación Yanuncay ubicada en Pucán, obteniendo un coeficiente de correlación mayor a 0.7 y adquiriendo los siguientes resultados:

Tabla 4. 7. Caudales máximos instantáneos anuales estación Yanuncay AJ Tarqui.

Año	Qmax(m ³ /s)
1997	43.761
1998	92.074
1999	89.932
2000	104.410
2001	106.754
2002	53.266
2003	71.568
2004	55.759
2005	1.429
2006	135.749
2007	226.604
2008	175.505
2009	151.972
2010	113.334
2011	151.972
2012	97.617
2013	166.672
2014	88.134
2015	109.837
2016	103.609
2017	247.815

Fuente: Propia

Los valores definitivos por la Tabla 4. 7, consecutivamente se utilizarán para identificar y proyectar los periodos de retorno a través de la distribución de Gumbel, el cual identifica una distribución a partir de valores máximo y mínimos de una muestra.

4.2.3. Identificación Hidrograma Unitario.

Para la identificación del hidrograma unitario, se parte de un hidrograma de crecida, donde se determinan varios conjuntos de series continuas de los caudales máximos observados de la estación Yanuncay AJ Tarqui, con el objetivo de identificar el volumen de escurrimiento directo más desfavorable que transporta el cauce, generando los siguientes hidrogramas de crecida en un tiempo de 24 horas (Figura 4. 4):

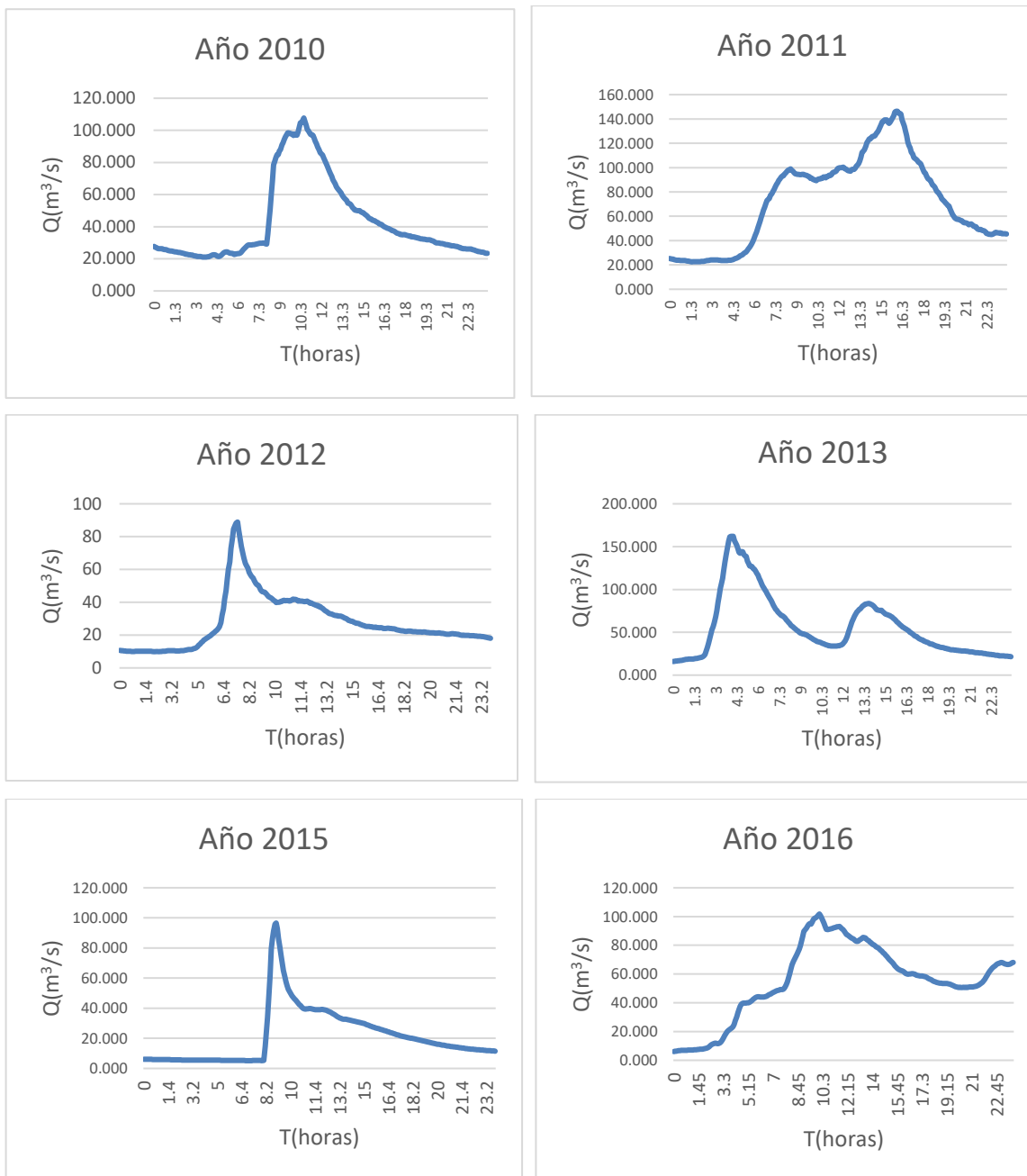


Figura 4. 4 Hidrogramas de crecida en 24 horas.
Fuente: Propia

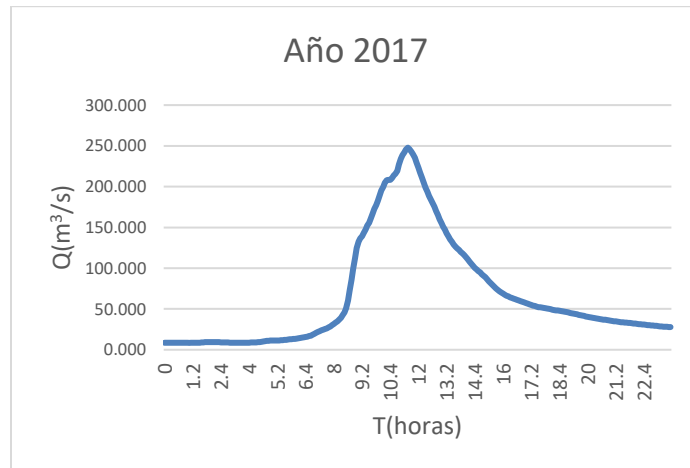


Figura 4. 4. Hidrogramas de crecida en 24 hora (Continuación).
Fuente: Propia

En la Figura 4. 4 se analizan los hidrogramas de crecidas obtenidos por los eventos más desfavorables en cada año, las cuales producen un aumento significativo en la escorrentía directa, además se puede observar que existe dos tipos de comportamientos en los hidrogramas resultantes, en su mayoría son hidrogramas típicos los cuales se caracterizan por tener un solo evento máximo, sin embargo también se evidencian hidrogramas complejos que son resultantes de dos o más precipitaciones poco espaciadas.

En la Figura 4. 5 y Figura 4. 6 se comprueban los hidrogramas más desfavorables por su caudal máximo, siendo los años 2013 y 2017 con un $Q_{\max} = 166.672 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{\max} = 247.815 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. Posteriormente, para establecer el mayor volumen de caudal directo, se identifica el flujo base y la escorrentía directa de cada hidrograma de crecida (Figura 4. 5 y Figura 4. 6). Consecutivamente, se acumula el caudal directo definido y se obtiene un volumen para un tiempo establecido de 24 horas, como se puede observar en la Tabla 4. 8.

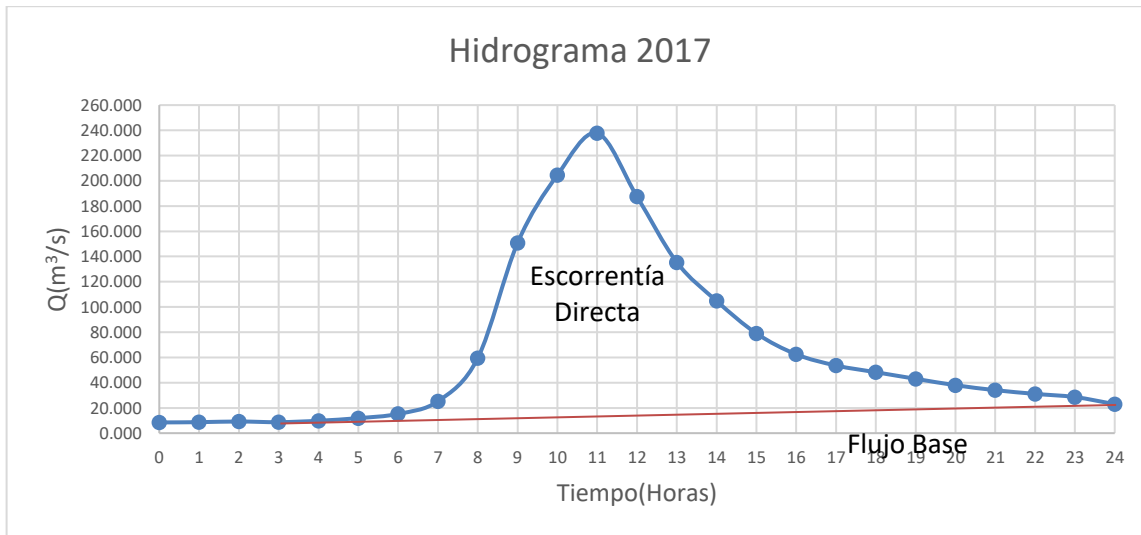


Figura 4. 5. Hidrogramas de crecida 2017.
Fuente: Propia.

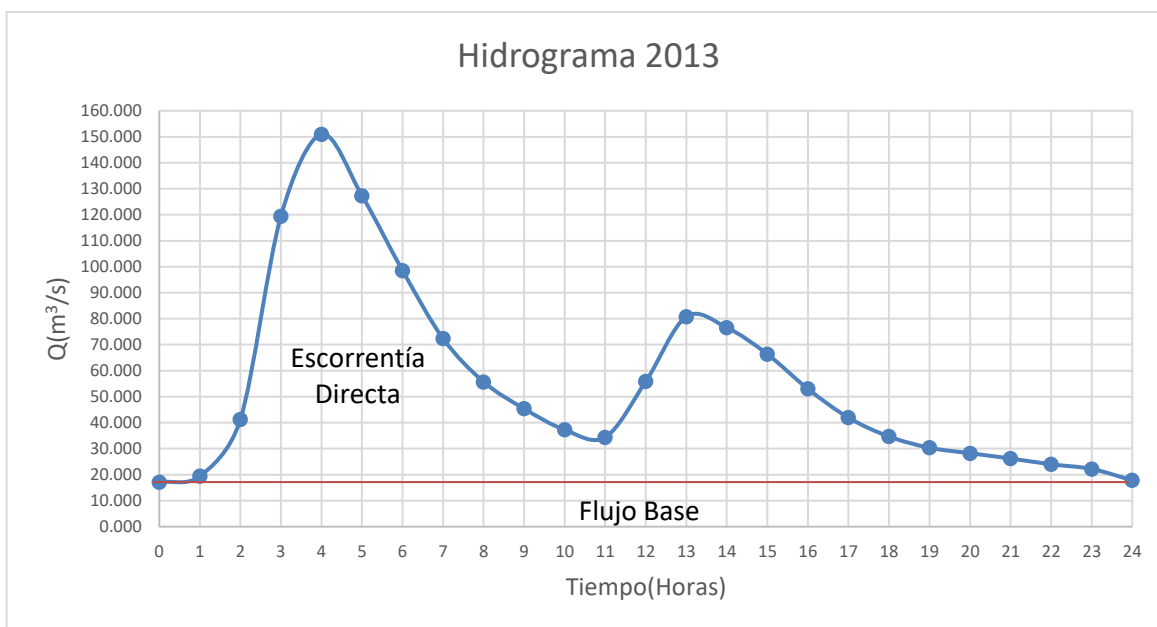


Figura 4. 6. Hidrogramas de crecida 2013.
Fuente: Propia.

Tabla 4. 8. Volumen directo hidrogramas de crecida.

Hidrograma	Caudal Directo(m3/s)	Volumen(m3)
2013	947.792	81889194.26
2017	1238.309	106989857

Fuente: Propia

A partir de la Tabla 4. 8, se determina el mayor volumen en el hidrograma de crecida producido en el año 2017, definiéndolo como base para la implementación del hidrograma unitario representativo de los datos observados.

Hidrograma Unitario. Para el análisis del hidrograma unitario es necesario separar el caudal directo y caudal base, identificando una precipitación con altura de exceso (hpe) unitario durante un periodo específico de tiempo conocido como un hidrograma de escurrimiento.

Para la construcción del hidrograma unitario, se identificó los datos preliminares (Tabla 4. 9) con la finalidad de obtener las ordenadas correspondientes al HU de 24 horas como se puede observar a continuación (Tabla 4. 10).

Tabla 4. 9. Datos preliminares

Caudal directo	1238.309	m ³ /s
Intervalo tiempo	1	hora
Volumen directo	4457910.71	m ³
Área Cuenca	414.48	Km ²
HPE	10.7554302	mm

Fuente: Propia

Tabla 4. 10. Cálculo del hidrograma unitario.

Tiempo	HU(m³/s)
(horas)	(Q_{DIRECTO}/HPE)
0	0
1	0.019
2	0.068
3	0.020
4	0.077
5	0.177
6	0.488
7	1.327
8	4.413
9	12.810
10	17.718
11	20.754
12	16.035
13	11.102
14	8.159
15	5.674
16	4.041
17	3.172
18	2.630
19	2.145
20	1.672
21	1.215
22	0.849
23	0.567
24	0

Fuente: Propia

En la siguiente Figura 4. 7 se muestra el hidrograma unitario resultante, el cual será utilizado para la proyección de los diferentes periodos de retorno planteados para la implementación en los modelos hidrodinámicos.

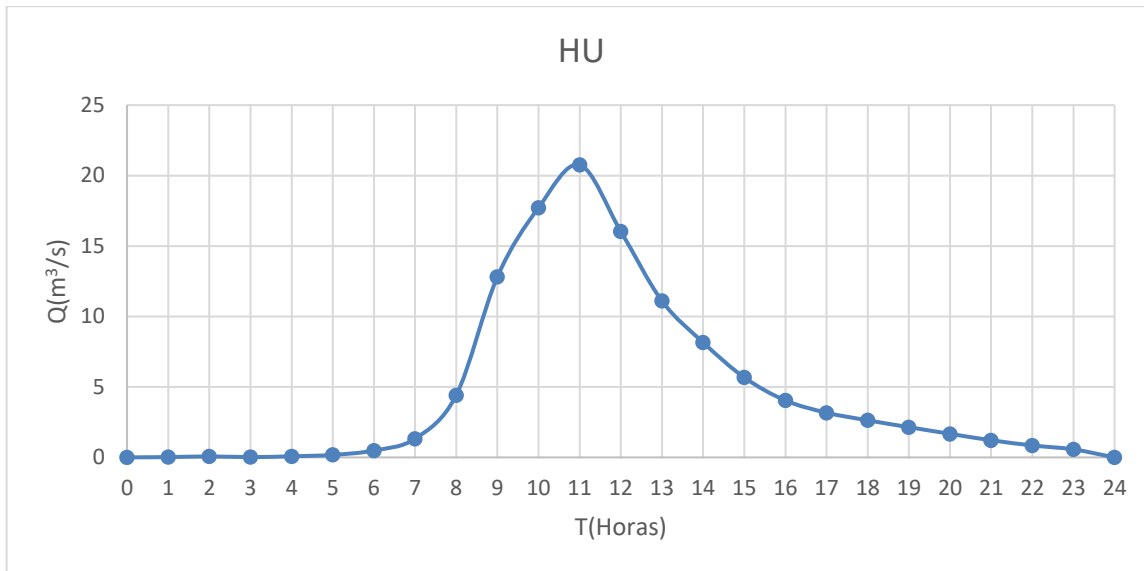


Figura 4. 7 Gráfico hidrograma unitario base.
Fuente: Propia

4.2.4. Periodos de retorno.

En la implementación de los periodos de retorno, se realizó un análisis a partir del método estadístico de Gumbel, el cual permitió identificar los caudales máximos anuales mencionados con anterioridad en la Tabla 4. 7. En el análisis estadístico se obtuvieron los siguientes valores de caudales picos para los diferentes periodos de retornos planteados (5, 10, 25 y 50 años), véase Tabla 4. 11.

Tabla 4. 11. Caudales máximos proyectados para diferentes periodos de retorno.

TR(AÑOS)	Q(m3/s)
5	165.317
10	206.602
25	258.766
50	297.464

Fuente: Propia

En la proyección de los hidrogramas de crecida para cada espacio temporal con su respectivo periodo de retorno, se realizó a través una correlación directa con el hidrograma unitario obtenido con anterioridad, generando un hidrograma total producto de la suma de

todos los incrementos del hidrograma y el flujo base estimado, como se puede observar en la Figura 4. 8.

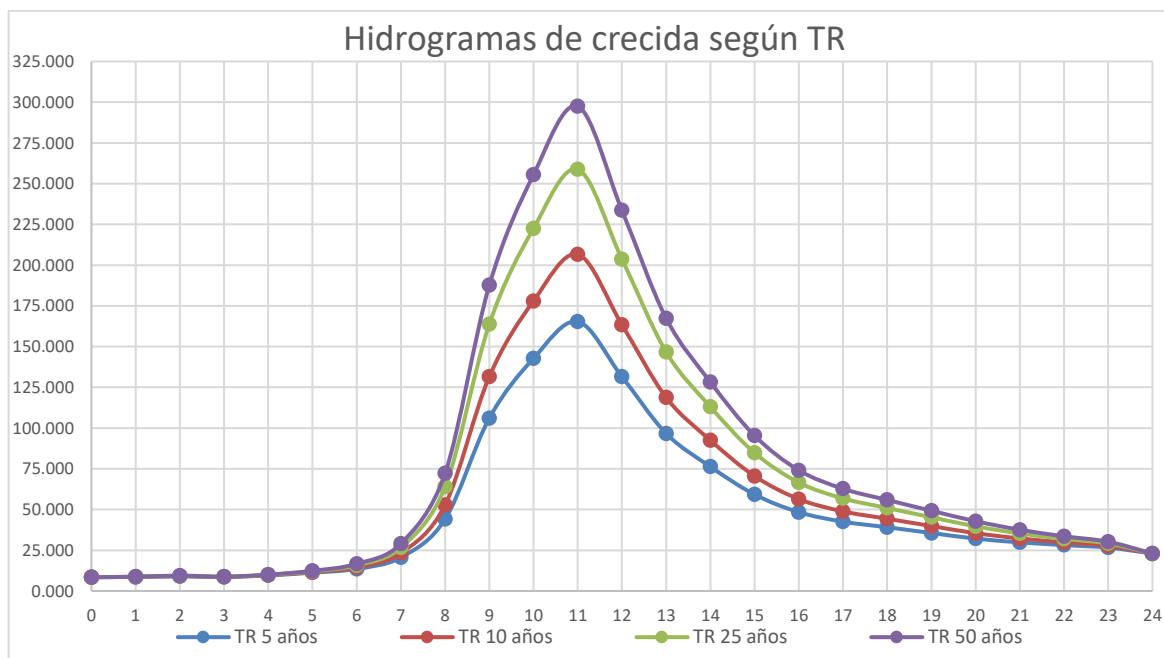


Figura 4. 8. Hidrogramas de crecida para diferentes periodos de retorno.
Fuente: Propia

En los hidrogramas de diseño obtenidos en la Figura 4. 8, se puede identificar que el comportamiento es similar en todos los periodos de retorno proyectados, con la diferencia del incremento de su caudal para cada evento.

4.3. Modelación Hidrodinámica Bidimensional IBER

4.3.1. Datos Preliminares.

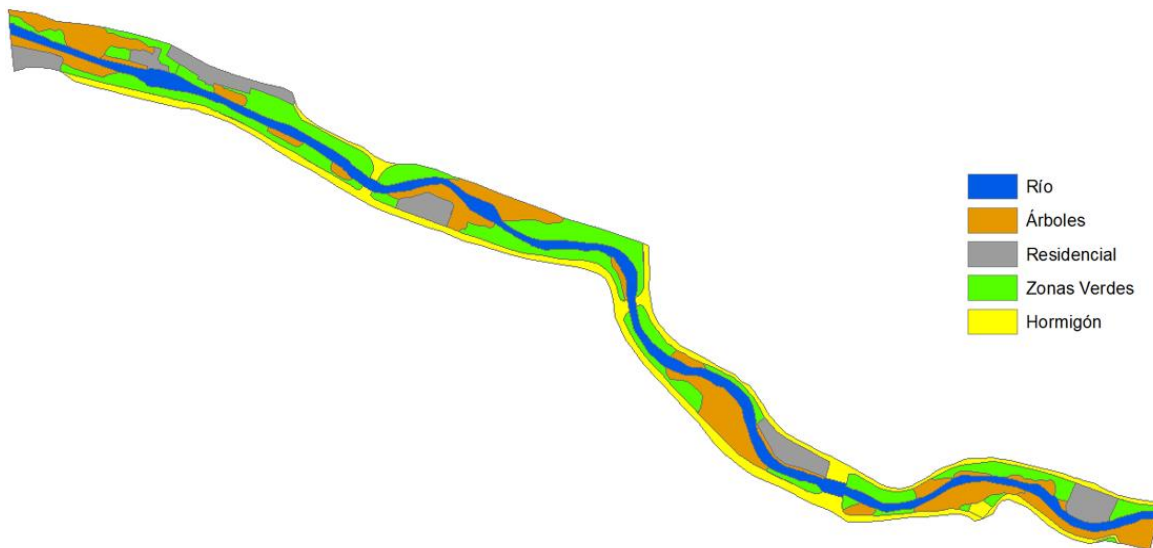
MDE. Para poder utilizar el modelo digital de elevación es necesario transformarlo a formato ASCII, debido a que el software IBER solo interpreta dicho formato. Este proceso se lo puede realizar en el software ArcGIS, usando la herramienta Raster to ASCII, el cual pasa los datos establecidos en el Raster a un formato de texto.

Ortofoto. Al insertar una ortofoto se conseguirá identificar los diferentes aspectos del área de estudio, como lo es la rugosidad. Además, se podrá interpretar de mejor manera los resultados ya que al determinar zonas de inundación servirá de ayuda para referenciarlos visualmente en las diferentes áreas. No necesita tener un formato especial, ya que servirá solo como georreferencia para la simulación en el software IBER (Figura 4.9).



*Figura 4.9. Ortofoto usada como fondo en el modelo
Fuente: (SIGTIERRAS, 2010)*

Rugosidad. El software requiere una delimitación de las diferentes zonas con el número de Manning. Mediante la ortofoto se puede determinar los diferentes tipos de uso de suelo como se muestra en la Figura 4.10, para que se ejecute la simulación en IBER la rugosidad debe ser establecida en formato ASCII y adicionalmente en un archivo en formato CSV para establecer su respectivo valor.



*Figura 4. 10. Usos de suelo obtenidos a partir de ortofoto
Fuente: Propia*

Los coeficientes de rugosidad son seleccionados en base a los que más se asemejen al uso del suelo presente en la zona, se establecieron cinco coeficientes los cuales se detallan en la Tabla 4. 12.

Tabla 4. 12. Coeficientes de rugosidad de Manning

Uso de Suelo	Coefficiente de Manning
Arboles	0.1
Hormigón	0.03
Zonas Verdes	0.03
Río	0.065
Residencial	0.15

Fuente: (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Los valores expresados en la Tabla 4. 12 serán usados como base para ejecutar el modelo en el software descrito, luego serán ajustados de acuerdo a la calibración de las condiciones hidráulicas de la zona de estudio.

4.3.2. Modelación.

La modelación del tramo propuesto del río Yanuncay se realizó en el software IBER versión 2.5.2, para esto se siguieron diferentes pasos como el preproceso, proceso y postproceso.

Preproceso. Se debe colocar todos los datos requeridos por el programa para que pueda realizar un correcto calculo en el proceso. En este apartado se colocó la superficie del terreno ya que sobre esta se colocarán los diferentes datos. (Figura 4. 11)

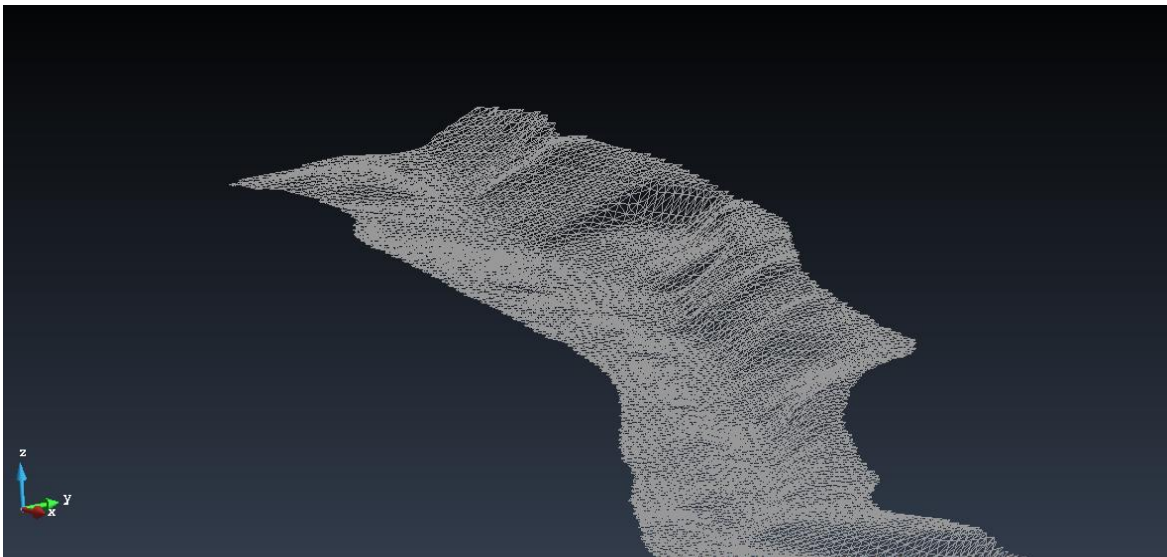


Figura 4. 11. Malla generada en el software IBER
Fuente: Propia

Seguido se deberá colocar el hidrograma (Figura 4. 12) y la rugosidad (Figura 4. 13) de terreno. Una vez establecidos los datos sobre la superficie se procede a correr el programa.

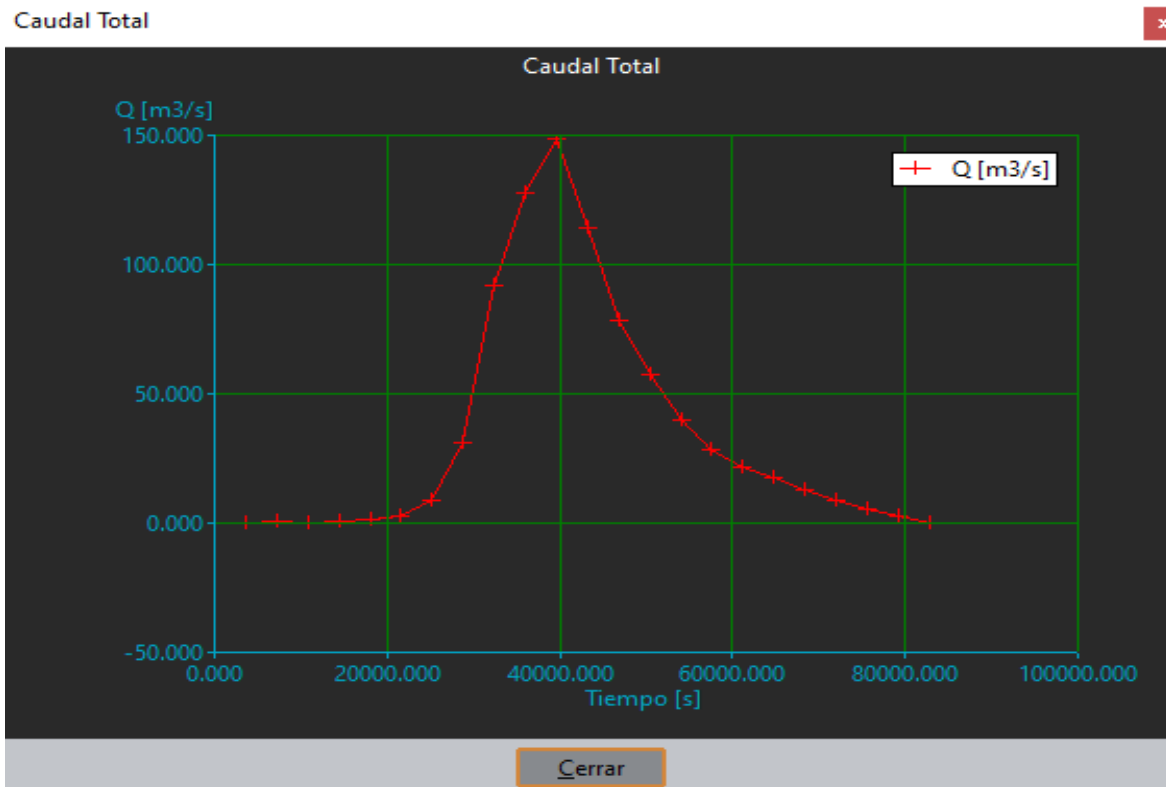


Figura 4. 12. Hidrograma interpretado por el software IBER
Fuente: Propia

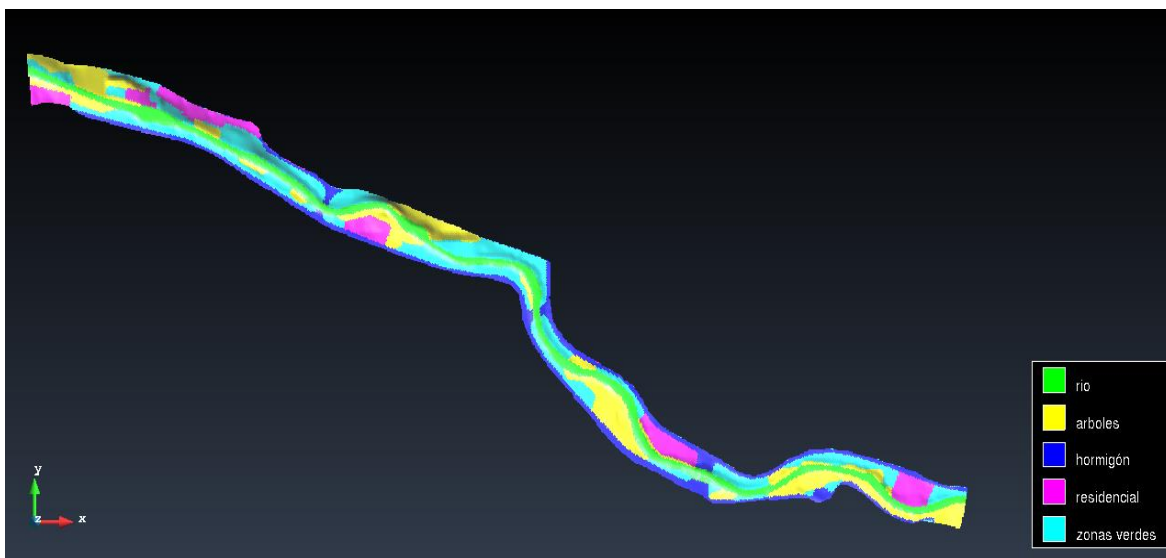


Figura 4. 13. Mapa de rugosidades interpretado por el software IBER
Fuente: Propia

Proceso. Al ingresar los diferentes datos en el software se procede a ejecutar el modelo, el cual comienza a realizar los cálculos sobre la superficie anteriormente cargada, aplicando métodos numéricos para resolver las ecuaciones de Saint Venant (Figura 4. 14).

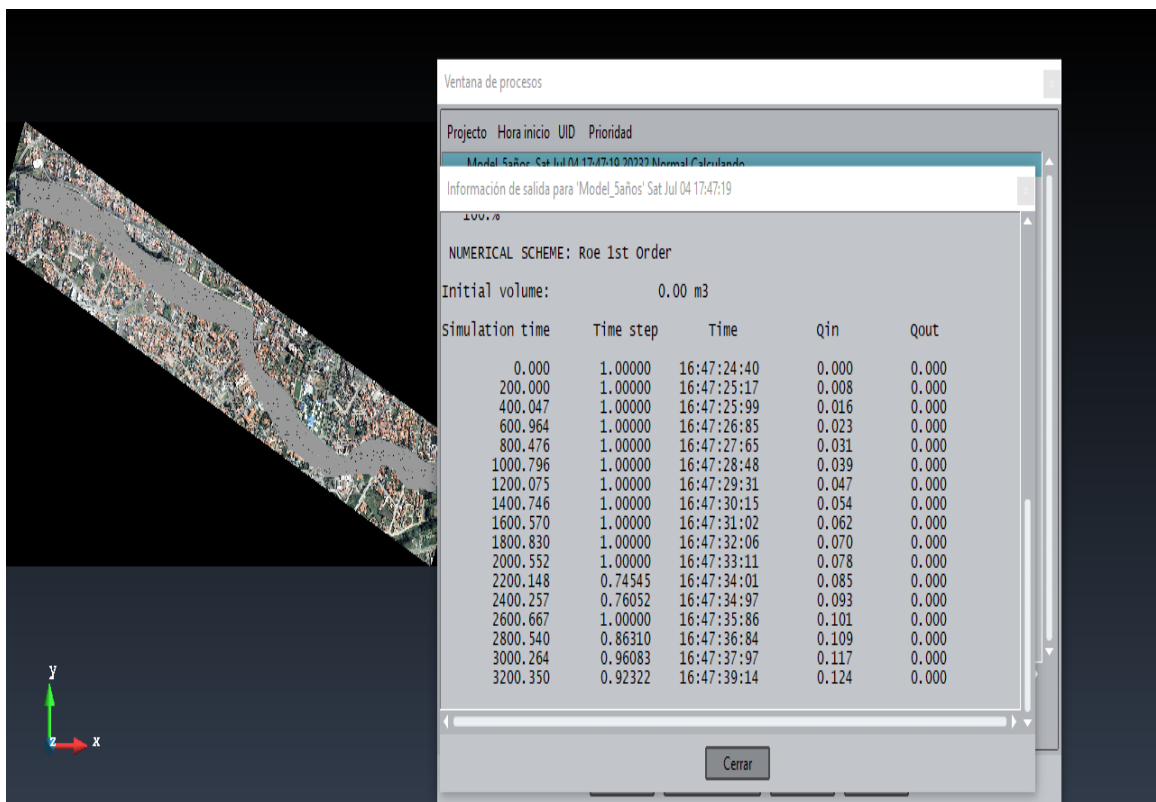


Figura 4. 14. Ventana de cálculo del software IBER
Fuente: Propia

Postproceso. Ya concluido el cálculo se analizan los resultados, para esto el programa permite a través de sus herramientas un mejor manejo de la información, donde se puede generar gráficos, videos y exportar resultados (Figura 4. 15).

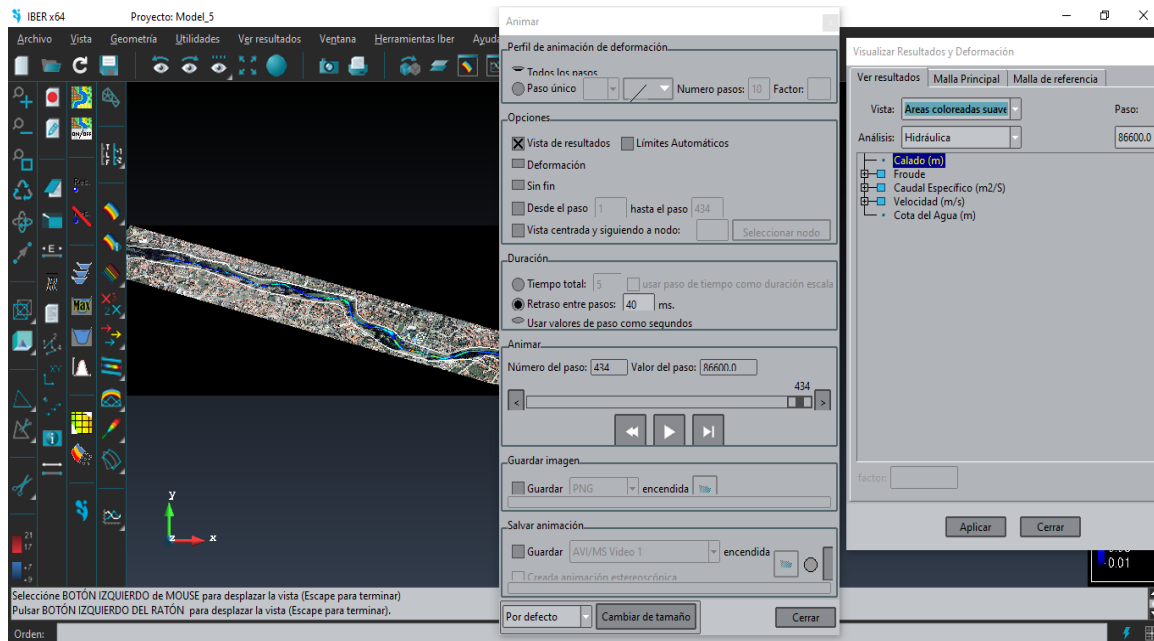


Figura 4. 15. Esquema de análisis de resultados del software IBER
Fuente: Propia

4.4. Calibración y Validación Modelo Numérico IBER

4.4.1. Análisis estadístico

En un trabajo de investigación es importante considerar métodos estadísticos que permitan generar respaldo y validación de los resultados con un grado de confiabilidad aceptable. Las medidas estadísticas a utilizar, evalúan integralmente las propiedades de los diferentes resultados generados por los datos observados y los resultados de la simulación de los modelos hidrodinámicos aplicados. En el siguiente apartado se especifican los métodos estadísticos aplicados en este estudio (Ochoa García, 2014):

Error Medio Absoluto (MAE). Se define como que tan cercano es el resultado del valor calculado con respecto al real (observado). Se basa en el valor absoluto de la diferencia del resultado obtenido calculado y el real, dividido por el número de datos, el resultado obtenido siempre será positivo y representa el mejor ajuste según su valor se aproxime a 0 (Negrón Baez, 2014).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n}$$

Donde:

O_i : Datos observados.

P_i : Datos calculados.

n : Número de datos.

Error Medio Relativo Cuadrado (RRMSE). Realiza la comparación entre el ajuste entre los datos reales (observados) y los calculados. Se realiza elevando al cuadrado la diferencia entre los valores reales y calculados, dividido por el número, como indica su nombre, se debe calcular la raíz cuadrada del valor obtenido. Los valores resultantes iguales a 0 son óptimos ya que los errores no existirían y la relación sería perfecta, el resultado puede ser cualquier valor positivo (Negrón Baez, 2014).

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} * \frac{1}{\bar{O}}$$

Donde:

O_i : Datos observados.

P_i : Datos calculados.

\bar{O} : Media aritmética de los datos observados.

n : Número de datos.

$$0 \leq RRMSE$$

Coefficiente de Eficiencia (EF2). Este coeficiente permite verificar el grado de relación 1:1 de los datos analizados. Los resultados a obtener pueden ser menores o iguales a 1, si el valor obtenido es igual a 1 significa un ajuste perfecto, mayor a 0.7 se considera estadísticamente muy adecuado (Ochoa García, 2014).

$$EF_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Donde:

O_i : Datos observados.

P_i : Datos calculados.

\bar{O} : Media aritmética de los datos observados.

n : Número de datos.

$$-\infty < EF_2 \leq 1$$

Coefficiente de determinación (CD). Este coeficiente expresa la relación entre la variable dependiente respecto a su media, la cual se define a partir del modelo de regresión. Los resultados serán positivos y su valor óptimo será de 1 (Ochoa García, 2014).

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

Donde:

O_i : Datos observados.

P_i : Datos calculados.

\bar{O} : Media aritmética de los datos observados.

n : Número de datos.

$$0 < CD \leq +\infty$$

Desviación Media (BIAS). Representa la tendencia del modelo a sobrevalorar o minimizar una variable, cuantificando el error sistemático del modelo, su resultado óptimo es cero. Es usado generalmente para calcular el error medio sistemático entre los valores calculados y reales (observados) (Ochoa García, 2014).

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n}$$

Donde:

O_i: Datos observados.

P_i: Datos calculados.

n: Número de datos.

$$-\infty < MAE < +\infty$$

Coefficiente de Determinación Múltiple o Coeficiente de Correlación (R²). Este coeficiente determina el rango de ajuste a una línea recta entre los datos reales y calculados. Un resultado de R² igual a 1 define una tendencia lineal perfecta. El valor obtenido es adimensional y se expresa con la siguiente ecuación (Negrón Baez, 2014):

$$R^2 = \frac{Cov(O_i, P_i)^2}{\sigma_o^2 \sigma_p^2}$$

$$0 < R^2 \leq +\infty$$

Donde:

Cov(O_i, P_i)²: Covarianza entre datos observados y calculados.

σ_o²: Varianza de datos observados.

σ_p²: Varianza de datos calculados.

4.4.2. Calibración y Validación

En la fase de la calibración de los diferentes modelos, se busca representar las condiciones más semejantes a la realidad. En este caso, se plantea obtener una representación de calados que asemejen a los datos registrados por la estación limnigráfica Yanuncay AJ Tarqui, comparando entre diferentes series de datos en el punto donde se encuentra ubicada la estación, con el fin de determinar medidas estadísticas que evalúen la precisión del modelo y así ajustar los parámetros para una mejor respuesta.

De acuerdo a un análisis de sensibilidad el parámetro que refleja mayor importancia en los modelos numéricos es el valor de la rugosidad (Ochoa García, 2014). La metodología de calibración aplicada, se basa en definir varios valores de rugosidad de Manning (n), en este estudio se consideró variar los valores de rugosidad del río, zonas verdes y árboles, debido a que tienen una mayor interacción con el flujo.

Para determinar una relación entre los calados registrados y los obtenidos a partir del modelo, se parte de un hidrograma de cierto año, el cual representará el flujo real del cauce, proporcionando una gráfica calado vs tiempo, una vez finalizado el modelo con los datos propuestos, se identifica la ubicación de la estación en el programa, obteniendo la gráfica calado vs tiempo para la respectiva comparación.

Es necesario aclarar que para calibrar los modelos se deben realizar un gran número de corridas, con el fin de establecer la influencia que ejercen los valores de Manning en los diferentes resultados. En la Figura 4. 16, se presenta el comportamiento de los calados a partir de la variación de los valores de la rugosidad “ n ”, obtenidos del modelo con respecto al registro de alturas en el año 2013 por la estación Yanuncay AJ Tarqui.

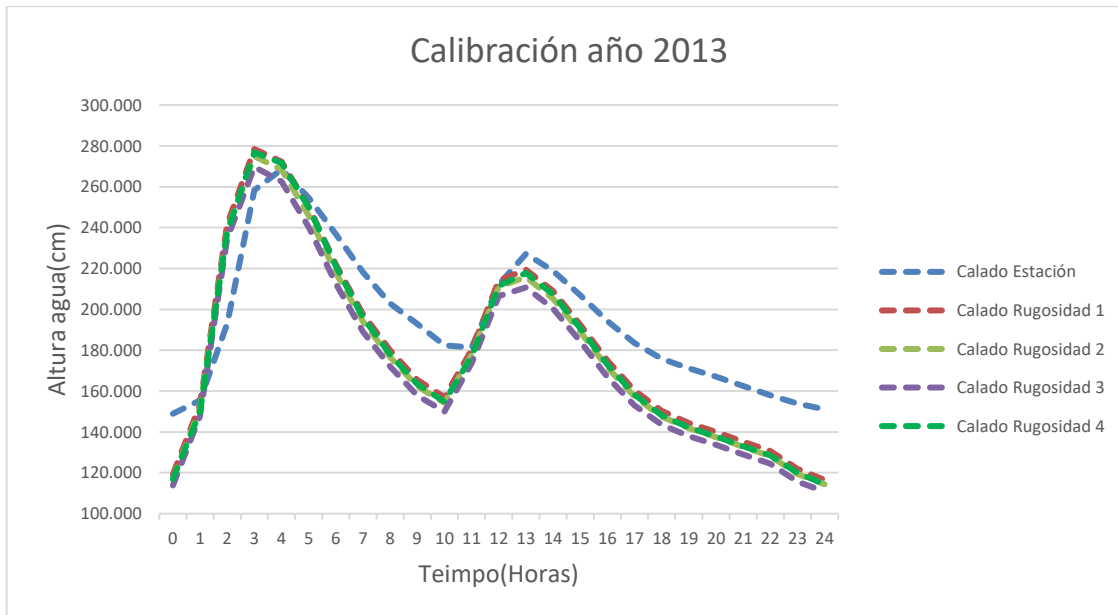


Figura 4. 16. Gráfica comparativa calado – tiempo.
Fuente: Propia

Al realizar un análisis visual de los resultados, se puede determinar que la forma de la evolución de los calados es similar a la evolución real, obteniendo un buen comportamiento en la mayoría de su recorrido. A continuación, en la Tabla 4. 13 se determina los parámetros estadísticos para cada variable:

Tabla 4. 13. Análisis estadístico de los resultados de calado obtenidos a partir del modelo IBER en relación a los datos observados por la estación Yanuncay AJ Tarqui – año 2013.

Hidrograma año 2013	Rugosidad 1: -Rio:0.065 -Arboles:0.1 -Zonas Verdes:0.03	Rugosidad 2: -Rio:0.06 -Arboles:0.095 -Zonas Verdes:0.025	Rugosidad 3: -Rio:0.055 -Arboles:0.09 -Zonas Verdes:0.02	Rugosidad 4: -Rio:0.06 -Arboles:0.15 -Zonas Verdes:0.08	Valor óptimo
<i>Error Porcentual (%)</i>	11.0308	12.1826	14.0940	11.8338	0.000
<i>Error Medio Absoluto</i>	19.9332	22.0269	25.6366	21.3057	0.000
<i>Error Medio Cuadrado</i>	0.1185	0.1279	0.1434	0.1244	0.000
<i>Coficiente de Eficiencia</i>	0.5446	0.4690	0.3329	0.4981	1.000
<i>Coficiente de Determinación</i>	0.4992	0.4890	0.4666	0.4812	1.000
<i>Desviación Media</i>	13.9548	17.0344	21.3956	15.9923	0.000
<i>Coficiente de Det. Múltiple</i>	0.8833	0.8790	0.8744	0.8920	1.000

Fuente: Propia

Según la Tabla 4. 13, la “rugosidad 1” presenta el mejor comportamiento con respecto a los datos reales, los cuales fueron obtenidos por la estación limnigráfica, se debe considerar que las modelaciones se realizaron sobre un MDE de 3 metros de resolución, lo cual implica que, la superficie puede variar con respecto a sus condiciones reales. Sin embargo, según el análisis estadístico el comportamiento definido por el modelo, no presenta valores dispersos con respecto al óptimo.

Para la validación del comportamiento que presenta la “rugosidad 1”, se comprobó a partir de la implementación de diferentes hidrogramas de distintos años (2017 y 2011) en el modelo, además, con sus respectivas graficas calado vs tiempo obtenidas por la estación limnigráfica, se evidenció que las Figura 4. 17 y Figura 4. 18 presentan un adecuado comportamiento siguiendo una similitud en todo su trayecto con respecto a las alturas reales.

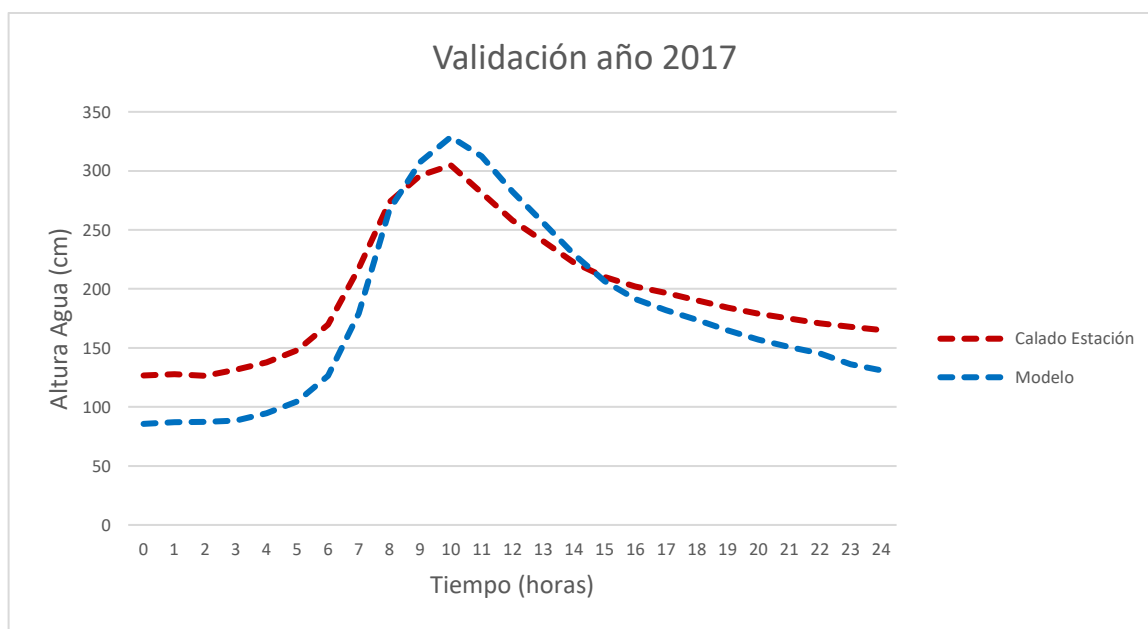


Figura 4. 17. Validación calado estación vs calado modelo – año 2017.

Fuente: Propia

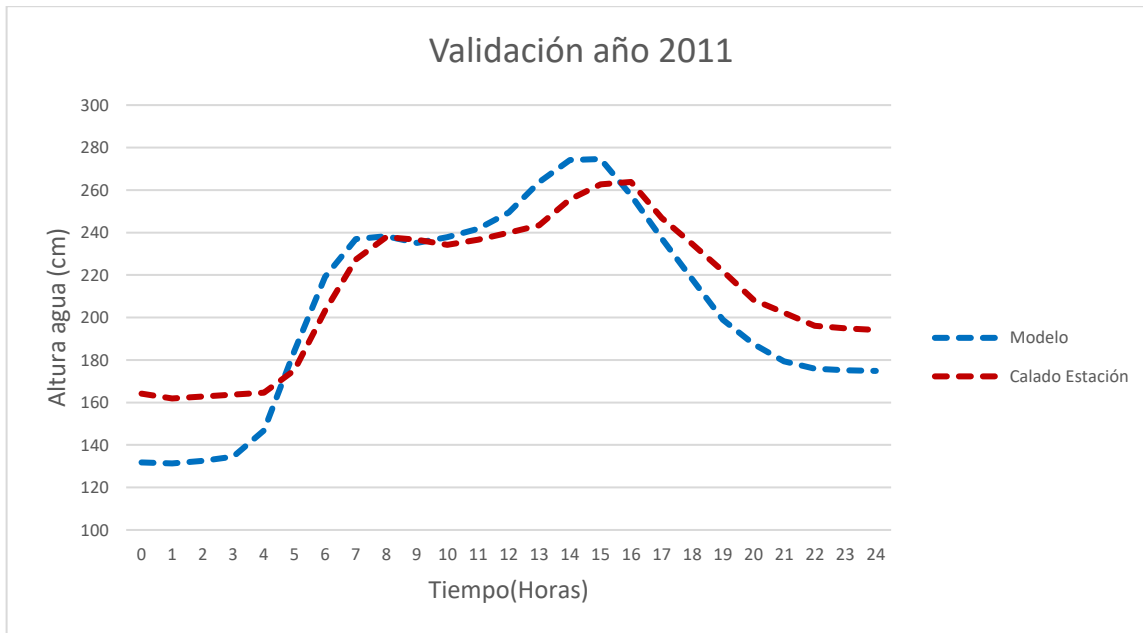


Figura 4. 18. Validación calado estación vs calado modelo – año 2011.

Fuente: Propia

Al realizar el análisis estadístico, con los diferentes resultados se determina que al implementar los modelos con la “rugosidad 1”, presentan resultados similares en los tres modelos como se puede observar en la Tabla 4. 14, de lo que se puede concluir que los valores propuestos de la rugosidad exhiben un comportamiento cuantitativamente adecuado con respecto a los resultados calculados con los observados.

Tabla 4. 14. Análisis estadístico de los resultados de calado obtenidos a partir del modelo IBER en relación a los datos observados por la estación Yanuncay AJ Tarqui – años 2017 / 2013 / 2011 (Rugosidad 1).

Rugosidad -Rio:0.065 -Arboles:0.1 -Zonas Verdes:0.03	2017	2013	2011	Valor óptimo
Error Porcentual (%)	15.5783	11.0307	8.2755	0.000
Error Medio Absoluto	26.1202	19.9329	16.1492	0.000
Error Medio Cuadrado	0.1486	0.1185	0.0868	0.000
Coefficiente de Eficiencia	0.6992	0.5446	0.6883	1.000
Coefficiente de Determinación	0.4774	0.4992	0.5033	1.000
Desviación Media	17.0611	13.9547	7.8256	0.000
Coefficiente de Deter. Múltiple	0.9799	0.8833	0.9265	1.000

Fuente: Propia

Los modelos validados observados en la Figura 4. 17 y Figura 4. 18 presentan un buen comportamiento como se puede verificar en sus trayectorias, siendo similar al compararse con los datos reales de la estacion, según la Tabla 4. 14 las validaciones presentan errores de alrededor del 10%, lo que significa que los valores de rugosidad considerados para estos modelos dan resultados muy optimos, los cuales seran aplicados en el modelo definitivo con los diferentes periodos de retorno estudiados.

CAPÍTULO V
RESULTADOS

Capítulo IV

Resultados

5.1. Análisis de Resultados

En el análisis de resultados se interpretará las variables hidráulicas más relevantes en la zona de estudio, los modelos a correr son determinados por los hidrogramas de crecida proporcionados por la proyección de los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años. Además, las características de los modelos a ejecutar son iguales, usando los valores de rugosidad previamente establecidos en la calibración.

A continuación, en la Figura 5. 1, correspondiente a un evento con periodo de retorno de 5 años con un caudal máximo $Q_{max} = 165.3 \text{ m}^3/\text{s}$, donde se identifican varias zonas afectadas, siguiendo el flujo del cauce se establece un primer desbordamiento en el Parque Lineal Primero de Mayo Río Yanuncay entre la calle Francisco de Orellana y 12 de Octubre, con un calado aproximado de 0.6 metros, afectando al parque lineal y la Av. Primero de Mayo. Consecutivamente, en el sector Parque Lineal Yanuncay se encuentran afectadas ambas partes del cauce, siendo más notable la inundación en la las viviendas y parque lineal que se encuentran ubicados en la Av. 27 de Febrero, con una profundidad máxima de 1.4 metros aproximadamente, cabe indicar que al desbordarse del cauce en la vía anteriormente mencionada, avanza continuamente hasta la Estación de Bomberos N° 3 e inundando esta zona respectivamente, generando alturas promedios aproximadas de 30 cm en sus calados.

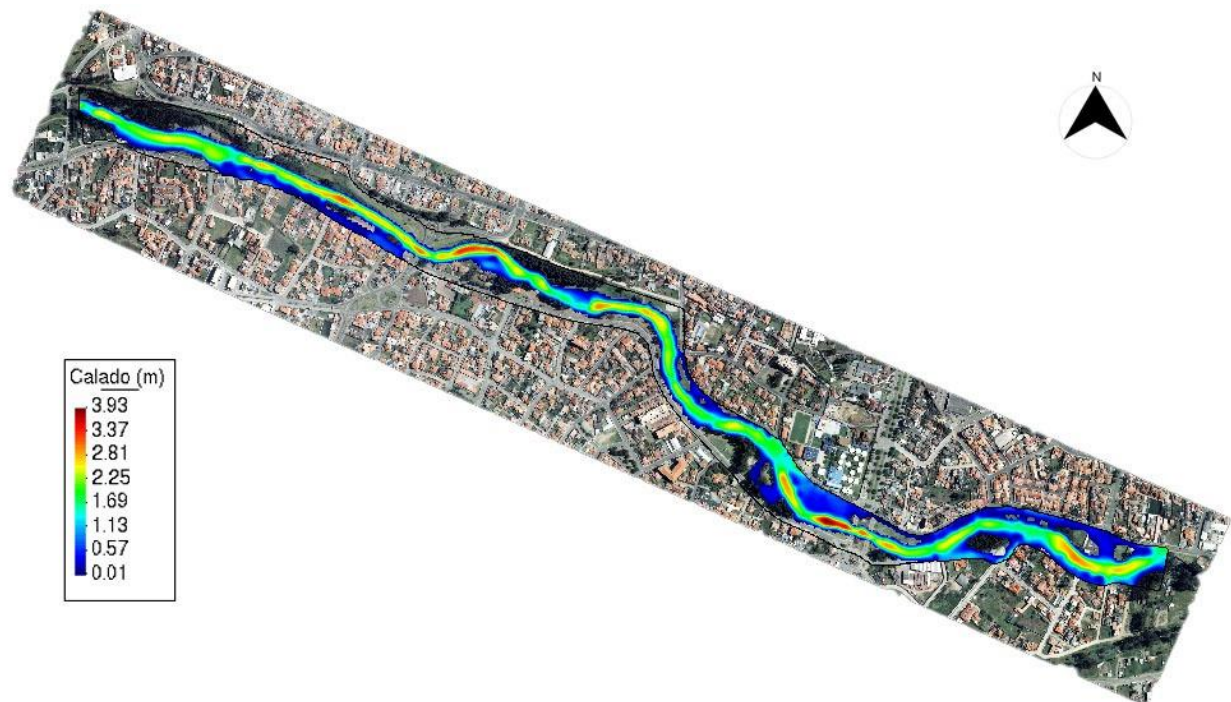


Figura 5. 1. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 5 años, generado por IBER.

Fuente: Propia

De igual manera, en la Figura 5. 2 correspondiente a un evento con periodo de retorno de 10 años tiene un caudal máximo $Q_{max} = 206.6 \text{ m}^3/\text{s}$, donde se identifican las mismas zonas afectadas, como se observó en la Figura 5. 1, con la diferencia del aumento de área de inundación en el Parque Lineal Yanuncay y la zona de Estación de Bomberos N° 3, con alturas promedios de 0.3 m y 0.5 m de calado, respectivamente.

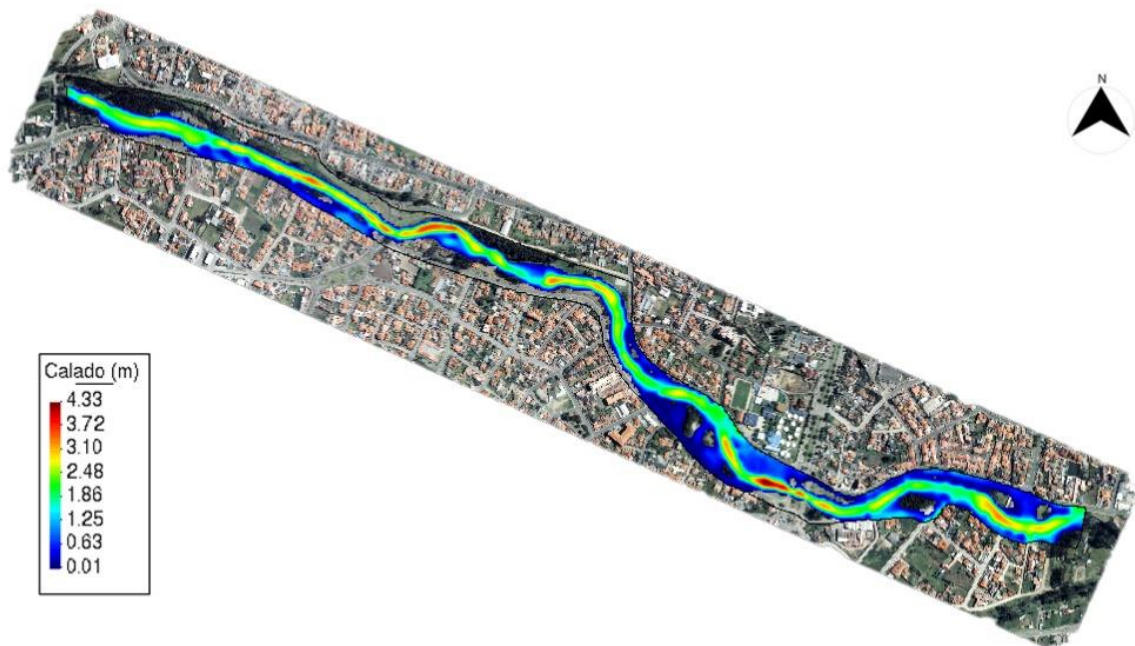


Figura 5. 2. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 10 años, generado por IBER.

Fuente: Propia

Por otro lado, en la Figura 5. 3 se representa un evento con periodo de retorno de 25 años donde su caudal máximo es de $258.7 \text{ m}^3/\text{s}$, identificando un mayor desborde en la Av. Primero de Mayo, iniciando en la calle Francisco de Orellana y finalizando en la Calle Garcilaso de la Vega con una longitud aproximada de 1 km con una altura promedio de 0.4 m. Además, se observa un incremento de calado a la altura de la calle Pasaje Doce de Octubre con una profundidad máxima de 1.4 m.

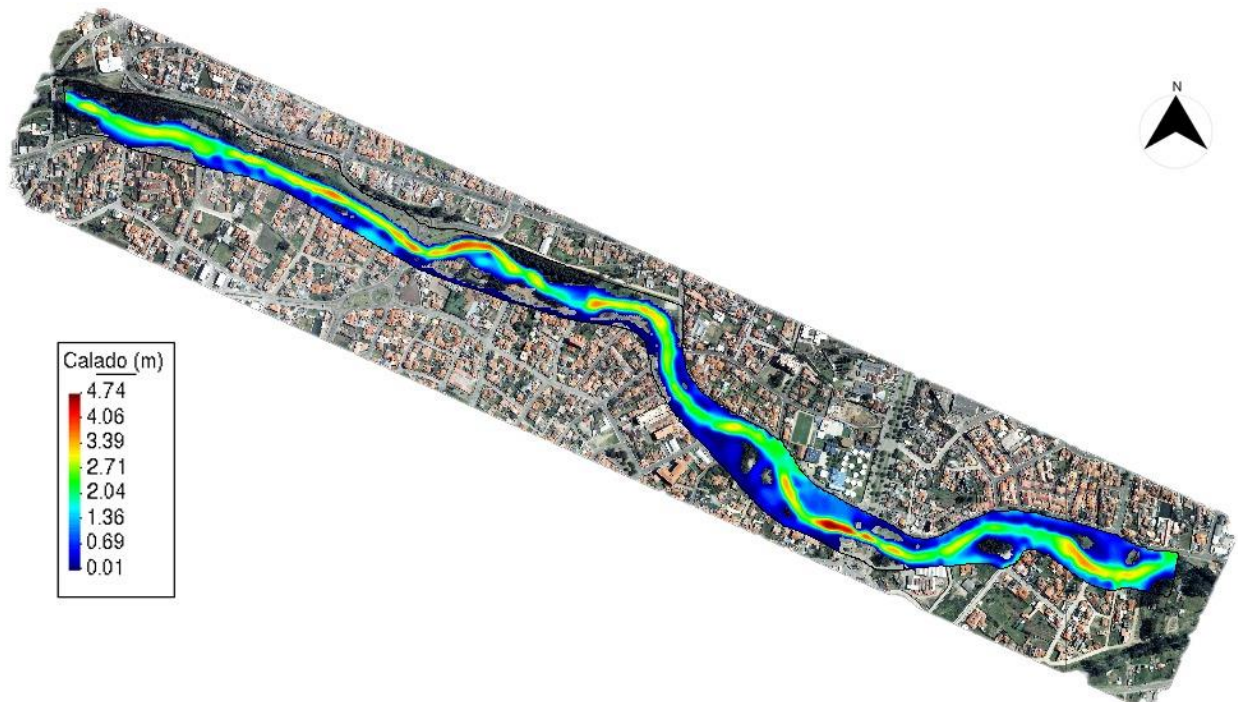


Figura 5. 3. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 25 años, generado por IBER.

Fuente: Propia

De la misma manera, Figura 5. 4, correspondiente a un periodo de retorno 50 años con un $Q_{max} = 297.4 \text{ m}^3/\text{s}$, tienen un comportamiento similar a los anteriores eventos, debido a que los desbordamientos e inundaciones ocurren en las mismas zonas establecidas, con la diferencia del aumento de los calados y áreas de inundación.

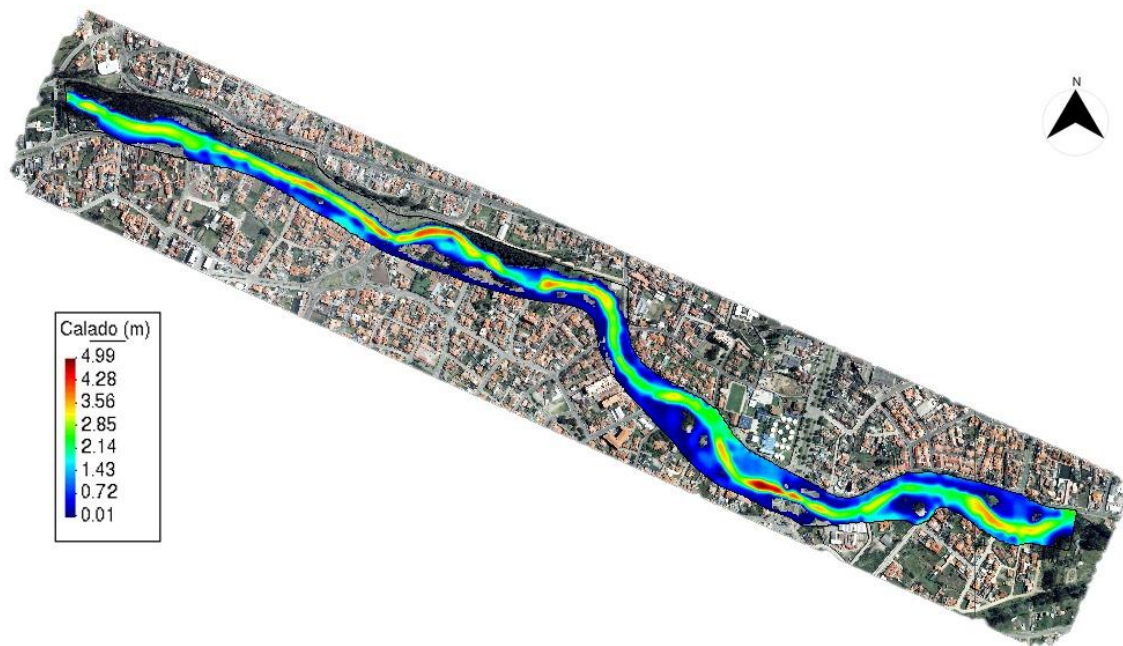


Figura 5. 4. Mapa de inundaciones a partir de áreas coloreadas que representan la profundidad de inundación en un evento con periodo de retorno de 50 años, generado por IBER.

Fuente: Propia

A continuación, en la Figura 5. 5, se presentan las magnitudes de los calados máximos a partir de un esquema de áreas coloreadas para los diferentes periodos de retorno, dichas profundidades varían desde la calle Francisco de Orellana hasta la zona de Quinta Lucrecia donde alcanza las máximas alturas en el cauce, en el periodo de 5 años se genera una altura de agua promedio de 2 metros y una altura máxima promedio de 3.1 metros. De igual forma, en los periodos de retorno de 10, 25 y 50 años se determinan profundidades medias de 2.3, 2.6 y 2.8 metros y máximas de 3.3, 3.55 y 3.8 metros, respectivamente.

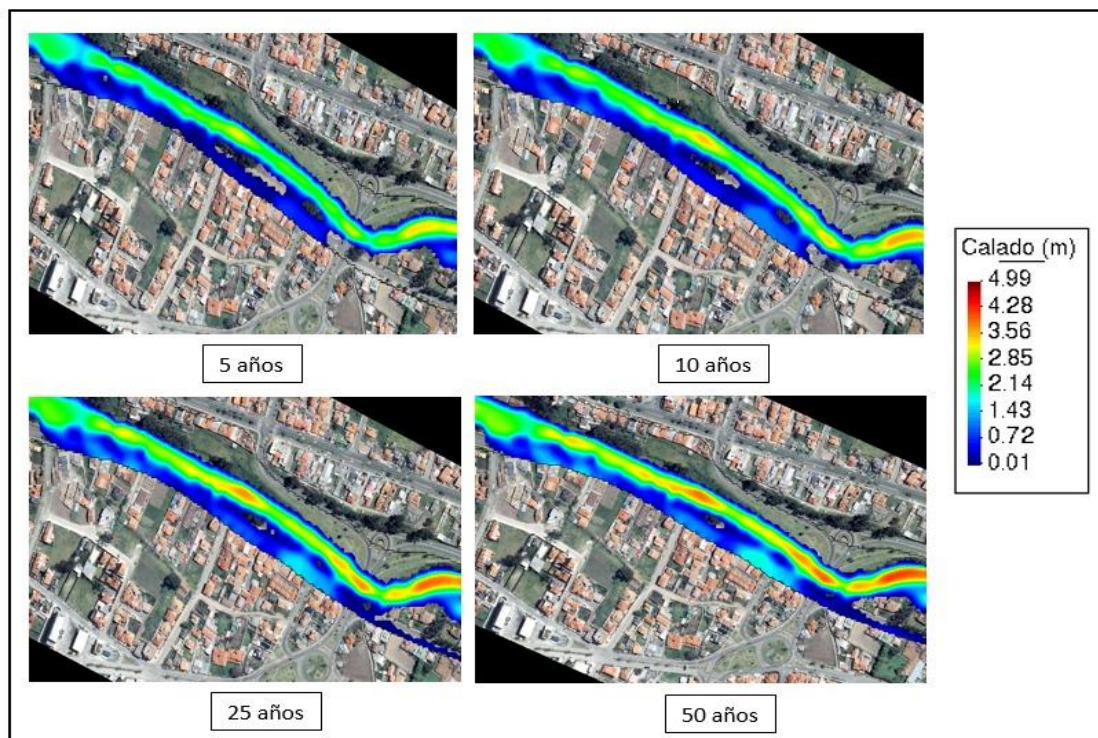


Figura 5. 5. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona Parque Lineal Primero de Mayo.

Fuente: Propia

En la zona de Quinta Lucrecia (Véase Figura 5. 6), la inundación es evidente afectando su parte posterior progresivamente según los diferentes periodos de retorno, con calados máximos promedios de 0.9, 1.15, 1.4 y 1.6 metros, para los eventos de retorno mencionados con anterioridad, por otra parte, en esta área se puede evidenciar que, en los periodos de 25 y 50 años, existe la presencia de agua a lo largo de la Avenida 24 de Mayo con un calado máximo aproximado de 8 y 15 cm, respectivamente. Además, con respecto al calado máximo en el cauce es el mismo identificado en la Figura 5. 5.

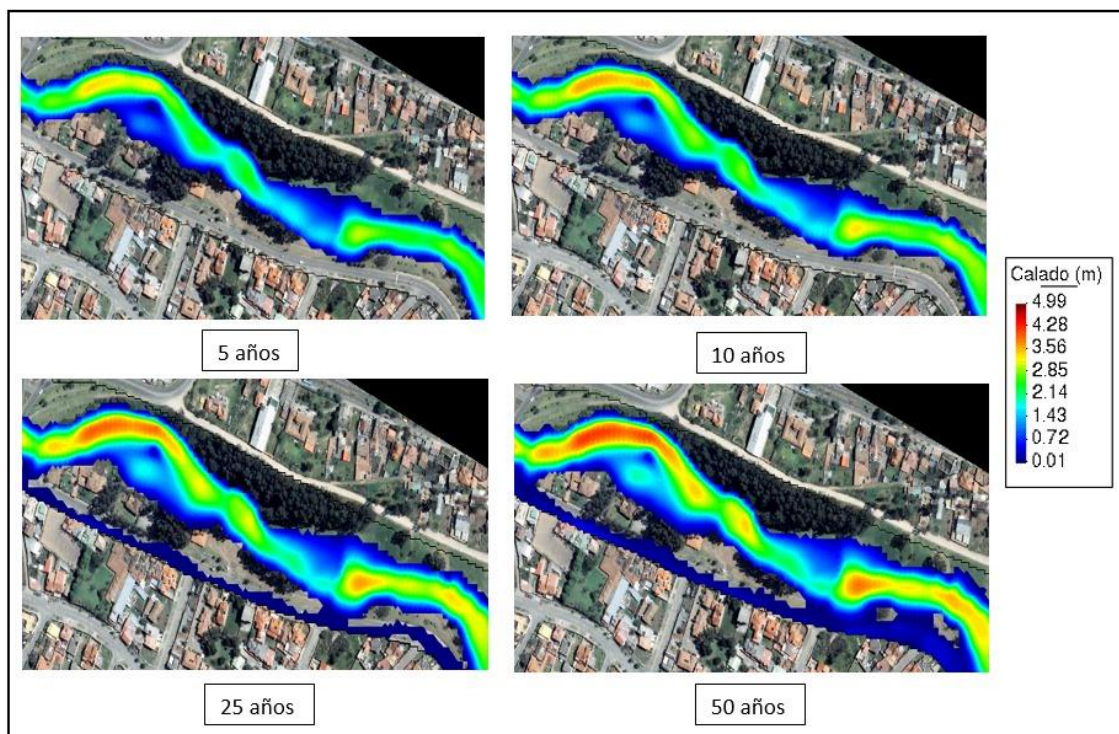


Figura 5. 6. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona Salones de Recepciones Quita Lucrecia.
Fuente: Propia

De igual manera, como se puede observar en la Figura 5. 7, existe una variación de calados en el cauce, los cuales se generan desde el parque lineal Yanuncay hasta llegar a los Tres puentes, con alturas máximas aproximadas de 2.8, 3.1, 3.5 y 3.8 metros para los periodos de 5, 10, 25 y 50 años, correspondientemente. En el parque lineal Yanuncay, se puede observar que existe una diferencia en el área de inundación en el evento de retorno de 5 años en comparación con los periodos de 10, 25 y 50 años, los cuales son similares, tomando valores de profundidad máximos aproximadas de 0.3, 0.6, 0.83 y 0.95 metros, respectivamente. Además, en la zona de la Av. 27 de Febrero, donde se establecen viviendas, se observa una franja de inundación semejante en todos los periodos de retorno, dando como resultados las siguientes alturas de calado máximo: 1.6 m (5 años), 1.75 m (10 años), 2.1 m (25 años) y 2.5 m (50 años).

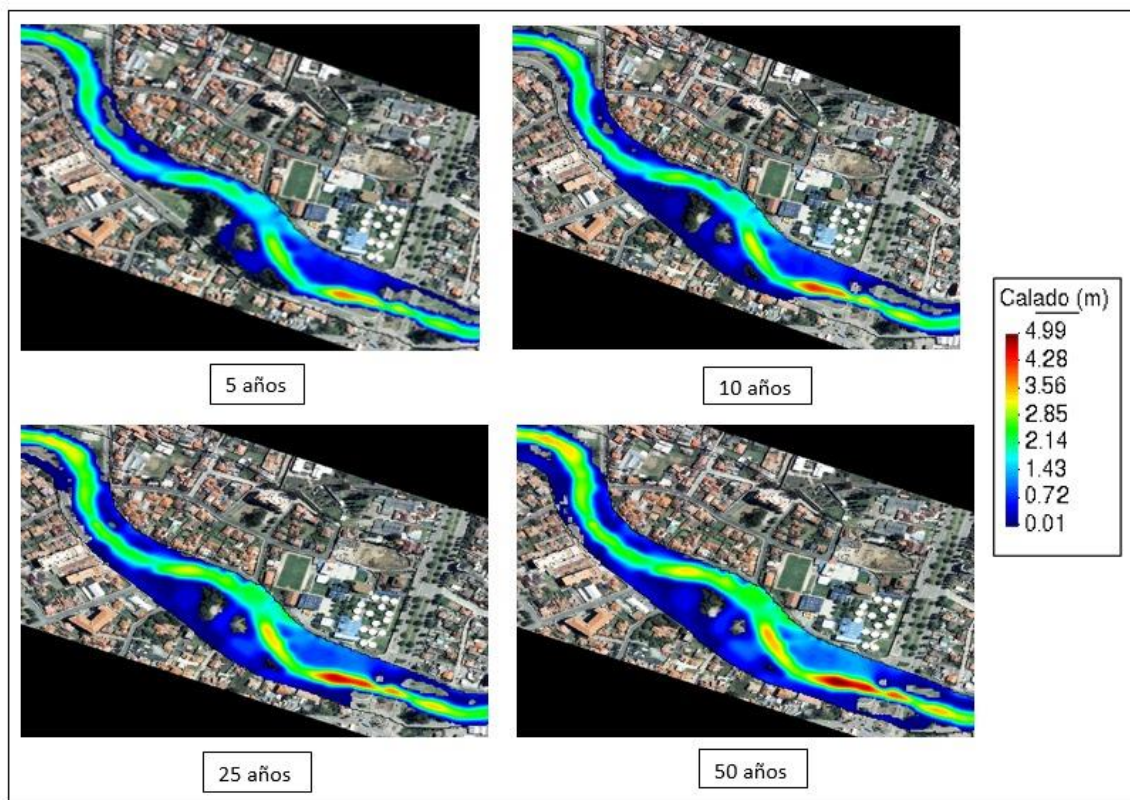


Figura 5. 7. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona parque lineal Yanuncay.

Fuente: Propia

Consecutivamente, en la Av. 27 de Febrero paralela al río Yanuncay en la zona de la Estación de Bomberos N° 3 se establecen inundaciones que cubren toda la avenida, con una profundidad promedio de 0.5, 0.65, 0.8 y 1 metros para los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años, respectivamente. Al mismo tiempo, en la parte frontal en la zona conformada por la calle Paseo de Rio Yanuncay, la cual se cubre totalmente por la inundación, se generan calados promedios de 0.7, 0.95, 1.3 y 1.55 metros para los periodos establecidos. Adicionalmente, los calados máximos formados en el en el cauce son de 2.7, 3, 3.2 y 3.5 metros para los periodos de retornos previamente mencionados, los cuales se pueden observar en la Figura 5. 8.

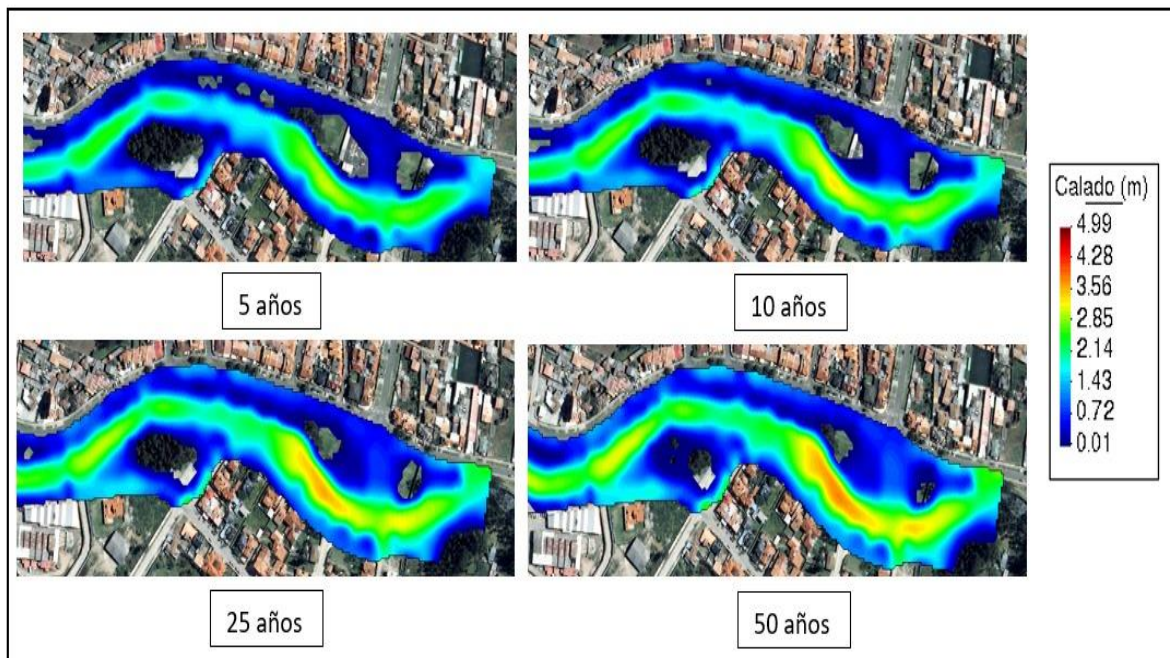


Figura 5. 8. Mapa de la magnitud de los calados a partir de áreas coloreadas para diferentes periodos de retorno, generado por IBER – Zona estación de Bomberos N° 3.

Fuente: Propia

En la Figura 5. 9, Figura 5. 10, Figura 5. 11 y Figura 5. 12, se determina las velocidades medias a partir de un esquema de áreas coloreadas, donde se identifican las zonas de aceleración y desaceleración, que son generados por los diferentes periodos de retorno. En la Figura 5. 9, la cual pertenece a la zona del parque lineal Primero de Mayo, se reconocen varias zonas de aceleración y desaceleración. Entre el punto A y B, se observa una zona de desaceleración en todos los periodos analizados, además, entre el tramo B-C, se forman zonas de aceleración y desaceleración continuas, finalmente, entre los puntos C y D, se identifica una velocidad continua.

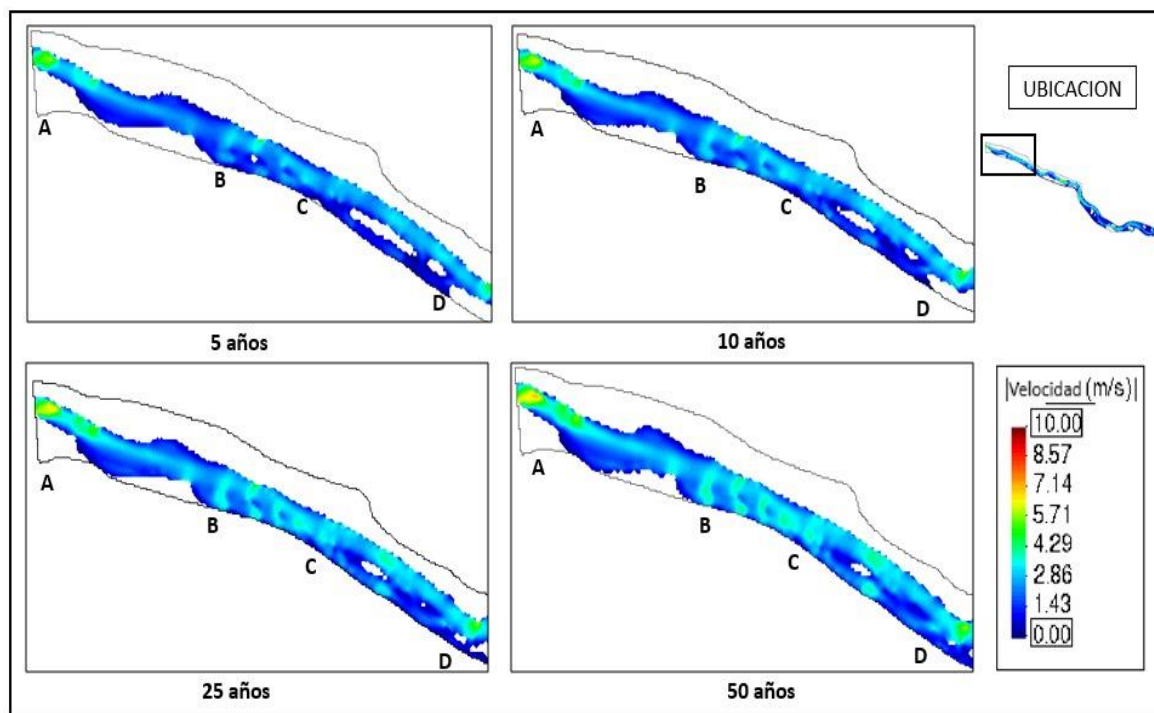


Figura 5. 9. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona parque lineal Primero de Mayo comprendida entre la calle Francisco de Orella y Av. 12 de Octubre, para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.

Fuente: Propia

Siguiendo el recorrido del cauce, en la zona de la sala de recepciones Quinta Lucrecia ubicada entre la Av. Primero de Mayo y Av. Doce de Octubre (Figura 5. 10), en el segmento E – F – G, el flujo aumenta su velocidad constantemente, siendo más notable su aceleración en el tramo F – G, consecutivamente en el tramo G -H se observa una desaceleración.

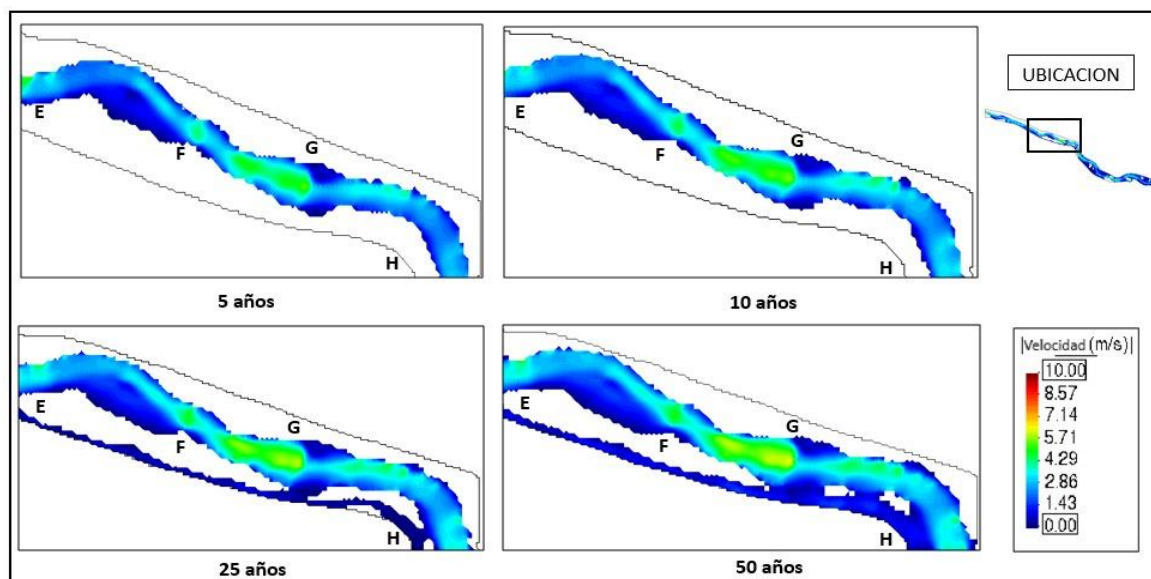


Figura 5. 10. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona Quinta Lucrecia para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.

Fuente: Propia

De igual manera, en la zona parque lineal Yanuncay (Figura 5. 11), se establece una desaceleración continua iniciando en el punto I, pasando por el punto J y finalizando en el punto K, donde nuevamente se genera una aceleración.

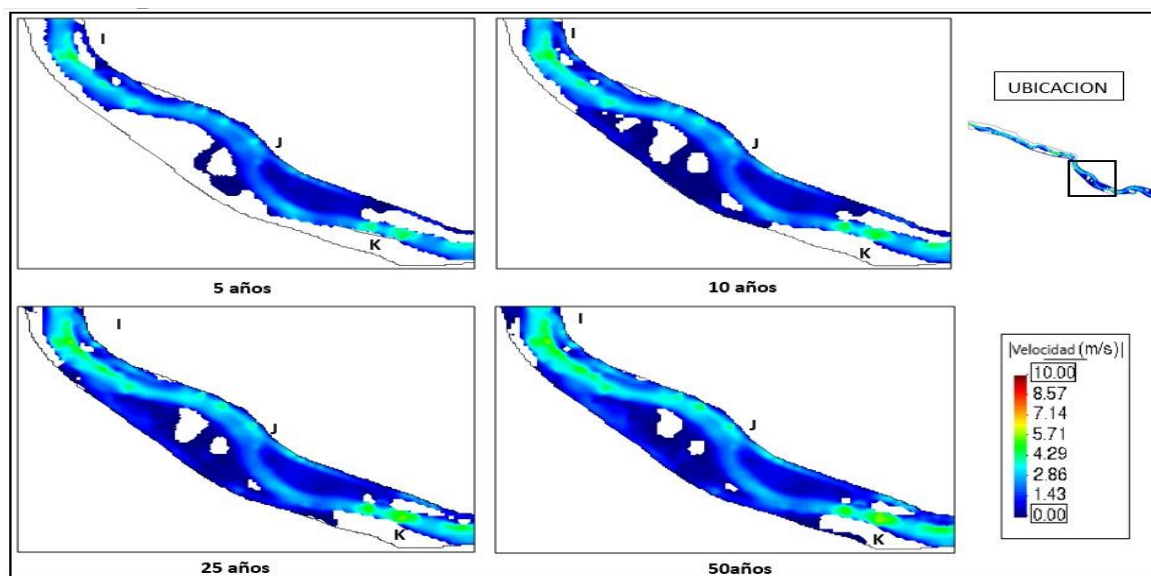


Figura 5. 11. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona Parque Lineal Yanuncay Octubre para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.

Fuente: Propia

Por último, en el tramo establecido por la zona de la Estación de Bomberos N ° 3, a partir del punto L hasta el punto M, existe una desaceleración, consecutivamente desde el punto M se genera una aceleración y desaceleración hasta llegar al punto N, lugar donde nuevamente se produce un aumento de velocidad (Figura 5. 12).

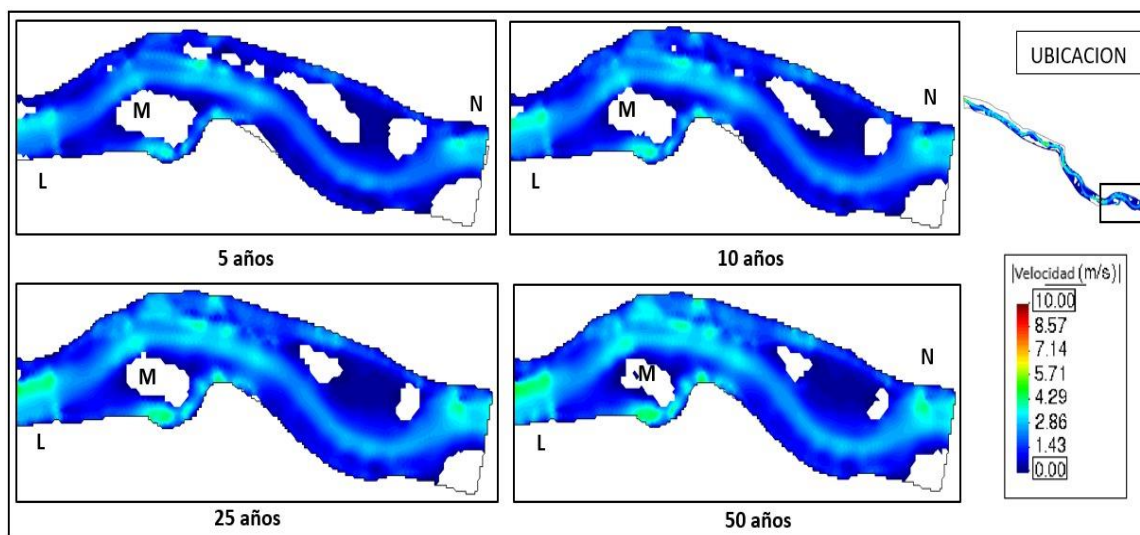


Figura 5. 12. Esquema de la magnitud de las velocidades medias en la zona de la Estación de Bomberos N ° 3 para diferentes periodos de retorno, generado por IBER.

Fuente: Propia

Como resultado del análisis de las velocidades en la zona de estudio, se evidenció el cambio continuo de aceleración y desaceleración en varios tramos, debido a que este cauce es característico de un río de montaña, el cual presenta cambios bruscos de pendientes y cantos rodados de gran magnitud en su trayectoria.

En el siguiente apartado se realiza un análisis de la magnitud de velocidad media para los diferentes periodos de retorno modelados, identificando zonas de estancamiento y desborde en el cauce natural, estableciendo tres zonas primordiales en el tramo analizado.

En la Figura 5. 13, correspondiente a un periodo de retorno de 5 años, se identifican diferentes zonas de desborde y estancamiento, siendo la zona de la Estación de Bomberos N° 3 con mayores zonas de estancamiento y la zona del Parque Lineal Yanuncay con mayores puntos de desborde.

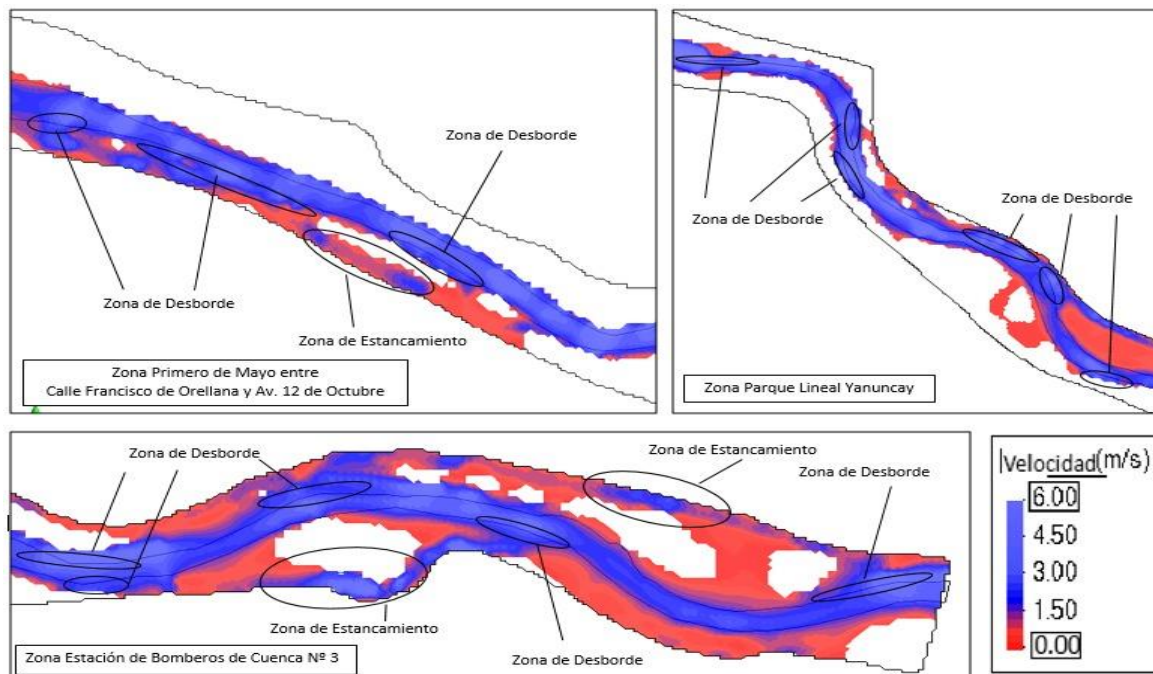


Figura 5. 13. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 5 años, generados en IBER.
Fuente: Propia

Figura 5. 14, corresponde a un evento con periodo de retorno de 10 años, la cual es similar a la Figura 5. 13, identificando las mismas zonas de desborde y estancamiento que se generan en el periodo de retorno de 5 años.

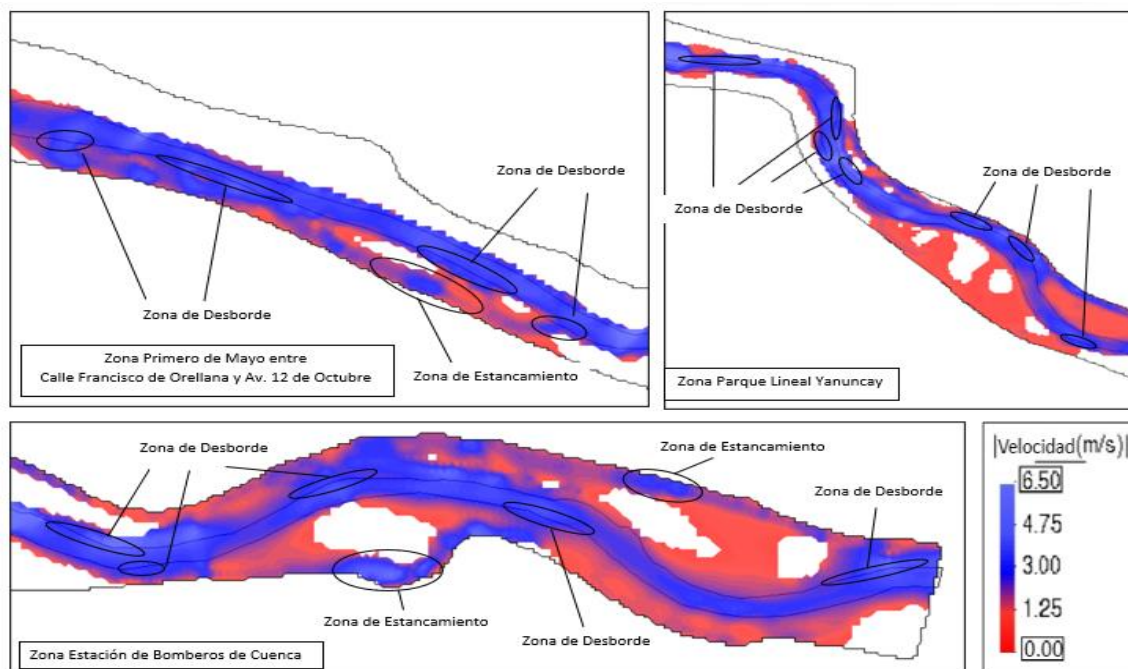


Figura 5. 14. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 10 años, generados en IBER.
Fuente: Propia

Figura 5. 15, existe un incremento de varios puntos de desborde y estancamientos para un periodo de retorno de 25 años, comparando con las figuras anteriores, se evidencia un aumento de longitud de desbordes en todas las zonas analizadas, al igual que el incremento de áreas de estancamiento.

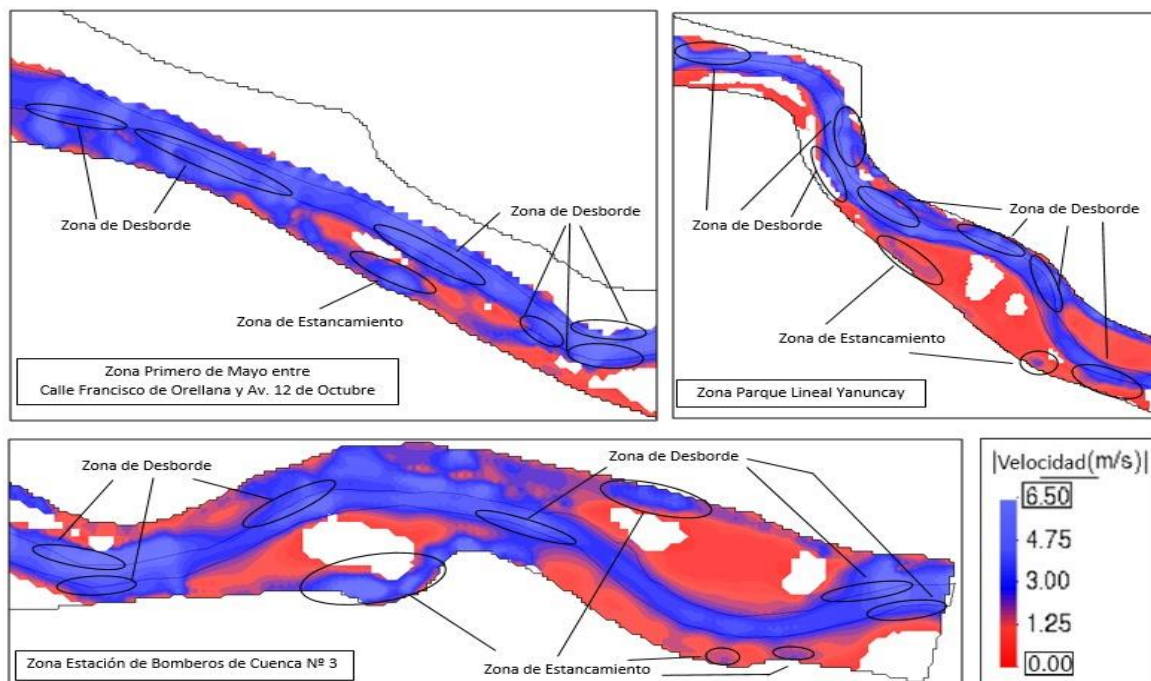


Figura 5. 15. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 25 años, generados en IBER.

Fuente: Propia

Finalmente, en la Figura 5. 16 correspondiente a un periodo de 50 años, se observa de igual manera una similitud entre las zonas de desbordamiento y estancamiento analizadas en la Figura 5. 15, concluyendo que en todas figuras establecidas entre la Figura 5. 13 y Figura 5. 16, tienen un comportamiento semejante en todos los puntos de desborde y estancamiento identificados.

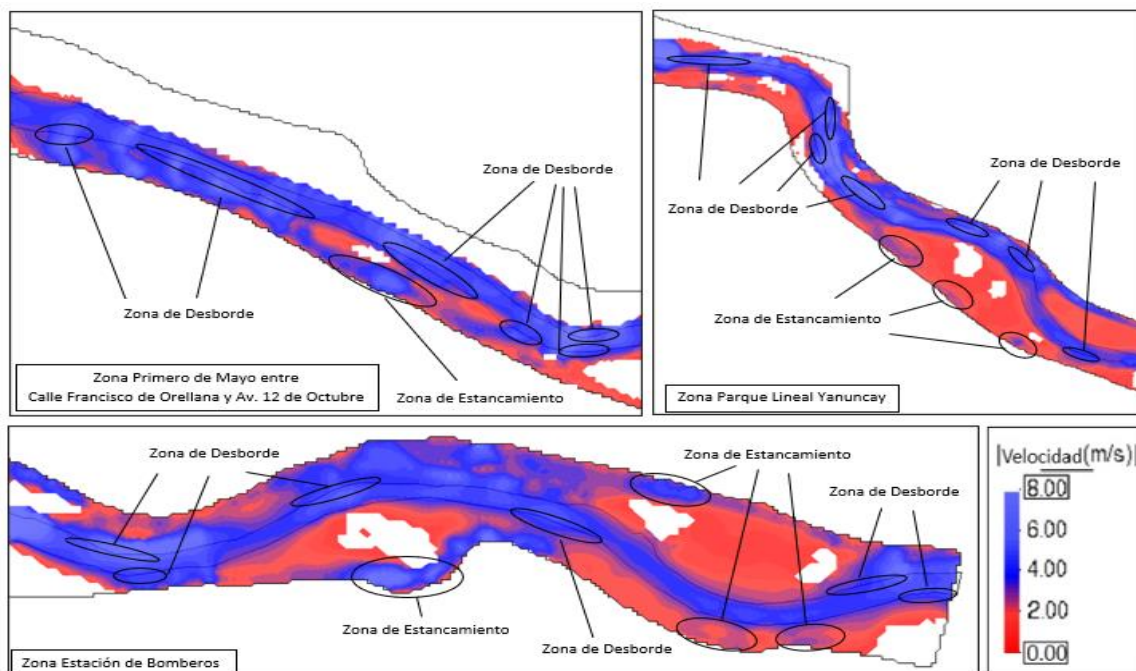


Figura 5. 16. Esquema de las zonas de desborde y estancamiento para un periodo de retorno de 50 años, generados en IBER.

Fuente: Propia

A continuación, en la Figura 5. 17, Figura 5. 18, Figura 5. 19 y Figura 5. 20, se presenta el número de Froude en el flujo del tramo analizado para los periodos de retorno considerados, donde se señalan las zonas con variaciones de régimen subcrítico a supercrítico e inversamente. Como se puede observar existen cambios en el régimen, lo que provoca erosiones en el cauce, por lo general, son generados por cambios bruscos de pendiente o de la sección transversal del canal natural.

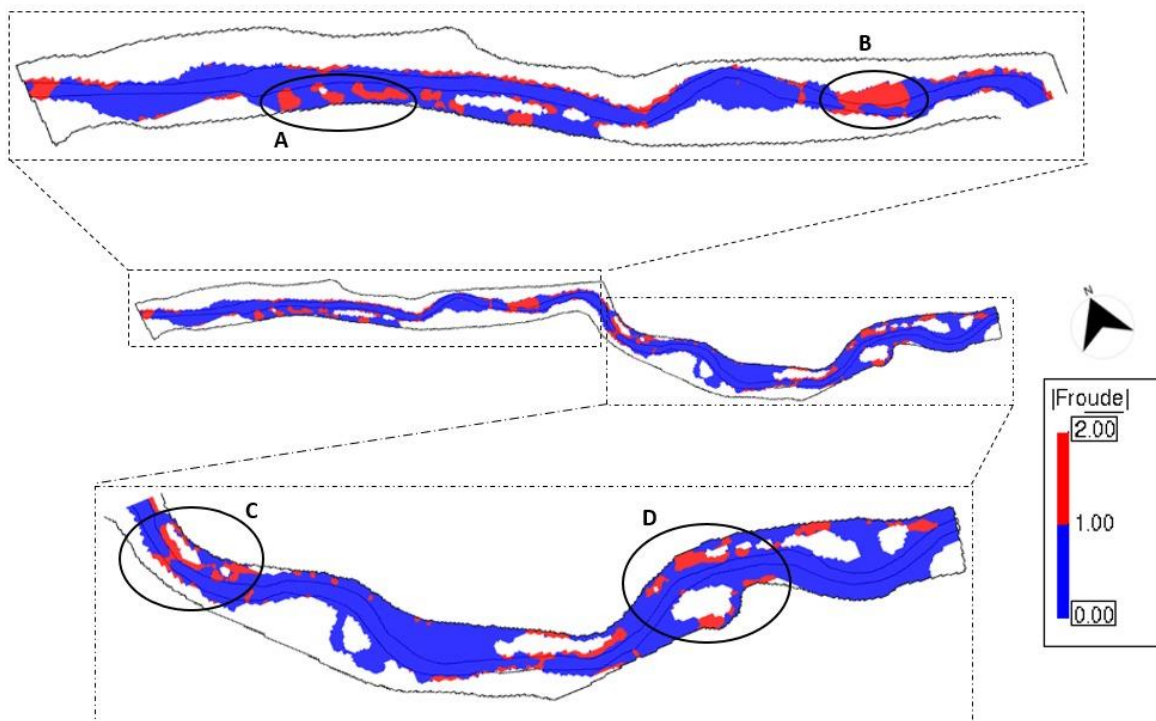


Figura 5. 17. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 5 años, resultados obtenidos en IBER.
Fuente: Propia

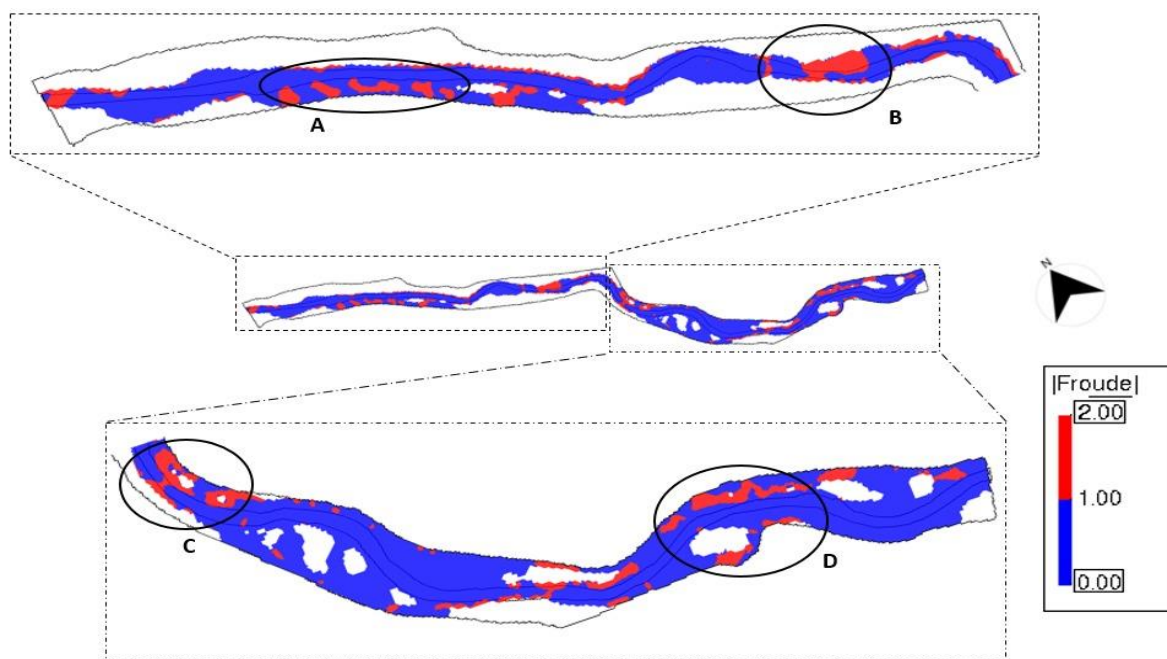


Figura 5. 18. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 10 años, resultados obtenidos en IBER.
Fuente: Propia

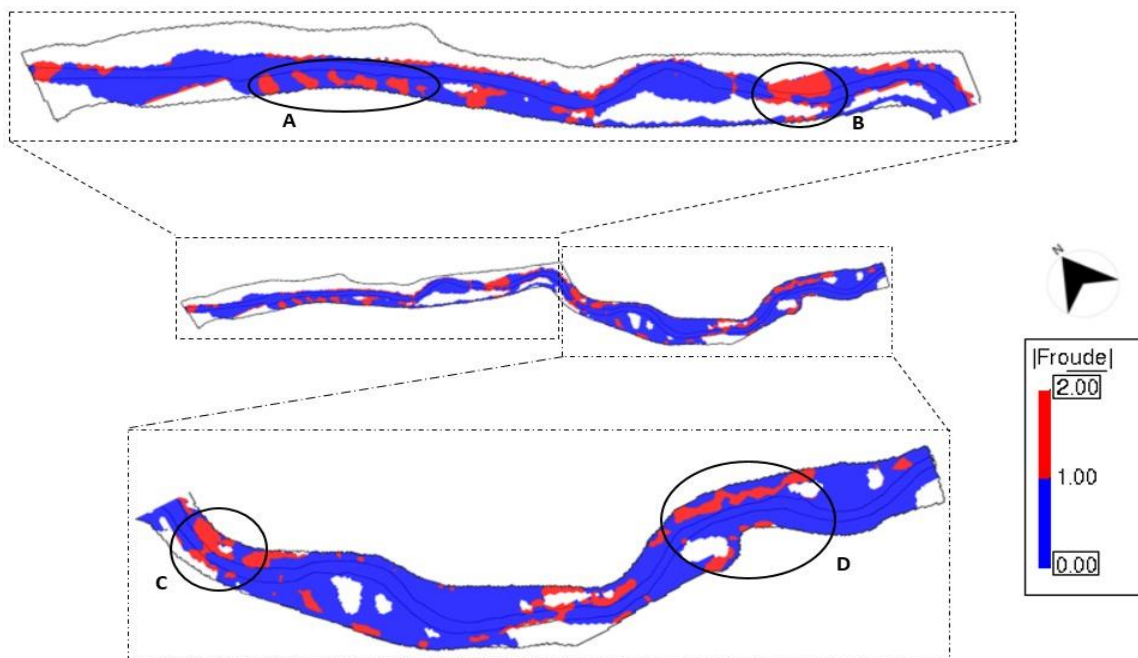


Figura 5. 19. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 25 años, resultados obtenidos en IBER.
Fuente: Propia

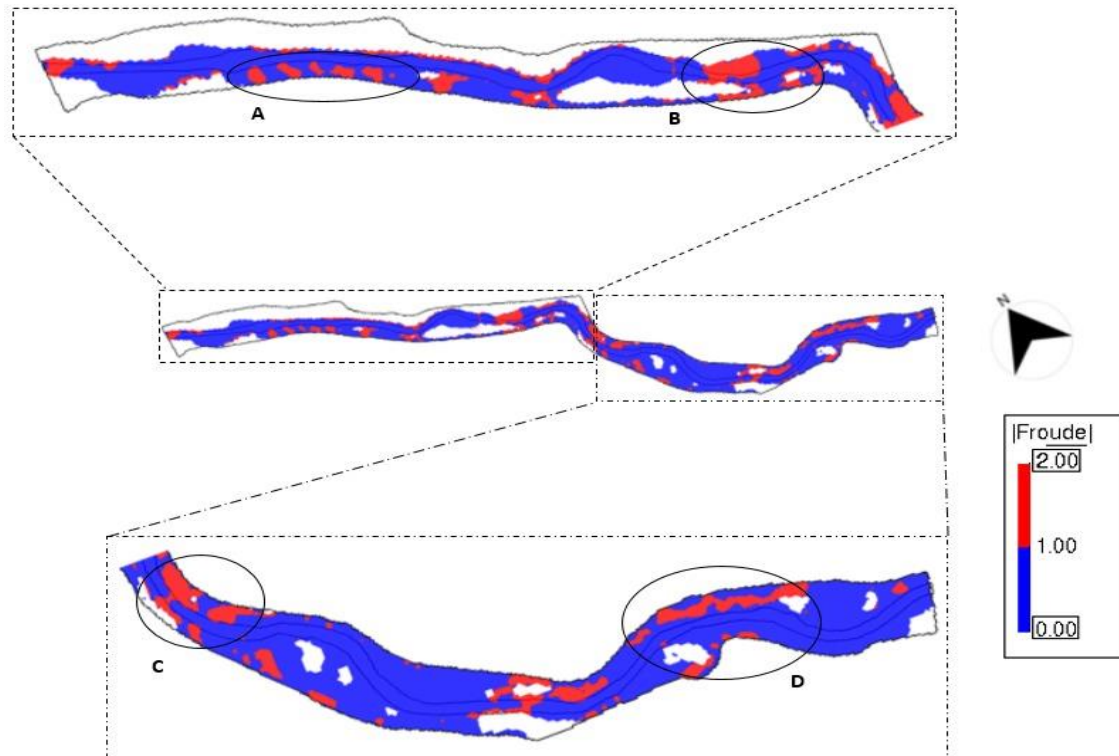


Figura 5. 20. Número de Froude en el tramo comprendido entre el Puente de la Av. Loja hasta el Jardín Botánico de la Ciudad de Cuenca para el periodo de retorno de 50 años, resultados obtenidos en IBER.
Fuente: Propia

A partir de la Figura 5. 17, Figura 5. 18, Figura 5. 19 y Figura 5. 20, existe un comportamiento del cambio de régimen similar en todos los eventos de periodos de retorno, generado flujos supercríticos o rápido y subcríticos o lento, en cuatro zonas relevantes. En la zona A, establecida entre la calle Francisco de Orellana y Av. 12 de Octubre, ocurre un comportamiento variante entre subcrítico y supercrítico consecutivamente, de igual forma, en punto B ubicada por la zona de Quinta Lucrecia, se observa un comportamiento supercrítico en una gran superficie afectando ambas franjas adyacentes al cauce, consecutivamente en el punto C, ubicado cerca del Parque Lineal Yanuncay, encontramos de la misma manera una superficie amplia con régimen supercrítico, afectando principalmente a la Av. 27 de Febrero. Finalmente, en el punto D, localizado por la zona Estación de Bomberos N ° 3, se define un tramo longitudinal extenso con flujo supercrítico generado en dirección a la Av. 27 de Febrero.

En la Tabla 5. 1, se detalla la estimación de áreas de drenaje e inundación resultantes de las modelaciones hidrodinámicas para los diferentes periodos de retorno, aplicadas sobre el área de estudio con una extensión de 31.67 Has.

Tabla 5. 1. Áreas de drenaje e inundación en la zona de estudio.

Periodos de retorno	Área de Drenaje (Has)	Área de Inundación (Has)	Área de Drenaje (%)	Área de Inundación (%)
5 años	16.90	11.09	53.37	35.01
10 años	19.05	13.24	60.17	41.81
25 años	21.17	15.36	66.87	48.50
50 años	22.33	16.52	70.53	52.17

Fuente: Propia

De la Tabla 5. 1 se define, que el área de inundación cubre alrededor del 35% en todos los periodos de retorno, siendo el periodo de retorno de 50 años el más crítico con un 52.17% de inundación con respecto al área de estudio. Por otro lado, el área drenaje que existe en la zona de estudio sobrepasa el 50% en todos los periodos de retorno, generando la mayor área con 70.53% en relación a la zona de estudio para el periodo de retorno de 50 años.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

A partir del análisis morfológico de los Modelos Digitales de Elevación del terreno con resoluciones de 3, 12.5, 30 y 50 metros, se determinó que el MDT de 3 metros se asemeja a la morfología del cauce en la zona de estudio de acuerdo a los índices de similitud necesarios para ser aplicados en un análisis hidráulico de baja resolución. Sin embargo, todos los MDE presentan resultados similares del estudio a mayor escala de la cuenca del río Yanuncay.

Uno de los datos importantes para la ejecución del modelo hidrodinámico bidimensional, fue la estimación de los caudales de crecida para los eventos con diferentes periodos de retorno, los cuales se obtuvieron a partir del análisis de la distribución de Gumbel, para lo cual se identificó los caudales máximos anuales del registro de la estación limnigráfica Yanuncay AJ Tarqui (ETAPA EP). Los periodos de retorno considerados fueron 5, 10, 25 y 50 años obtenido los siguientes resultados: 165.3 m³/s, 206.6 m³/s, 258.7 m³/s y 297.4 m³/s, respectivamente.

Para la calibración del modelo hidrodinámico, en base al análisis de sensibilidad presentados en estudios previos, se determinó que el parámetro con mayor relevancia en el cauce fue la rugosidad, donde se realizó una variación de los valores del coeficiente de Manning del río, zonas verdes y árboles siendo factores importantes en canales naturales. La rugosidad con la que el modelo tuvo un mejor comportamiento con respecto a los registros obtenidos por la estación limnigráfica fueron los siguientes: Río: 0.065, Árboles: 0.1 y Zonas Verdes: 0.03. Además, para la validación de la rugosidad, se implementó hidrogramas de crecida observados de distintos años en el modelo, alcanzando errores de alrededor del 10%, obteniendo un buen ajuste de lo modelado frente a lo observado.

En los resultados de las áreas inundadas generados por el software IBER, se identificaron varias zonas afectadas, donde se presentan las mismas zonas vulnerables con la diferencia del aumento de la superficie inundada a medida que incrementa el periodo de retorno. Las principales zonas afectadas en el estudio son: Parque Lineal Primero de Mayo entre la calle Francisco de Orellana, Parque Lineal Yanuncay afectando ambas franjas del cauce y Estación de Bomberos N° 3 tanto en Av. 27 de Febrero y Calle Paseo Río Yanuncay.

En el análisis de las velocidades medias generadas en los modelos, se observó de igual manera una similitud en sus resultados, donde existe únicamente variación en las magnitudes, identificando varias zonas de aceleración y desaceleración siendo muy comunes a lo largo del cauce. Además, se establecieron desbordes, los cuales son generados por la sinuosidad del cauce, inundando las riveras adyacentes al mismo. Al mismo tiempo, se identificó varias zonas de estancamiento generalmente ubicadas en las vías principales (Av. Primero de Mayo, Av. 27 de Febrero y calle Paseo Río Yanuncay). Por otra parte, en el análisis de régimen a partir del número de Froude, la mayor parte del trayecto del flujo se encuentra bajo régimen subcrítico, identificando cuatro tramos importantes con flujo supercrítico o rápido en las zonas Parque Lineal Primero de Mayo entre calle Francisco de Orellana y Av. 12 de Octubre, Quinta Lucrecia, Parque Lineal Yanuncay y Estación de Bomberos N ° 3.

Finalmente, en la evaluación del área inundada con respecto a la zona de estudio cubre alrededor del 35%, 41%, 48% y 52% en todos los periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años respectivamente, siendo el periodo de retorno de 50 años el más crítico debido a que el área de inundación provocada por este evento cubre más del 50% del dominio del estudio, afectando a diversas zonas, siendo la zona del Parque Lineal Yanuncay el más afectado, ya que el agua afecta en su totalidad ambos lados del cauce, cubriendo el parque lineal, Av. 27 de Febrero, Av. Primero de Mayo y zonas residenciales, con una profundidad media de 0.95 metros.

6.1. Recomendaciones

Es recomendable utilizar Modelos Digitales de Elevación del Terreno con resolución menores o iguales a 3 metros, debido a que el reconocimiento del cauce es fundamental para la implementación de modelo hidrodinámico en dos dimensiones. Además, a partir de este estudio se puede realizar una investigación comparativa realizando una modelación hidrodinámica partiendo de un levantamiento topográfico del cauce estudiado, con la finalidad de comparar los resultados obtenidos.

De igual manera, se plantea que en investigaciones futuras se complemente el modelo hidrodinámico identificando las estructuras existentes en el dominio de estudio, realizando un levantamiento topográfico de sus dimensiones, ya que en algunos casos las estructuras interactúan con el flujo del cauce modificando su comportamiento natural.

A partir de los resultados, se recomienda implementar un modelo a menor escala de las zonas más afectas identificadas a lo largo del área de estudio como lo son: Parque Lineal Primero de Mayo Río Yanuncay entre la calle Francisco de Orellana y 12 de Octubre, Parque Lineal Yanuncay y Estación de Bomberos N° 3, con la finalidad de elaborar planes de contingencia de riesgos que permitan evitar amenazas en la población circulante.

Con el fin de regular los caudales sobre la cuenca del río Yanuncay se recomienda la construcción de embalses y azudes los cuales generan un nivel de agua más alto con el propósito de regular los volúmenes de flujo que pasa sobre el mismo. Por otro lado, para un mayor control del caudal se considera obras a mayor escala como presas o humedales teniendo en cuenta que cada una de estas obras tendrán impactos y beneficios que deberían ser evaluados previo a una obra definitiva.

Para evitar los desbordamientos de los sitios más vulnerables en la zona de estudio se recomienda implementar obras de defensa localizando en las laderas de los cauces utilizando estructuras de muros de gaviones o enrocados debido a la disponibilidad del

material del mismo lecho del río, siendo materiales resistentes a la fuerza erosiva de la corriente.

Bibliografía

- Arévalo, J. (2020). *Modelación Hidráulica en 2D del Tramo Calle Ciudad de Cuenca(Puente Misicata) - Av. De las Américas, del río Yanuncay*. Cuenca: Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología.
- Basabe, A. R. (1996). *Avance en la prevención de desastres naturales en la ciudad de Cuenca del rio Paute, Ecuador*.
- Bergstrom, S. (2002). Principles and confidence in hydrological modeling. En M. Mendoza, G. Bocco, M. S. Bravo, & M. Ortiz, *Modelamiento hidrológico espacialmente distribuido: una revision de sus componentes, niveles de integracion e implicaciones en la estimacion de procesos hidrológicos en cuencas no instrumentadas*. Mexico: Cenapros-Inifap.
- Campos Aranda, D. F. (1998). *Proceso del ciclo Hidrológico*. San Luis Potosí: Universitaria Potosina.
- Castro y Willems. (2011). *Desempeño de modelos hidráulicos 1D y 2D para la simulación de inundaciones*. Cuenca: MASKANA.
- Chereque, W. (1989). *Hidrología*. Lima: DuraSpace.
- Chow. (1994). *Hidráulica de Canales Abiertos*. Illinois: MCGRAW-HILL.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Texas: McGRAW - HILL.
- Contero, J. o. (s.f.). *MEDIDAS DE FORMA: ASIMETRÍA Y CURTOSIS. MOMENTOS*.
- Contreras, F., & Odriozola, M. (2016). *APLICACIÓN DE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL PARA LA DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO POR INUNDACIONES SAN LUIS DEL PALMAR, CORRIENTES, RCA. ARGENTINA*. San Luis del Palmar: CONICET.
- Delgadillo , A., & Páez, P. (2008). *Aspctor hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas*. Mérida.
- Espinoza Veinitimilla, A. O. (2013). *GEO-ESTADISTICA DE INFRAESTRUCTURA EN LA CIUDAD DE CUENCA MEDIANTE LA UTILIZACION DE SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA*. Cuenca.
- ETAPA EP. (2015). *CARACTERIZACIÓN MORFOMÉTRICA DE ÁREAS DE DRENAJE DE LAS ESTACIONES HIDROLÓGICAS DE LA RED DE ETAPA EP*. Cuenca: ETAPA.
- Felicísimo Pérez, A. M. (1994). *Modelos digitales del terreno Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Penfalta Ediciones.
- Fuentes, J. (2004). *ANÁLISIS MORFOMÉTRICO DE CUENCAS: CASO DE ESTUDIO DEL PARQUE NACIONAL PICO DE TANCÍTARO*. Instituto Nacional de Ecología.
- Gámez, W. (2009). *Texto Básico de Hidrología*. Nicaragua: Universidad Nacional Agraria.
- Gaspari, F., Rodríguez , A., Senisterra, G., Denegri, G., Delgado, M., & Besteiro, S. (2012). *Caracterización morfológica de la cuenca del río Sauce Grande*. Buenos Aires: Revista Electrónica del Comité de Medio Ambiente: AUGMDOMUS.

- GeoSpatial. (2013). *GeoSpatial*. Obtenido de <http://www.geospatial.com.co/imagenes-de-satelite/alos-palsar.html>
- Google Earth Pro. (2020). *Mapa de Cuenca*. Obtenido de Mapa de Ecuador: <https://earth.google.com/web/@-2.90791924,-79.01304134,2532.55568879a,5614.19344866d,35y,0h,12.88322398t,0r>
- Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. (2014). *Modelización bidimensional del flujo en lámina libre en aguas poco profundas*. España.
- Guerra, F., & González, J. (2002). *Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La Bermeja*. San Cristóbal: Universidad de los Andes.
- Gutiérrez, W. (2020). *Análisis del impacto de rellenos artificiales en eventos de inundación para el río Yanuncay, en el tramo Misicata - Av. de las Américas, empleando un modelo hidráulico D en régimen impermanente*. Cuenca: Universidad del Azuay Facultad De Ciencia y tecnología Escuela de Ingeniería Civil.
- Hernández, E. (2014). *Hidrodinámica*. México: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Horton, R. E. (1932). *Drainage basin characteristics*. Transactions of the American Geophysical Union .
- Ibañez, A., Moreno, H., & Gisbert, J. (2008). *Morfología de las cuencas hidrográficas*. Valencia: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA.
- INSIGMA. (2018). *ACTUALIZACION DEL PLAN DE MANEJO DEL PARQUE NACIONAL CAJAS*. Cuenca.
- Kohler, L. (1977). *Hidrología para Ingenieros*. New York: Mc Graw-Hill.
- Martín, J. (2001). *Ingeniería de Ríos*. México: ALFAOMEGA.
- Martonne, E. (1940). *Traité de Geographie Physique* . Paris: Armand Colin.
- Mijares, A. (1989). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. México: Limusa.
- Muñoz, A. (2012). *Comparación de los modelos hidráulicos unidimensional (HEC-RAS) y bidimensional (IBER) en el análisis del rompimiento de presas de materiales sueltos*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- NASA. (2004). *Jet Propulsion Laboratory*. Obtenido de <https://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp>
- NASA. (Viernes de Diciembre de 2018). *Goddard Space Flight Center*. Obtenido de <https://trmm.gsfc.nasa.gov>
- Negrón Baez, P. A. (2014). *REDES NEURONALES SIGMOIDAL CON ALGORITMO LM PARA PRONOSTICO DE TENDENCIA DEL PRECIO DE LAS ACCIONES DEL IPSA* . Valparaíso.
- Ochoa García, S. A. (2014). *EVALUACIÓN DE MODELOS HIDRODINÁMICOS PARA REPRESENTAR FLUJOS EN CAUCES NATURALES. APLICACIÓN EN UN TRAMO DEL RÍO SUQUÍA QUE INCLUYE LA CONFLUENCIA CON EL ARROYO LA CAÑADA, PROVINCIA DE CÓRDOBA*. Córdoba: UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES.
- Ochoa, S., Reyna, T., Reyna, S., García, M., Labaque, M., & Díaz, J. (2016). *MODELACIÓN HIDRODINÁMICA UNIDIMENSIONAL Y BIDIMENSIONAL*

- DEL TRAMO MEDIO DEL RÍO CTALAMOCHITA, PROVINCIA DE CÓRDOBA*. Córdoba: Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. España: CreateSpace.
- Panton, R. (2013). *Incompressible Flow*. John Wiley & Sons.
- Pesántes y Sánchez. (2016). *SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE SEDIMENTOS EN EL RÍO YANUNCAY MEDIANTE MODELACIÓN MATEMÁTICA BIDIMENSIONAL*. Cuenca: UNIVERSIDAD DE CUENCA FACULTAD DE INGENIERIA CARRERA DE INGENIERIA CIVIL.
- Puerta, R. (2013). *Manual de ArcGIS 10 Nivel Intermedio*. Lima: ArcGeek.
- Sacoto, D. (2017). *ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE INUNDACIONES DEL RÍO YANUNCAY Y EVALUACIÓN DE ESTRUCTURAS EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE BARABÓN Y LOS TRES PUENTES*. Cuenca: FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL.
- SIGTIERRAS. (Agosto de 2019). *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. Obtenido de http://metadatos.sigtierras.gob.ec:8080/geonetwork/srv/spa/catalog.search#/metadata/MDT_SIGTIERRAS_16092016
- Strahler, A. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks.1964*. New York: Mc Graw-Hill.
- Vallejo Llerena , E. C. (2014). *Análisis de las crecidas presentadas en los rios Tarqui, Yanuncay y Tomebamba desde 1997 hasta 2011*. Cuenca.
- Verdugo Cárdenas, M. (2017). *Análisis morfológico de las microcuencas a las que pertenece el bosque y vegetación protectora Aguarango (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Villón, M. (2002). *Hidrología*. Lima: MaxSoft.
- White, F. (1991). *Viscous Fluid Flow*. Rhode Islan: McGraw - Hill.

Lista de Símbolos

a = vector de aceleraciones

A = área de la cuenca

A_s = área de la sección transversal

B = ancho promedio de la cuenca

D_d = densidad de drenaje

F = vector fuerza

f = fuerza aplicada por unidad de volumen sobre la partícula de fluido

f_{cuerpo} = fuerza aplicada a toda la masa del elemento

Fr = Froude

$f_{\text{superficie}}$ = fuerza aplicada por esfuerzos externos sobre los lados del elemento

g = aceleración de la gravedad

h = calado

H_0 = nivel al cual el caudal es 0

K = coeficiente de compacidad o Gravelius

K_f = índice de forma

L = longitud del cauce principal de la Cuenca

L_a = longitud característica

L_c = longitud más larga de la cuenca

L_t = longitud total de las corrientes

m = masa de la partícula

m_i = número de segmentos iguales en los que se divide el cauce principal

M_s, M_x, M_y = términos fuente / sumidero de masa y de momento

n = Número de datos

O_i = Datos observados

\bar{O} = Media aritmética de los datos observados

P = perímetro de la cuenca

P_i = Datos calculados

Q = caudal de flujo

Re = Reynolds

S = pendiente media del cauce

V = velocidad de flujo

ν = la viscosidad cinemática

Z_s = elevación de la lámina libre

$Cov(O_i, P_i)^2$ = Covarianza entre datos observados y calculados

σ_o^2 = Varianza de datos observados

σ_p^2 = Varianza de datos calculados

τ_s = fricción en la superficie libre debido al rozamiento producido por el viento

τ_b = fricción debido al rozamiento del fondo

$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$ = tensiones tangenciales efectivas horizontales

U_x, U_y = velocidades horizontales promediadas en profundidad

ρ = densidad del agua

Ω = velocidad angular de rotación de la tierra

λ = latitud del punto considerado

γ = volumen del fluido

u, v, w = componentes de velocidad en las direcciones x, y, z .

μ = viscosidad dinámica del fluido

\hat{p} = presión piezométrica

a_e y p = parámetros de ajuste

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros, **Byron Stalyn Guamán Espejo** portador de la cédula de ciudadanía N° 0105075949 y **Anthony Santiago Serpa Torres** portador de la cédula de ciudadanía N° 0107067084. En calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“APLICACIÓN DE UN MODELO HIDRODINÁMICO BIDIMENSIONAL PARA EVALUAR ZONAS DE INUNDACIÓN: CASO DEL RÍO YANUNCAY EN LA CIUDAD DE CUENCA-ECUADOR”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de éste trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 28 de septiembre de 2020



F:
Byron Stalyn Guamán Espejo
0105075949



F:
Anthony Santiago Serpa Torres
0107067084