

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

POSGRADO

Tema: DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RIESGO POR SOCAVACIÓN Y CRECIDAS DEL RÍO CALUMA MEDIANTE ANÁLISIS HIDROLÓGICO, HIDRÁULICO Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL CASCO URBANO DEL CANTÓN CALUMA, PROVINCIA BOLÍVAR.

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel de Magíster en Hidráulica con mención en Obras Hidráulicas

Modalidad del Trabajo de Titulación: Proyecto de Investigación

Autor(a): Ingeniera Civil, Karolayt Nicole Rivera Castro

Director(a): Ingeniero Civil, Fabian Rodrigo Morales Fiallos, Mg.

Ambato – Ecuador

2026

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad/Centro

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por: *Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.*, e integrado por los señores: *Ing. Fidel Alberto Castro Solorzano, Mg* y *Ing. Dilon German Moya Medina, Mg*, designados por la Unidad Académica de Titulación del Centro de Posgrados de la Universidad Técnica de Ambato, para receptar el Trabajo de Titulación con el tema: *"DELIMITACIÓN DE ZONAS DE RIESGO POR SOCAVACIÓN Y CRECIDAS DEL RÍO CALUMA MEDIANTE ANÁLISIS HIDROLÓGICO, HIDRÁULICO Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN EL CASCO URBANO DEL CANTÓN CALUMA, PROVINCIA BOLÍVAR"* elaborado y presentado por el(la) *señor(a) Ingeniera Civil, Karolayt Nicole Rivera Castro*, para optar por el Título de cuarto nivel de Magíster en Hidráulica con mención en Obras Hidráulicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación, el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la UTA.



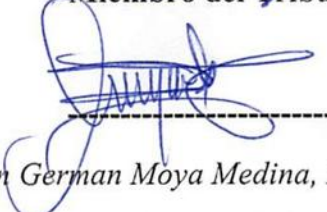
Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.

Presidente y Miembro del Tribunal



Ing. Fidel Alberto Castro Solorzano, Mg

Miembro del Tribunal



Ing. Dilon German Moya Medina, Mg,

Miembro del Tribunal

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

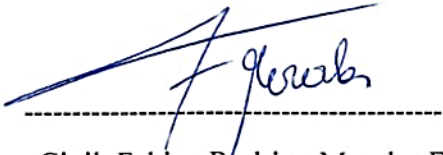
La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: Delimitación de zonas de riesgo por socavación y crecidas del río caluma mediante análisis hidrológico, hidráulico y sistemas de información geográfica en el casco urbano del cantón caluma, provincia Bolívar., le corresponde exclusivamente a Ingeniera Civil, Karolayt Nicole Rivera Castro, Autor(a) bajo la Dirección de Ingeniero Civil, Fabian Morales Fiallos, Mg., Director(a) del Trabajo de Titulación, y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.



Ingeniera Civil, Karolayt Nicole Rivera Castro

c.c.:0201871787

AUTOR(A)



Ingeniero Civil, Fabian Rodrigo Morales Fiallos, Mg

c.c.: 1802318152

DIRECTOR(A)

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi trabajo, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'K' and 'R' followed by 'Castro', is written over a horizontal dashed line.

Ingeniera Civil, Karolayt Nicole Rivera Castro

c.c.:0201871787

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO I.....	19
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	19
1.1. INTRODUCCIÓN	19
JUSTIFICACIÓN	21
1.2. OBJETIVOS	22
1.2.1. General	22
1.2.2. Específicos	23
CAPÍTULO II	24
MARCO TEÓRICO.....	24
2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	24
2.2. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA	26
2.2.1. Sistema hídrico.....	26
2.2.2. Delimitación de la cuenca	27
2.2.3. Parámetros fisiográficos de la cuenca	29
2.2.4. Parámetros geomorfológicos de la cuenca	30
2.2.5. Curva hipsométrica	30
2.2.6. Histograma de frecuencias altimétricas	31
2.2.7. Precipitación.....	32
2.2.7.1. Isoyetas.....	32
2.2.8. Temperatura	33
2.2.8.1. Isotermas	34
2.2.9. Sistemas de Información Geográfica	35
2.2.10. Interpolación	36
2.2.10.1. Método de interpolación Kriging.....	37

2.2.11. Balance hidrológico	38
2.2.12. Evapotranspiración.....	39
2.2.13. Infiltración.....	40
2.2.14. Caudal o escorrentía superficial	40
2.2.15. Periodos de retorno, intensidad de lluvia y caudales de crecida	41
2.2.16. Crecidas.....	41
2.2.17. Inundación.....	42
2.2.17. Socavación	43
2.2.18. Transporte de sedimentos.....	44
2.2.18. Modelación hidrológica lluvia-escorrentía	44
2.2.18.1. Modelación hidráulica con HEC-RAS.....	44
2.2.18.2. Fundamentos del flujo no permanente	45
2.2.18.3. Topografía del terreno y representación del cauce	45
2.2.18.4. Malla computacional y resolución espacial	45
2.2.18.5. Rugosidad hidráulica de Manning	45
2.2.18.6. Condiciones de frontera e hidrogramas.....	46
2.2.18.7. Profundidad, velocidad y extensión de inundación.....	46
2.2.19. Zonificación de susceptibilidad a inundación y socavación	46
2.2.19.1 Diferencia entre susceptibilidad, amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo	47
2.2.19.2. Factores condicionantes: pendiente, geología, geomorfología, cobertura vegetal y proximidad al cauce.....	47
2.2.19.3. Factor desencadenante: precipitación	47
2.2.19.4. Integración de variables mediante SIG y análisis multicriterio	48
2.2.19.5. Clasificación de niveles de susceptibilidad.....	48
2.2.20. Incertidumbre y validación de modelos hidráulicos	48
CAPÍTULO III	49
MARCO METODOLÓGICO	49

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	49
3.2. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	50
3.3. UNIDADES DE ESTUDIO.....	51
3.3.1. POBLACIÓN	51
3.3.2. MUESTRA	52
3.4. PRUEBA DE HIPÓTESIS - PREGUNTA CIENTÍFICA - IDEA A DEFENDER	53
3.5. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	53
3.6. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO:.....	54
CAPÍTULO IV	56
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
4.1. ALCANCE DEL ANÁLISIS	56
4.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	56
4.3. MAPA DE UBICACIÓN DE LAS ENCUESTAS REALIZADAS A LOS HABITANTES.....	57
4.4 BASE DE DATOS OBTENIDA DE LA ENCUESTA.....	58
4.5 RESULTADOS DESCRIPTIVOS CONSOLIDADOS:	59
4.5.1 Indicadores principales.....	59
4.5.2 Estadísticos de variables ordinales.....	60
4.5.3 Daños reportados.....	61
4.6 RESULTADOS INFERENCIALES	61
4.6.1 Intensidad de Crecida y presencia de socavación	61
4.6.2 Intensidad de crecida y percepción de riesgo.....	62
4.6.3 Relaciones sin significancia estadística	63
CAPÍTULO V	64
PROPUESTA	64
5.1. TÍTULO.....	64
5.2. DESCRIPCIÓN	64
5.3. JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA	65
5.4. DESCRIPCIÓN DE LOS BENEFICIARIOS Y RESPONSABLES	65

5.5.	DESARROLLO DE LA PROPUESTA	66
5.5.1.	Metodología para la elaboración de la propuesta.....	66
5.5.2.	Información utilizada para elaborar la propuesta.....	69
5.5.3.	Planificación utilizada para elaborar la propuesta	69
5.5.4.	Cronograma de elaboración de la propuesta	70
5.5.5.	Recursos utilizados para la elaboración de la propuesta	71
5.5.6.	Producto final de la propuesta.....	71
5.6.	ZONIFICACIÓN PREVENTIVA PARA LA GESTIÓN DE ZONAS SUSCEPTIBLES A INUNDACIÓN, SOCAVACIÓN Y CRECIDAS DEL RÍO CALUMA EN EL CASCO URBANO DEL CANTÓN CALUMA	72
5.6.1.	Ubicación	72
5.6.2.	Geología	74
5.6.3.	Caracterizar la cuenca	77
5.6.3.1.	Información cartográfica y topográfica.....	77
5.6.3.2.	Información hidrometeorológica.....	78
5.6.3.2.1.	Caracterización climatológica.....	78
5.6.3.2.2.	La circulación atmosférica general	78
5.6.3.2.3.	Las masas de aire locales	79
5.6.4.	Delimitación hidrográfica	79
5.6.4.1.	Modelo anatómico de superficie	79
5.6.5.	Caracterización fisiográfica y morfométrica.....	86
5.6.5.1.	Parámetros fisiográficos de la cuenca	86
5.6.5.1.2.	Perímetro de la cuenca (P)	87
5.6.5.1.3.	Longitud de cuenca (L)	87
5.6.5.1.4.	Ancho de cuenca (W).....	88
5.6.5.1.5.	Factor de forma (Ft)	88
5.6.5.1.6.	Índice de compacidad.....	89
5.6.5.2.	Parámetros geomorfológicos de la cuenca	91

5.6.5.2.1. Altitud media de la cuenca (Hm)	92
5.6.5.2.2. Rectángulo equivalente	94
5.6.6. Sistema de drenaje de la cuenca.....	95
5.6.6.1. Red de drenaje.....	96
5.6.6.2. Orden de corrientes	96
5.6.6.3. Longitud de los tributarios	97
5.6.6.4. Densidad de corriente.....	98
5.6.6.5. Densidad de drenaje	99
5.6.6.6. Extensión media de escurrimiento superficial	100
5.6.6.7. Frecuencia de ríos	100
5.6.6.8. Pendiente media del río principal.....	101
5.6.6.9. Coeficiente de torrencialidad	102
5.6.6.10. Coeficiente de masividad	102
5.6.6.11. Curva hipsométrica	107
5.6.6.12. Histograma de frecuencias altimétricas	108
5.6.7. Análisis Hidrológico - Climatológico	109
5.6.7.1. Precipitación.....	110
5.6.7.1.1. Modelo de precipitación.....	111
5.6.7.2. Temperatura	118
5.6.7.3. Balance hídrico.....	124
5.6.7.3.1. Modelo de evapotranspiración y escorrentía.....	124
5.6.7.3.2. Cálculo de la evapotranspiración potencial.....	125
5.6.7.3.3. Cálculo de la evapotranspiración real	126
5.6.7.3.4. Cálculo de la escorrentía en mm	130
5.6.7.3.5. Conversión de la escorrentía a m ³	131
5.6.7.3.6. Cálculo del caudal o volumen total de escorrentía.....	134
5.6.8. Análisis hidrológico y espacial para el tramo del río en estudio.....	139

5.6.8.1. Modelo hidrológico.....	142
5.6.9. Integración de resultados para la evaluación hidráulica y zonificación cartográfica preventiva.....	144
5.6.9.1. Susceptibilidad a inundaciones	144
5.6.9.2. Crecidas de río y susceptibilidad a socavamientos	153
5.6.9.2.1. Simulación con flujo no permanente.....	159
5.6.9.3. Justificación del procedimiento hidrológico empleado.....	167
CAPÍTULO VI.....	168
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	168
6.1. CONCLUSIONES	168
6.1.1. CONCLUSIÓN RELACIONADA CON EL OBJETIVO GENERAL.....	168
6.1.2. CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL OBJETIVO ESPECÍFICO 1: CARACTERIZAR LAS CONDICIONES FÍSICAS Y AMBIENTALES DE LA CUENCA.....	168
6.1.3. CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL OBJETIVO ESPECÍFICO 2: ANALIZAR EL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA	168
6.1.4. CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL OBJETIVO ESPECÍFICO 3: EVALUAR EL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DEL RÍO CALUMA	169
6.1.5. CONCLUSIONES RELACIONADAS CON EL OBJETIVO ESPECÍFICO 4: INTEGRAR LOS RESULTADOS EN UNA BASE CARTOGRÁFICA	169
6.2. RECOMENDACIONES.....	170
BIBLIOGRAFÍA.....	171
ANEXOS.....	180
ENCUESTA PARA PROPIETARIOS DE PREDIOS UBICADOS EN EL PERÍMETRO RIBEREÑO DEL RÍO CALUMA	181
SECCIÓN A. IDENTIFICACIÓN DEL PREDIO	181
SECCIÓN B. HISTORIAL DE INUNDACIONES	181
SECCIÓN C. PROCESOS DE SOCAVACIÓN	181
SECCIÓN D. DAÑOS OBSERVADOS	182
SECCIÓN E. PERCEPCIÓN DEL RIESGO	182

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. Procedimiento de análisis estadístico	58
TABLA 2. Indicadores principales	59
TABLA 3. Variables Ordinales.....	60
TABLA 4. Variables Ordinales.....	61
TABLA 5. Intensidad de crecida y socavación.....	62
TABLA 6. Intensidad de crecida y percepción de riesgo	62
TABLA 7. Resultados sin significancia estadística	63
TABLA 8. Planificación del proceso de elaboración de la propuesta	70
TABLA 9. Cronograma referencial de elaboración de la propuesta.....	71
TABLA 10 .Tabla resumen de cálculos de parámetros fisiográficos de la cuenca....	91
TABLA 11.Tabla resumen de cálculos de parámetros geomorfológicos de la cuenca	95
TABLA 12. Tabla resumen de cálculos del orden de corrientes de la cuenca.....	97
TABLA 13. Tabla resumen de cálculos de parámetros del sistema de drenaje	103
TABLA 14. Tabla resumen de cálculos de altitud y áreas de la cuenca	106
TABLA 15. Datos de estaciones climatológicas automáticas M0129 y M0132	111
TABLA 16 Datos de estaciones utilizadas para el modelo de precipitación	114
TABLA 17. Datos de la estación climatológica automática M0129	119
TABLA 18 Datos de la estación utilizada para el modelo de temperatura	120
TABLA 19. Rangos para la determinación del coeficiente de escorrentía	137
TABLA 20. Rangos de clasificación de susceptibilidad a inundaciones	149
TABLA 21. Valores de coeficiente de Manning utilizados para el cauce y márgenes	155
TABLA 22. Hidrograma de Caudales.....	159

ÍNDICE DE FIGURAS

figura 1.	Delimitación Manual De Una Cuenca	28
Figura 2.	Delimitación De Cuenca Mediante Software.....	29
Figura 3.	Configuración De Las Isoyetas	33
Figura 4.	Configuración De Las Isotermas.....	35
Figura 5.	Método 1 De Interpolación	36
Figura 6.	Método 2 De Interpolación	37
Figura 7.	Método De Interpolación Kriging.....	38
Figura 8.	Balance Hidrológico.....	39
Figura 9.	Proceso De Inundación	43
Figura 10.	Proceso De Socavamiento.....	44
Figura 11.	Modelamiento Con Hec-Ras	45
Figura 12.	Zonificación De Inundaciones	47
Figura 13.	Mapa De Ubicación De Los Sitios Encuestados	57
Figura 14.	Esquema Metodológico De La Propuesta ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
Figura 15.	Mapa De Ubicación Del Casco Urbano Del Cantón Caluma	73
Figura 16.	Mapa Geológico Del Casco Urbano Del Cantón Caluma.....	76
Figura 17.	Modelo Digital Del Terreno Del Cantón Caluma	77
Figura 18.	Relleno De Sumideros Del Dem Mediante La Herramienta Fill	80
Figura 19.	Cálculo De Acumulación De Flujo Mediante Arcgis	81
Figura 20.	Extracción De La Red De Drenaje Mediante Calculadora Ráster	82
Figura 21.	Identificación De Puntos De Aforo Para La Delimitación Del Drenaje	82
Figura 22.	Mapa Del Modelo Anatómico De La Superficie	83
Figura 23.	Mapa De Delimitación De La Cuenca Y Subcuencas Del Casco Urbano Del Cantón Caluma.....	85
Figura 24.	Mapa Altitud O Elevación De La Cuenca.....	93
Figura 25.	Red Hídrica De La Cuenca	105
Figura 26.	Modelo De Precipitación Mediante Regresión Lineal	115
Figura 27.	Aplicación De La Calculadora Ráster Para El Modelo De Precipitación	115

Figura 28.	Superficie Interpolada De Precipitación De La Cuenca	116
Figura 29.	Mapa De Isoyetas Del Casco Urbano Del Cantón Caluma.....	117
Figura 30.	Aplicación De La Calculadora Ráster Para El Modelo De Temperatura 121	
Figura 31.	Superficie Ráster Del Modelo De Temperatura.....	122
Figura 32.	Mapa De Isotermas Del Casco Urbano Del Cantón Caluma	123
Figura 33.	Cálculos Ráster Para El Parámetro Térmico De Evapotranspiración	126
Figura 34.	Superficie De Evapotranspiración Potencial O Parámetro Térmico De Evapotranspiración.....	126
Figura 35.	Aplicación De La Calculadora Ráster Para El Cálculo De La Evapotranspiración Real	128
Figura 36.	Mapa De Evapotranspiración Real De La Cuenca Del Casco Urbano Del Cantón Caluma	129
Figura 37.	Aplicación De La Calculadora Ráster Para El Cálculo De Escorrentía En Mm	131
Figura 38.	Superficie Ráster De Escorrentía Estimada En La Cuenca.....	131
Figura 39.	Aplicación De La Calculadora Ráster Para Conversión De Escorrentía A M³	132
Figura 40.	Mapa De Escorrentía De La Cuenca Del Casco Urbano Del Cantón Caluma	133
Figura 41.	Curvas Idf Para La Zona 30	136
Figura 42.	Mapa De Uso De Suelo De La Cuenca Del Casco Urbano	138
Figura 43.	Plano Topográfico Del Tramo Del Río Que Atraviesa El Casco Urbano Del Cantón Caluma.....	140
Figura 44.	Efecto De La Cuenca Sobre El Casco Urbano Del Cantón Caluma .	141
Figura 45.	Modelo Hidrológico Del Efecto De La Cuenca Sobre El Casco Urbano 143	
Figura 46.	Capas Temáticas Utilizadas Para El Análisis De Susceptibilidad A Inundaciones	145
Figura 47.	Cálculo Del Valor Del Factor Condicionante Mediante Field Calculator	147
Figura 48.	Asignación Del Valor Del Factor Desencadenante Mediante Field Calculator	148
Figura 49.	Cálculo Del Valor Final De Susceptibilidad Mediante Field Calculator 149	

Figura 50.	Selección Por Atributos Para La Clasificación De Susceptibilidad..	150
Figura 51.	Mapa De Susceptibilidad A Inundaciones De La Cuenca Del Casco Urbano Del Cantón Caluma.....	152
Figura 52.	Conversión De Información Topográfica A Superficie Tin	154
Figura 53.	Conversión De Tin A Ráster Del Tramo Del Río Caluma.....	154
Figura 54.	Malla Computacional Y Refinamiento De Zonas De Interés	158
Figura 55.	Hidrograma De Caudal Utilizado Como Condición De Entrada	160
Figura 56.	Simulación Hidráulica Del Flujo Del Río Caluma	161
Figura 57.	Perfil Hidráulico Del Río Caluma.....	162
Figura 58.	Simulación Hidráulica De Crecidas Del Río Caluma	162
Figura 59.	Perfil Hidráulico Del Río Caluma Con Caudal Maximo	163
Figura 60.	Mapa De Crecidas Del Río Caluma En El Casco Urbano	164
Figura 61.	Resultado Hidráulico Para Identificar Zonas Susceptibles A Socavamiento	165
Figura 62.	Mapa De Susceptibilidad A Socavamientos	166

AGRADECIMIENTO

Expreso mi mas profundo agradecimiento a Dios, por brindarme fortaleza, sabiduría y perseverancia la cuales fueron necesarias para culminar esta importante etapa de mi formación académica y profesional.

A mi familia, por su amor, comprensión y apoyo incondicional durante este proceso. Su confianza, paciencia y motivación fueron el pilar fundamental que me permitió superar los desafíos y alcanzar esta meta.

Mi sincero agradecimiento a la Universidad Técnica de Ambato, a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y al Centro de Posgrados, por la formación académica recibida y por proporcionar las herramientas necesarias para el desarrollo de esta investigación.

De manera especial, expreso mi reconocimiento al Ing. Fabian Morales, director de este trabajo de titulación, por su orientación, conocimientos, valiosas observaciones y permanente acompañamiento durante el desarrollo de la investigación.

Finalmente, agradezco a las instituciones que facilitaron la información técnica utilizada y a los habitantes del cantón Caluma que participaron en la aplicación de las encuestas, contribuyendo de manera significativa al desarrollo de este estudio.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por iluminar mi camino, brindarme fortaleza y permitirme alcanzar una meta mas en mi vida personal y profesional.

A mis amadas hijas, Constanza y Galilea, quien aún se encuentra en camino. Ustedes son el mayor regalo que Dios me ha dado, la razón de mi esfuerzo y la inspiración que impulsa cada uno de mis sueños. Todo lo que hago es con la esperanza de construir un mejor futuro para ustedes y enseñarles, con el ejemplo, que la constancia, el sacrificio y la dedicación permiten alcanzar cualquier objetivo.

A mi querido esposo, por su amor, paciencia, comprensión y apoyo incondicional durante este camino. Gracias por acompañarme en cada desafío, creer en mí incluso en los momentos más difíciles y ser mi mayor fortaleza.

Finalmente, a mi madre, por sus enseñanzas valores y apoyo constante, que ha sido la base sobre la cual he construido mi vida personal y profesional.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación tuvo como objetivo generar una base cartográfica para la delimitación de las zonas de riesgo por socavación y crecidas del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma, provincia Bolívar, mediante la integración de análisis hidrológico, modelación hidráulica y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). El estudio responde a la necesidad de contar con información técnica que fortalezca la planificación territorial y la gestión del riesgo frente a eventos hidrometeorológicos que afectan de manera recurrente a la población y a la infraestructura ubicada en las riberas del río.

La metodología comprendió la caracterización física, fisiográfica y climática de la cuenca, el procesamiento de información topográfica e hidrometeorológica, la estimación de caudales de crecida mediante análisis hidrológico, la simulación hidráulica del flujo no permanente del río utilizando HEC-RAS y la integración de los resultados en un entorno SIG para la elaboración de cartografía temática de susceptibilidad. De forma complementaria, se aplicó una encuesta a los habitantes de los predios ribereños con el propósito de contrastar la información técnica con la percepción local del riesgo y las afectaciones históricas registradas.

Los resultados permitieron identificar los sectores con mayor susceptibilidad a inundaciones y procesos de socavación, evidenciando una relación significativa entre la intensidad de las crecidas y la ocurrencia de procesos erosivos, así como una elevada percepción del riesgo por parte de la población asentada en las áreas más expuestas. La información obtenida permitió elaborar una base cartográfica preventiva que constituye un instrumento técnico para apoyar el ordenamiento territorial, la priorización de obras de mitigación y la formulación de estrategias orientadas a reducir la vulnerabilidad y fortalecer la gestión integral del riesgo en el cantón Caluma.

DESCRIPTORES: ANÁLISIS HIDROLÓGICO, CRECIDAS, HEC-RAS, INUNDACIONES, SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA, SOCAVACIÓN, ZONIFICACIÓN DEL RIESGO.

ABSTRACT

This research aimed to develop a cartographic database for the delineation of scour and flood hazard zones along the Caluma River within the urban area of Caluma Canton, Bolívar Province, Ecuador, through the integration of hydrological analysis, hydraulic modeling, and Geographic Information Systems (GIS). The study addresses the need for reliable technical information to support territorial planning and disaster risk management in response to recurrent hydrometeorological events affecting riverside communities and critical infrastructure.

The methodology included the physical, physiographic, and climatic characterization of the watershed, processing of topographic and hydrometeorological data, estimation of design flood discharges through hydrological analysis, unsteady-flow hydraulic simulation using HEC-RAS, and integration of the results into a GIS environment to produce thematic susceptibility maps. Additionally, a field survey was conducted among residents located within the river corridor to compare the technical assessment with local risk perception and historical evidence of flood-related impacts.

The findings identified the areas most susceptible to flooding and scour processes, revealing a statistically significant relationship between flood intensity and the occurrence of channel erosion, as well as a high level of risk perception among inhabitants living in the most exposed sectors. The resulting preventive cartographic database provides a valuable technical tool for land-use planning, prioritization of mitigation measures, and implementation of comprehensive flood risk management strategies. Furthermore, the proposed methodology offers a practical framework that can be replicated in watersheds with similar hydrological and geomorphological characteristics, contributing to improved territorial planning, infrastructure protection, and reduction of community vulnerability to extreme hydrometeorological events.

KEYWORDS: FLOOD HAZARD, GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS (GIS), HEC-RAS, HYDROLOGICAL ANALYSIS, SCOUR, SPATIAL ZONING, WATERSHED.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción.

La presente investigación tiene como propósito delimitar las zonas de riesgo por socavación y crecidas del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma, provincia Bolívar, mediante la integración de análisis hidrológico, modelación hidráulica y herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Esta problemática representa una amenaza para la seguridad de la población, la estabilidad de la infraestructura urbana y la planificación territorial, debido a que las crecidas fluviales pueden generar procesos de inundación, erosión de márgenes y socavación del cauce, especialmente en sectores donde existen asentamientos humanos e infraestructura próxima al río. Los estudios recientes muestran que la modelización hidrológica e hidráulica combinada con SIG puede identificar mejor las áreas vulnerables a inundaciones y mejorar la gestión preventiva de riesgos. [1], [2].

Este tema está directamente relacionado con la necesidad de información técnica y cartográfica para identificar áreas vulnerables a amenazas fluviales en la zona urbana del río Caluma. La delimitación de zonas de riesgo es una herramienta clave en la planificación territorial, las áreas de protección y los trabajos de mitigación, así como en la mejora de la toma de decisiones institucionales. En este sentido, investigaciones recientes han demostrado que el uso combinado de modelos como HEC-HMS, HEC-RAS, modelos hidráulicos bidimensionales, datos topográficos, información hidrometeorológica y SIG permite evaluar escenarios de crecida para distintos periodos de retorno y representar espacialmente la amenaza por inundación [1], [3], [4].

La estrategia metodológica empleada en esta investigación se basa en un enfoque técnico y aplicado. Primero, se recopila y procesa información climática, hidrológica, topográfica, cartográfica e hidrométrica relacionada con la cuenca del río Caluma. Luego, se realiza un análisis hidrológico para estimar los caudales máximos de inundación basados en las propiedades físicas de la cuenca y la información disponible. A partir de la modelación hidráulica, se analiza el comportamiento del flujo en la sección urbana y se identifican los niveles de agua, las velocidades, las áreas de desbordamiento y las áreas propensas a la erosión. Finalmente, los resultados son integrados en un entorno SIG para elaborar mapas temáticos y una base cartográfica de zonas de riesgo. Este procedimiento guarda correspondencia con metodologías actuales aplicadas en estudios de amenaza fluvial, donde la integración de modelos hidráulicos y herramientas geoespaciales permite obtener resultados espacialmente verificables y útiles para la gestión del riesgo [2], [5].

La investigación se estructura en seis capítulos. El primer capítulo presenta la declaración del problema, la justificación, los objetivos, el alcance y la importancia del estudio. El segundo capítulo describe el marco teórico, incluyendo los antecedentes científicos recientes, las bases conceptuales sobre hidrología, hidráulica fluvial, inundaciones, socavación, vulnerabilidad territorial, gestión de riesgos y aplicación de SIG. El tercer capítulo describe los métodos empleados (basados en fuentes de información, métodos de procesamiento, criterios hidrológicos, parámetros hidráulicos y herramientas geoespaciales). El cuarto capítulo se ocupa de la herramienta de recolección de datos para los habitantes de la ciudad del cantón Caluma para determinar su percepción del río Caluma, los procesos de inundación y socavación que pueden ocurrir en el área del cauce del río. El quinto capítulo presenta los resultados obtenidos del análisis hidrológico, modelado hidráulico y delimitación cartográfica de áreas de riesgo y revisa estos resultados. Finalmente, el sexto capítulo proporciona las conclusiones, recomendaciones y propuesta técnica para la aplicación práctica de los resultados en la planificación territorial y gestión de riesgos del cantón Caluma.

Entre una de las principales limitaciones de este estudio se encuentra la disponibilidad, continuidad y calidad de los registros hidrometeorológicos, al igual que la limitada cobertura de estaciones de monitoreo dentro de la cuenca. También se consideran restricciones asociadas al levantamiento de información de campo en sectores de difícil acceso y a la incertidumbre propia de los modelos hidrológicos e hidráulicos. Investigaciones recientes advierten que la calidad del modelo digital de elevación, la resolución espacial de la información topográfica, la asignación del coeficiente de rugosidad de Manning y la disponibilidad de datos de calibración influyen directamente en la precisión de los resultados de modelación de inundaciones [1], [4], [6].

Sin embargo, estas limitaciones se abordaron utilizando criterios técnicos, revisiones de información oficial, análisis espacial en SIG y algunas técnicas utilizadas recientemente en la literatura sobre análisis de amenaza y susceptibilidad a inundaciones. La incorporación de factores topográficos, hidrológicos, hidráulicos y geoespaciales contribuye a la fiabilidad del estudio, particularmente en áreas donde los datos hidrométricos son escasos [6], [7]. Esta investigación tiene como objetivo proporcionar una herramienta técnica para visualizar áreas críticas al mismo tiempo que la planificación y mitigación y control de eventos hidrometeorológicos extremos, y también proporcionar una base cartográfica para la delimitación de zonas de riesgo debido a la erosión e inundación del río Caluma como una herramienta técnica para la planificación urbana, gestión de riesgos, protección de infraestructuras y reducción de la vulnerabilidad de la población asentada en áreas ribereñas.

La aplicación de modelos hidrológicos, hidráulicos y SIG responde a las tendencias actuales de investigación científica en gestión de inundaciones, donde la representación espacial del riesgo se considera fundamental para la toma de decisiones y la formulación de políticas de prevención y ordenamiento territorial [2], [5], [8].

Justificación.

La presente investigación surge de la necesidad de disponer de una base técnica y científica que permita delimitar las zonas de riesgo por socavación y crecidas del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma, provincia Bolívar, como respuesta a la creciente exposición de la población y de la infraestructura urbana frente a eventos hidrometeorológicos extremos. Diversos estudios han demostrado que el incremento en la frecuencia e intensidad de los eventos extremos, asociado a la variabilidad climática y al cambio climático, ha incrementado significativamente el riesgo de inundaciones en cuencas urbanas y periurbanas, especialmente en regiones montañosas de rápida respuesta hidrológica [9], [10].

Durante los últimos años, el incremento en la frecuencia e intensidad de las precipitaciones ha favorecido el aumento de los caudales máximos del río, provocando procesos recurrentes de erosión de márgenes, socavación de cimentaciones, desbordamientos y afectaciones a viviendas, vías, redes de servicios básicos y espacios públicos [11]. Un ejemplo típico ocurrió el 20 de marzo de 2022, cuando el río Caluma se desbordó y se registraron daños en todo el cantón en Charquiyacu, Retiros de Charquiyacu, Guamaspungo y El Acorazado, con un colapso de la infraestructura vial y la evacuación de familias que vivían en áreas de riesgo [12]. Esto está en línea con la necesidad de una investigación continua para mejorar el proceso de planificación territorial mediante estudios técnicos que permitan predecir y minimizar los daños en futuras inundaciones [13].

La investigación se desarrolla porque, en la actualidad, el cantón Caluma no dispone de una delimitación técnica de las zonas susceptibles a procesos de socavación e inundación sustentada en análisis hidrológicos, hidráulicos y geoespaciales. Esta limitación dificulta la planificación del uso del suelo, restringe la priorización de obras de mitigación y reduce la capacidad de respuesta de las instituciones responsables de la gestión del riesgo [14]. En este contexto, el estudio tiene como finalidad generar una base cartográfica confiable que identifique espacialmente las áreas con mayor nivel de amenaza, proporcionando información objetiva para la formulación de políticas públicas, la planificación urbana y el diseño de medidas estructurales y no estructurales orientadas a disminuir la vulnerabilidad del territorio [15].

Los resultados de la investigación contribuirán a solucionar problemas reales desde diferentes dimensiones. Desde el punto de vista social, permitirán fortalecer la seguridad de la población al identificar los sectores con mayor probabilidad de afectación por procesos de socavación y crecidas, facilitando la implementación de planes de prevención, evacuación y reducción del riesgo [16]. En el ámbito económico, la información obtenida servirá para optimizar la inversión pública destinada a obras de protección fluvial, estabilización de taludes, encauzamientos y mantenimiento de infraestructura, reduciendo los costos derivados de daños recurrentes ocasionados por

eventos extremos [17]. En el aspecto ambiental, la delimitación de zonas de riesgo favorecerá la conservación de las franjas de protección ribereña, el manejo sostenible del cauce y la disminución de intervenciones que alteren la dinámica natural del río [18]. Asimismo, desde el punto de vista institucional, el estudio proporcionará información técnica que podrá incorporarse en instrumentos de planificación como el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), el Plan de Uso y Gestión del Suelo (PUGS), los planes de gestión del riesgo y futuros proyectos de infraestructura hidráulica [19].

Los principales beneficiarios de esta investigación serán, en primer lugar, los habitantes del casco urbano del cantón Caluma, especialmente aquellos ubicados en sectores próximos al río y expuestos a procesos de socavación e inundación. De igual manera, se beneficiarán el Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Caluma, el Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia Bolívar, la Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica y demás instituciones públicas responsables de la planificación territorial y la gestión integral del riesgo de desastres [20].

La principal novedad y originalidad de esta investigación radica en la integración de análisis hidrológicos, modelación hidráulica y herramientas de Sistemas de Información Geográfica para generar una delimitación espacial de las zonas de riesgo por socavación y crecidas específicamente en el casco urbano del cantón Caluma. Aunque existen investigaciones sobre inundaciones en distintas cuencas del Ecuador, no se dispone de un estudio que integre estas metodologías de manera específica para el río Caluma, considerando simultáneamente el comportamiento hidrológico de la cuenca, la dinámica hidráulica del cauce y la representación cartográfica del riesgo mediante herramientas geoespaciales [21].

Desde el punto de vista científico, la investigación no pretende formular una nueva teoría hidrológica o hidráulica; sin embargo, construye un procedimiento metodológico aplicable a cuencas andinas de características similares, integrando información hidrológica, hidráulica y geoespacial para la delimitación de zonas de riesgo. Esta metodología podrá ser utilizada como referencia para futuros estudios en otros cantones de la provincia Bolívar y del país, contribuyendo al fortalecimiento de la investigación aplicada en el ámbito de la gestión del riesgo de inundaciones [22].

1.2. Objetivos.

1.2.1. General.

Generar una base cartográfica para la delimitación de las zonas de riesgo por socavación y crecidas del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma, mediante el análisis hidrológico e hidráulico de la cuenca y la aplicación de herramientas de Sistemas de Información Geográfica.

1.2.2. Específicos.

- Caracterizar las condiciones físicas y ambientales de la cuenca del río Caluma mediante el análisis de información topográfica, climática e hidrológica, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica.
- Analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Caluma mediante el procesamiento de datos de precipitación, caudales y características morfométricas para la estimación de caudales de crecida.
- Evaluar el comportamiento hidráulico del río Caluma en el tramo correspondiente al casco urbano del cantón Caluma mediante la modelación hidráulica del flujo, con el fin de identificar zonas susceptibles a inundación y procesos de socavación.
- Integrar los resultados del análisis hidrológico e hidráulico en un Sistema de Información Geográfica para la generación de una base cartográfica que permita delimitar las zonas de riesgo en el casco urbano del cantón Caluma.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

A continuación, se exponen las bases teóricas que sustentan este trabajo investigativo, junto con los antecedentes o trabajos previos realizados en los últimos años que han abordado temas similares o relacionados al tema de estudio.

2.1 Antecedentes Investigativos.

Durante la última década, el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos extremos ha impulsado el desarrollo de metodologías avanzadas para la evaluación del riesgo por inundaciones y procesos de erosión fluvial. La integración de modelos hidrológicos, simulaciones hidráulicas bidimensionales y Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituye actualmente una de las principales herramientas utilizadas para estimar zonas susceptibles a inundación, evaluar la estabilidad de cauces y apoyar la planificación territorial basada en evidencia científica [23]–[25].

Recientemente, se ha utilizado la modelización hidráulica bidimensional para comprender mejor la propagación de inundaciones y la interacción entre el flujo y la infraestructura urbana. Gomes Jr. et al. compararon modelos hidrodinámicos simplificados con HEC-RAS 2D y encontraron que las simulaciones bidimensionales reproducen eficazmente las profundidades y velocidades de las inundaciones, reduciendo el tiempo de cálculo mientras se preserva la precisión necesaria para la investigación en gestión de riesgos. También demostraron que la incorporación de infraestructura urbana cambia significativamente la distribución espacial de las inundaciones, lo cual es importante para estudios en áreas pobladas [23].

Además, Gomes Jr. y otros desarrollaron un modelo distribuido HydroPol2D para cuencas con datos hidrométricos limitados, que ha demostrado que la combinación de modelos hidrológicos e hidráulicos junto con herramientas GIS puede proporcionar resultados confiables incluso en cuencas escasamente instrumentadas. Los autores señalan que este enfoque es particularmente útil en áreas tropicales donde la disponibilidad de datos es una limitación para la planificación hidráulica [24].

Asimismo, Nguyen et al. demostraron que la integración de información proveniente de sensores remotos, registros hidrométricos y modelos hidrológico-hidráulicos reduce considerablemente las incertidumbres en la predicción de inundaciones. Sus resultados evidencian que el uso conjunto de información satelital y modelación numérica mejora la delimitación de zonas inundables y fortalece los procesos de gestión integral del riesgo frente a eventos extremos [25].

En conjunto, estos estudios reflejan una tendencia internacional en el uso de modelos hidrológicos e hidráulicos integrados, junto con herramientas GIS y modelos digitales del terreno para proporcionar un mapeo de riesgos más preciso. Como parte de esta investigación, intentamos aplicar estos métodos al río Caluma, lo que resultará en la identificación de las áreas vulnerables a la erosión e inundaciones en la zona urbana del cantón Caluma y proporcionará información técnica que puede ser utilizada para mejorar la planificación territorial y la reducción del riesgo de desastres.

Investigaciones recientes en ingeniería hidráulica han reforzado la importancia de la modelación numérica para la delimitación de zonas inundables. La modelación hidráulica bidimensional ha demostrado una mayor capacidad para representar la distribución espacial de profundidades, velocidades y extensión de las inundaciones en comparación con modelos unidimensionales, permitiendo identificar zonas críticas con mayor precisión [26], [27].

En América Latina, diversos estudios aplicados a cuencas urbanas y ciudades intermedias evidencian que la delimitación cartográfica del riesgo mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelación hidráulica constituye una herramienta fundamental para el ordenamiento territorial, la planificación urbana y la reducción de pérdidas asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos [28], [29].

Por su parte, investigaciones desarrolladas en ríos tropicales han señalado que la integración de registros pluviométricos, modelos digitales de elevación, levantamientos topográficos de alta resolución y herramientas SIG permite identificar con mayor confiabilidad zonas susceptibles a procesos de socavación e inundación, facilitando la implementación de medidas preventivas para la protección de infraestructura y población [30], [31].

A nivel nacional, los reportes hidrometeorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) evidencian una alta variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones en el Ecuador durante los últimos años, incrementando la probabilidad de ocurrencia de crecidas súbitas en cuencas de respuesta rápida, particularmente en la región interandina y subtropical [32].

Estos antecedentes permiten sustentar técnicamente la necesidad de desarrollar un estudio específico para el casco urbano del cantón Caluma.

El cantón Caluma, ubicado en la provincia Bolívar, presenta condiciones territoriales e hidrológicas que lo hacen susceptible a procesos de crecida, inundación y socavación en las zonas próximas al cauce del río Caluma. En el casco urbano, la presencia de infraestructura, viviendas y actividades humanas asentadas en áreas ribereñas incrementa la exposición frente a eventos hidrometeorológicos, especialmente durante temporadas de precipitaciones intensas, cuando el aumento súbito del caudal modifica

el comportamiento hidráulico del río y eleva el nivel de amenaza sobre sus márgenes [33].

La socavación constituye un proceso erosivo asociado a la acción dinámica del flujo sobre el lecho y las riberas del cauce. Este fenómeno puede generar inestabilidad de taludes, pérdida progresiva de material, afectación a cimentaciones, deterioro de obras de protección y daños en infraestructura urbana. En el caso del río Caluma, las condiciones de pendiente, cobertura vegetal, uso del suelo, intensidad de lluvia y características morfométricas de la cuenca influyen directamente en la generación de caudales de crecida y en la energía del flujo, factores que pueden intensificar los procesos de erosión lateral y desbordamiento [34], [35].

Es necesario desarrollar un análisis técnico para comprender las características hidrológicas e hidráulicas de la cuenca del río Caluma y centrarse en la parte urbana del río y en el área urbana en particular. Con información topográfica, climática, hidrológica, hidrométrica y herramientas de Sistemas de Información Geográfica, se puede crear una base cartográfica para las zonas de riesgo de erosión e inundación con un mapa del área. Esta información constituye un insumo fundamental para la planificación territorial, la gestión del riesgo, la prevención de afectaciones y la toma de decisiones técnicas en beneficio de la seguridad de la población y la protección de la infraestructura existente [36].

2.2. Fundamentación Científica.

A continuación, se presentan las bases teóricas que fundamentan este trabajo investigativo, con énfasis en los conceptos clave.

2.2.1. Sistema hídrico.

La cuenca hidrográfica está conformada por un sistema hídrico integrado por un cauce principal y sus afluentes secundarios, terciarios o de órdenes superiores, los cuales conducen el escurrimiento superficial hacia un punto común de salida. Desde el punto de vista hidrológico, este sistema representa la red de drenaje mediante la cual se concentra y transporta el agua proveniente de la precipitación, constituyendo el elemento estructural que define el comportamiento hidráulico de una cuenca [45].

El sistema hídrico refleja la interacción existente entre los recursos agua, suelo, vegetación y las actividades humanas desarrolladas dentro de la cuenca. En este sentido, Dourojeanni sostiene que la cuenca, sus recursos naturales y la población que la habita conforman un sistema territorial integrado, caracterizado por relaciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales derivadas de la dependencia común de un mismo sistema hídrico [54].

2.2.2. Delimitación de la cuenca.

La delimitación de una cuenca hidrográfica consiste en identificar el área de aportación cuyos escurrimientos superficiales convergen hacia un mismo punto de salida. Este procedimiento constituye una de las etapas fundamentales de los estudios hidrológicos, ya que define la unidad espacial sobre la cual se desarrollan los análisis de precipitación, escurrimiento, balance hídrico y modelación hidrológica. La delimitación puede realizarse de forma manual mediante el trazado de la divisoria de aguas sobre cartografía topográfica o de manera automática utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Modelos Digitales de Elevación (MDE), herramientas que permiten obtener resultados con mayor precisión y eficiencia [45], [56].

Según Aparicio Mijares, la cuenca se encuentra delimitada por el parteaguas, definido como la línea imaginaria formada por los puntos de mayor elevación topográfica que separan una cuenca de las cuencas vecinas [45]. Esta divisoria determina la dirección del escurrimiento superficial y permite establecer el área efectiva de captación que aporta agua al cauce principal.

En la actualidad, el empleo de Sistemas de Información Geográfica y Modelos Digitales de Elevación ha transformado el proceso de delimitación de cuencas hidrográficas. Estas herramientas permiten automatizar la extracción de la red de drenaje, la identificación de divisorias de aguas, el cálculo de parámetros morfométricos y la caracterización fisiográfica de las cuencas mediante algoritmos de análisis espacial, reduciendo los errores asociados a los métodos tradicionales y optimizando los tiempos de procesamiento [56].

La delimitación precisa de una cuenca constituye un requisito indispensable para la estimación de variables hidrológicas como el área de drenaje, la longitud del cauce principal, la pendiente media, la densidad de drenaje y el tiempo de concentración, parámetros que influyen directamente en la generación de escurrimiento y en la estimación de caudales.

Figura 1. Delimitación Manual de una Cuenca.

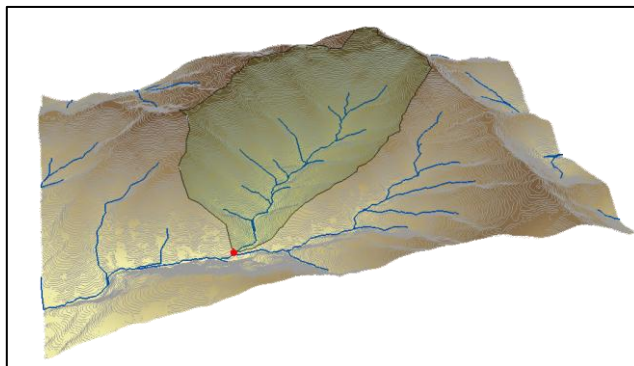


En la delimitación automática de cuencas hidrográficas, el Modelo Digital de Elevación (MDE) constituye el insumo fundamental, ya que representa la superficie topográfica del terreno y permite modelar el comportamiento del escurrimiento superficial mediante algoritmos de análisis espacial. A partir del MDE es posible determinar la dirección del flujo, la acumulación de flujo, la red de drenaje, las divisorias de aguas y el área contribuyente de una cuenca, parámetros indispensables para el análisis hidrológico y la caracterización morfométrica [54], [57].

De manera similar, Esri indica que las herramientas hidrológicas incorporadas en ArcGIS permiten identificar depresiones topográficas (*Fill*), calcular la dirección del flujo (*Flow Direction*), estimar la acumulación del flujo (*Flow Accumulation*), delimitar cuencas hidrográficas (*Watershed*) y generar automáticamente redes de drenaje (*Stream Network*) a partir de superficies de elevación. Estas herramientas constituyen la base para el análisis hidrológico espacial y la preparación de información de entrada para modelos hidrológicos e hidráulicos [57].

La utilización de Modelos Digitales de Elevación en conjunto con Sistemas de Información Geográfica mejora significativamente la precisión en la delimitación de cuencas, reduce la subjetividad asociada a los métodos manuales y facilita la obtención de parámetros morfométricos necesarios para la estimación de caudales y la modelación hidráulica. Asimismo, permite reproducir de forma consistente la estructura de la red de drenaje y optimizar el análisis espacial de grandes extensiones de terreno [57].

Figura 2. Delimitación de Cuenca Mediante Software.



2.2.3. Parámetros fisiográficos de la cuenca.

Los parámetros fisiográficos permiten describir cuantitativamente las características físicas de una cuenca hidrográfica, tales como el área, perímetro, longitud, forma, relieve, pendiente y red de drenaje. Estas variables constituyen la base para la caracterización hidrológica de una cuenca, ya que condicionan la generación de escorrentía, el tiempo de concentración, la propagación del flujo y la magnitud de los caudales máximos durante eventos de precipitación [46], [58].

Según Linsley, Kohler y Paulhus, las características fisiográficas de una cuenca influyen directamente en su respuesta hidrológica, especialmente en la generación del escurrimiento superficial, el tiempo de respuesta frente a una tormenta y la forma del hidrograma resultante [46].

De igual manera, Méndez *et al.* señalan que los parámetros morfométricos de la cuenca y de la red de drenaje ejercen un control significativo sobre la respuesta hidrológica del territorio, influyendo en el tiempo de concentración, la velocidad de propagación del flujo y los caudales máximos estimados para diferentes períodos de retorno [58].

Entre los parámetros fisiográficos más utilizados en los estudios hidrológicos se encuentran el área de drenaje, el perímetro, la longitud del cauce principal, el ancho medio de la cuenca, la pendiente media, el factor de forma, el coeficiente de compacidad, la densidad de drenaje y el orden de las corrientes. Estos parámetros permiten caracterizar el comportamiento hidrológico de la cuenca y constituyen información de entrada para modelos de simulación hidrológica e hidráulica [46], [56], [58].

En la actualidad, la obtención de los parámetros fisiográficos se realiza principalmente mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Modelos Digitales de Elevación (MDE), herramientas que permiten calcular de manera automática las variables

morfométricas con alta precisión y reproducibilidad. La integración de estas tecnologías facilita la caracterización espacial de las cuencas hidrográficas y mejora la confiabilidad de los análisis hidrológicos empleados en la planificación y gestión de los recursos hídricos [56], [57].

2.2.4. Parámetros geomorfológicos de la cuenca.

Los parámetros geomorfológicos permiten analizar la configuración del relieve de una cuenca hidrográfica y su relación con los procesos hidrológicos que regulan la generación de escorrentía, el transporte de sedimentos y la respuesta del sistema frente a eventos de precipitación. Entre los principales parámetros se encuentran la altitud media, la amplitud altitudinal, la pendiente, la curva hipsométrica y la distribución del área en función de la elevación, los cuales constituyen variables fundamentales para la caracterización fisiográfica de una cuenca [46], [71].

Según Linsley, Kohler y Paulhus, cuando uno o más procesos hidrológicos dependen de la elevación del terreno, resulta conveniente conocer la distribución espacial del área de la cuenca mediante curvas área–elevación o curvas hipsométricas, las cuales permiten representar la proporción del territorio comprendida entre diferentes intervalos altitudinales y facilitan la interpretación del comportamiento hidrológico de la cuenca [46].

Los parámetros geomorfológicos ejercen una influencia directa sobre la generación de escorrentía, la infiltración, el tiempo de concentración y la velocidad de propagación del flujo. En particular, la distribución altitudinal condiciona la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la cobertura vegetal, factores que modifican la respuesta hidrológica y la disponibilidad del recurso hídrico dentro de una cuenca [71].

En la actualidad, la determinación de los parámetros geomorfológicos se realiza principalmente mediante Sistemas de Información Geográfica y Modelos Digitales de Elevación, los cuales permiten obtener información altimétrica de alta resolución y calcular de manera automática variables como la altitud media, la pendiente, la orientación del terreno y las curvas hipsométricas. Estas herramientas mejoran la precisión del análisis espacial y fortalecen la evaluación hidrológica de las cuencas [56], [57], [71].

2.2.5. Curva hipsométrica.

La curva hipsométrica representa la relación entre la superficie acumulada de una cuenca hidrográfica y su altitud, constituyendo una herramienta fundamental para la caracterización geomorfológica del relieve. Su construcción consiste en representar en

el eje de las abscisas el área acumulada de la cuenca, expresada en unidades de superficie o en porcentaje del área total, y en el eje de las ordenadas las correspondientes cotas o elevaciones del terreno [72].

Strahler estableció que el análisis hipsométrico permite describir cuantitativamente la distribución del área de una cuenca con respecto a la elevación, proporcionando información sobre el grado de evolución geomorfológica del relieve y la acción de los procesos erosivos que han modelado el territorio [72].

Desde el punto de vista hidrológico, Linsley, Kohler y Paulhus indican que, cuando uno o más procesos hidrológicos dependen de la altitud, resulta indispensable conocer la distribución espacial del área de la cuenca mediante curvas área–elevación o curvas hipsométricas, ya que estas permiten analizar la influencia de la elevación sobre variables como la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la generación de escorrentía [46].

En consecuencia, la curva hipsométrica constituye una herramienta de gran utilidad para evaluar la variación del relieve, interpretar el grado de madurez geomorfológica y analizar la distribución altitudinal del área drenada. Su integración con Modelos Digitales de Elevación y Sistemas de Información Geográfica permite obtener una representación precisa de la configuración topográfica de la cuenca y facilita el desarrollo de estudios hidrológicos e hidráulicos orientados a la estimación de caudales y la delimitación de zonas de riesgo por inundación y socavación [46], [54], [72].

2.2.6. Histograma de frecuencias altimétricas.

El histograma de frecuencias altimétricas representa la distribución parcial del área de una cuenca hidrográfica en diferentes intervalos de altitud. A diferencia de la curva hipsométrica, que expresa el área acumulada en función de la elevación, el histograma muestra el área correspondiente a cada rango altitudinal, permitiendo identificar los niveles de elevación que ocupan una mayor o menor proporción de la superficie de la cuenca [54], [73].

Hermenejildo señala que la caracterización morfométrica mediante intervalos de cota permite determinar el área comprendida dentro de cada rango altitudinal y calcular el porcentaje de superficie correspondiente a cada intervalo. Esta información constituye la base para la elaboración de la curva hipsométrica y para la caracterización de la distribución altitudinal del relieve [54].

El histograma de frecuencias altimétricas complementa el análisis hipsométrico al facilitar la identificación de las altitudes predominantes dentro de la cuenca y la concentración espacial del relieve en determinados niveles de elevación. Su

interpretación permite reconocer sectores con mayor representatividad superficial y comprender la distribución vertical del territorio, aspecto de especial importancia en estudios hidrológicos y geomorfológicos [54].

De manera complementaria, Pike y Wilson indicaando la curva hipsométrica como el histograma de frecuencias altimétricas aportan información sobre la distribución vertical del terreno, aunque mediante representaciones gráficas y criterios de interpretación diferentes [73].

2.2.7. Precipitación.

La precipitación constituye una de las principales entradas de agua al sistema hidrológico y representa el punto dnto y la generación de caudales de crecida. Su estudio es fundamental para comprender el comportamiento hidrológico de una cuenca hidrográfica, ya que condiciona la disponibilidad del recurso hídrico y determina, en gran medida, la magnitud y frecuencia de los eventos de inundación [45], [46].

Linsley, Kohler y Paulhus señalan que la precipitación constituye uno de los datos básicos de mayor importancia en hidrología, debido a que su medición permite estimar la respuesta de una cuenca frente a los eventos de lluvia, analizar la relación precipitación–escorrentía y evaluar el comportamiento de los procesos hidrológicos que intervienen en la generación del flujo superficial [46].

De manera complementaria, Aparicio Mijares indica que el análisis de la precipitación permite determinar parámetros fundamentales como la altura de lluvia, la intensidad, la duración, la frecuencia y el período de retorno, variables indispensables para los estudios hidrológicos, el dimensionamiento de obras hidráulicas y la estimación de caudales de diseño [45].

Desde el punto de vista de la ingeniería hidráulica, la precipitación constituye la principal variable de entrada para el análisis de avenidas, el diseño de sistemas de drenaje, la evaluación del riesgo de inundaciones y la modelación hidrológica de cuencas. Su adecuada caracterización permite estimar con mayor precisión la respuesta hidrológica del territorio y constituye un insumo esencial para la planificación y gestión de los recursos hídricos [45], [46].

2.2.7.1. Isoyetas.

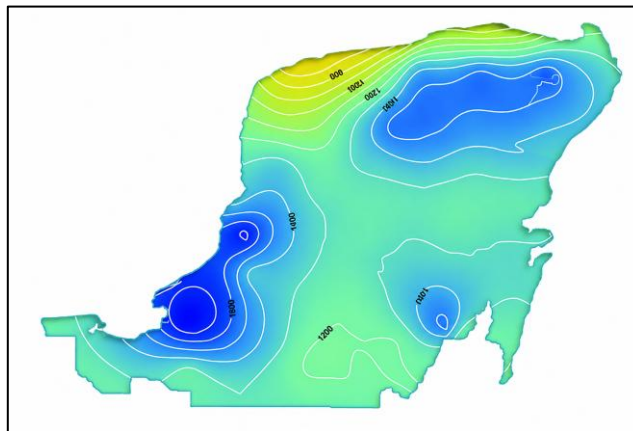
Las isoyetas son líneas trazadas sobre un mapa que unen puntos con igual cantidad de precipitación registrada o estimada durante un período determinado. Estas líneas permiten representar la distribución espacial de la lluvia y constituyen una herramienta fundamental para el análisis hidrológico de cuencas hidrográficas. De acuerdo con el

National Weather Service, una isoyeta corresponde a una línea que conecta puntos con iguales cantidades de precipitación [78].

Por su parte, Aparicio Mijares indica que el método de las isoyetas constituye el procedimiento más preciso para estimar la precipitación media cuando se dispone de una adecuada distribución de estaciones pluviométricas y se consideran los efectos del relieve sobre la distribución espacial de la lluvia. Se necesita juicio técnico al trazar isoyetas y una interpretación adecuada de la información pluviométrica disponible [45].

Desde una perspectiva hidrológica, el método de las isoyetas es mejor que otros métodos para estimar la precipitación promedio porque es más representativo de la distribución de la lluvia dentro de la cuenca. Esto es especialmente cierto en regiones montañosas donde las diferencias de altitud conducen a diferentes patrones de precipitación. En consecuencia, este método constituye una herramienta ampliamente utilizada para el análisis hidrológico, la estimación de caudales de diseño y la modelación de cuencas hidrográficas [45], [46], [80].

Figura 3. Configuración de las Isoyetas.



2.2.8. Temperatura.

La temperatura del aire es una variable meteorológica que expresa el estado térmico de la atmósfera en un lugar y momento determinados. Constituye uno de los principales elementos del clima y desempeña un papel fundamental en los procesos físicos que regulan el ciclo hidrológico, debido a su influencia sobre la evaporación, la evapotranspiración, la condensación y la formación de la precipitación [82], [83].

Por su parte, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) indica que la temperatura del aire está determinada principalmente

por la energía procedente de la radiación solar absorbida por la atmósfera y por el calor emitido desde la superficie terrestre. Estas condiciones controlan la demanda evaporativa de la atmósfera e influyen directamente sobre la evapotranspiración y el balance hídrico de los ecosistemas y de las cuencas hidrográficas [83].

La temperatura del aire depende principalmente de la radiación solar; sin embargo, también está condicionada por diversos factores geográficos y atmosféricos, entre los que destacan la altitud, la latitud, la nubosidad, la continentalidad, la proximidad a cuerpos de agua y la circulación general de la atmósfera. La interacción de estos factores determina la variabilidad espacial y temporal de la temperatura, generando diferencias significativas entre regiones y estaciones del año [82], [83].

Desde el punto de vista hidrológico, la temperatura constituye una variable fundamental para la estimación de la evapotranspiración potencial, el análisis del balance hídrico y la modelación hidrológica de cuencas. En consecuencia, su adecuada caracterización resulta indispensable para comprender la dinámica de los recursos hídricos y evaluar la respuesta de las cuencas frente a los cambios en las condiciones climáticas.

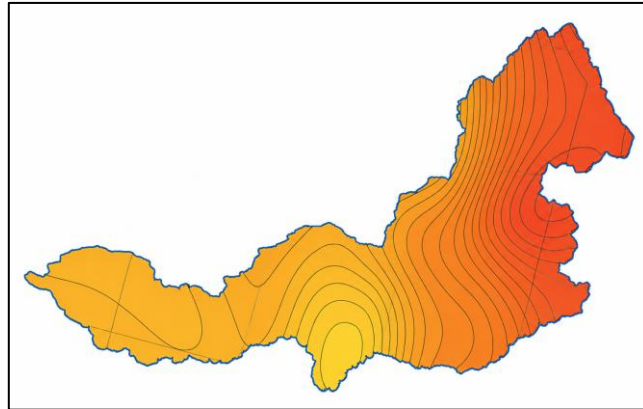
2.2.8.1. Isotermas.

Las isotermas son líneas trazadas sobre un mapa que unen puntos con igual temperatura registrada durante un período determinado. Estas líneas constituyen una herramienta cartográfica fundamental para representar la distribución espacial de la temperatura y analizar su variación sobre el territorio. De acuerdo con el National Weather Service, una isoterma corresponde a una línea que conecta puntos con igual temperatura [78]. De manera complementaria, la American Meteorological Society la define como una línea que une puntos de temperatura igual o constante [81].

Las isotermas permiten representar la distribución espacial de la temperatura mediante valores medios anuales, mensuales, estacionales o correspondientes a eventos específicos, facilitando la identificación de gradientes térmicos y la influencia de factores como la altitud, la latitud, el relieve y la proximidad a cuerpos de agua [78], [81].

Desde el punto de vista hidrológico, la distribución espacial de la temperatura constituye una variable de gran importancia, debido a su influencia sobre procesos como la evaporación, la evapotranspiración, la condensación y la formación de la precipitación. En consecuencia, el análisis de isotermas proporciona información relevante para la caracterización climática de una cuenca hidrográfica, la evaluación del balance hídrico y la interpretación de los procesos que intervienen en el ciclo hidrológico [82], [83].

Figura 4. Configuración de las Isotermas.



2.2.9. Sistemas de Información Geográfica.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) constituyen herramientas tecnológicas que permiten capturar, almacenar, gestionar, procesar, analizar y representar información georreferenciada, facilitando el estudio de fenómenos espaciales y la toma de decisiones basada en datos territoriales. De acuerdo con el U.S. Geological Survey (USGS), un Sistema de Información Geográfica es un sistema informático diseñado para analizar, gestionar y visualizar información asociada a una ubicación geográfica [84]. De manera complementaria, Esri señala que los SIG integran datos de localización con información descriptiva, permitiendo identificar patrones, relaciones espaciales y tendencias en la distribución de los fenómenos geográficos [80].

En el ámbito de la hidrología y la ingeniería hidráulica, los Sistemas de Información Geográfica constituyen una herramienta fundamental para el procesamiento y análisis de información cartográfica, topográfica, climática e hidrológica. Mediante estas herramientas es posible delimitar cuencas hidrográficas, generar Modelos Digitales de Elevación, calcular parámetros morfométricos, analizar pendientes, modelar redes de drenaje, determinar áreas de aporte y elaborar cartografía temática de variables como precipitación, temperatura, cobertura vegetal, uso del suelo y susceptibilidad a inundaciones [80], [84].

Asimismo, la integración de información espacial proveniente de diferentes fuentes permite desarrollar análisis multicriterio y modelos geoespaciales que apoyan la evaluación del comportamiento hidrológico de las cuencas y la identificación de zonas con diferentes niveles de amenaza. Estas capacidades convierten a los SIG en una herramienta indispensable para la planificación territorial, la gestión integral de los recursos hídricos y la evaluación del riesgo por inundaciones y procesos de socavación [80], [84].

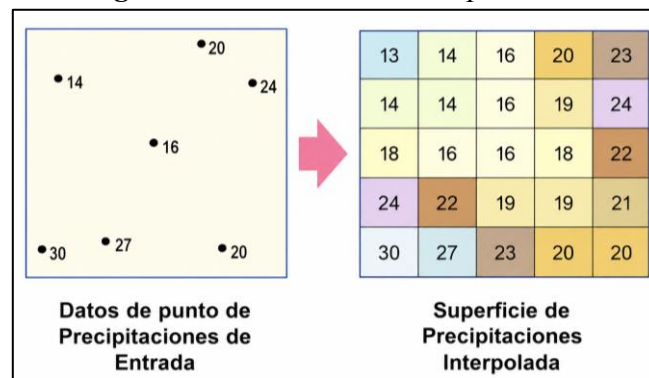
2.2.10. Interpolación.

La interpolación espacial es un procedimiento mediante el cual se estiman valores de una variable en ubicaciones donde no existen mediciones directas, utilizando la información disponible en puntos de muestreo cercanos. Este proceso se fundamenta en el principio de autocorrelación espacial, según el cual los valores observados en lugares próximos tienden a presentar mayor similitud que aquellos separados por mayores distancias [85].

De acuerdo con Esri, los métodos de interpolación generan superficies continuas a partir de datos puntuales, permitiendo estimar la distribución espacial de variables ambientales y geográficas mediante procedimientos matemáticos y geoestadísticos. La selección del método de interpolación depende de las características de la variable analizada, de la distribución de los datos y del objetivo del estudio [85].

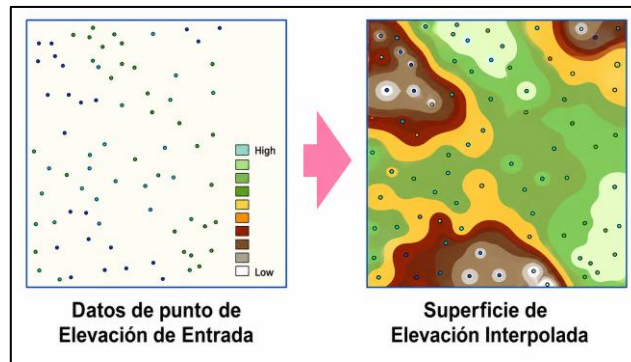
En hidrología, la interpolación espacial constituye una herramienta fundamental para representar la distribución de variables como la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración y la elevación, utilizando registros provenientes de estaciones meteorológicas, levantamientos topográficos u otras fuentes de información georreferenciada. La generación de superficies continuas facilita el análisis espacial de estas variables y su integración con otros insumos cartográficos dentro de un Sistema de Información Geográfica [80], [85].

Figura 5. Método 1 de Interpolación.



En hidrología y climatología, la interpolación es útil porque muchas variables ambientales no se miden de forma continua en todo el territorio, sino en puntos específicos. Por esta razón, los métodos de interpolación permiten representar espacialmente la variación de dichas variables y generar mapas ráster que facilitan su análisis dentro de una cuenca.

Figura 6. Método 2 de Interpolación.



2.2.10.1. Método de interpolación Kriging.

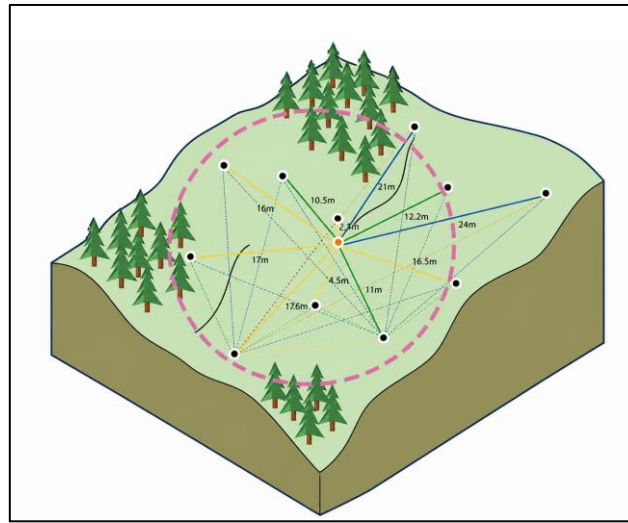
El método de Kriging es una técnica de interpolación geoestadística que estima valores en puntos donde no hay observaciones en los datos al estudiar la estructura de autocorrelación espacial de los datos observados. A diferencia de los métodos deterministas, Kriging utiliza modelos estadísticos que describen la variación de la variable en semivariogramas y permite la generación de estimaciones y la cuantificación de la incertidumbre de cada predicción [85].

De acuerdo con Esri, el método Kriging modela los patrones espaciales presentes en los datos mediante el ajuste de un semivariograma, el cual representa la relación entre la similitud de los valores observados y la distancia que los separa. A partir de este modelo es posible predecir valores en ubicaciones no muestreadas y obtener, simultáneamente, una estimación del error asociado a la interpolación [85].

Kriging no basa sus estimaciones únicamente en la proximidad entre los puntos de observación, sino también en la estructura de dependencia espacial de la variable analizada. Esta característica le permite representar con mayor precisión fenómenos que presentan continuidad espacial y una correlación estadística definida entre las observaciones [85].

En hidrología y ciencias de la Tierra, el método Kriging se emplea ampliamente para interpolar variables como la precipitación, la temperatura, la evapotranspiración, las propiedades del suelo, la topografía y otros parámetros ambientales cuya distribución espacial presenta patrones de autocorrelación. Su aplicación resulta especialmente adecuada cuando se dispone de un número suficiente de observaciones distribuidas espacialmente y se requiere obtener superficies continuas con un fundamento geoestadístico sólido [85].

Figura 7. Método de Interpolación Kriging.



2.2.11. Balance hidrológico.

El balance hidrológico se fundamenta en el principio de conservación de la masa, el cual establece que el volumen de agua que ingresa a un sistema hidrológico debe ser igual al volumen que sale, considerando la variación del almacenamiento ocurrida durante un período determinado. Este principio constituye la base para cuantificar la disponibilidad del recurso hídrico y analizar el comportamiento de una cuenca hidrográfica frente a diferentes condiciones climáticas e hidrológicas [45], [46].

Linsley, Kohler y Paulhus señalan que, para períodos de análisis suficientemente largos, como los balances medios anuales, el cambio de almacenamiento puede considerarse relativamente pequeño, de manera que la evapotranspiración puede estimarse como la diferencia entre la precipitación y el caudal de salida de la cuenca. Esta simplificación facilita la evaluación del comportamiento hidrológico cuando no se dispone de información detallada sobre todas las componentes del balance [46].

En el análisis hidrológico de una cuenca, el balance hidrológico permite cuantificar la distribución del agua aportada por la precipitación entre la evapotranspiración, la infiltración, la escorrentía superficial, el flujo subterráneo y las diferentes formas de almacenamiento. Aunque la formulación matemática del balance es conceptualmente sencilla, su aplicación práctica requiere considerar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, la evapotranspiración, las pérdidas profundas, la humedad del suelo y los cambios de almacenamiento, factores que introducen incertidumbre en la estimación de cada uno de sus componentes [45], [46].

En términos generales, el balance puede expresarse como:

$$P - Q - ET = \Delta S \quad (1)$$

Donde:

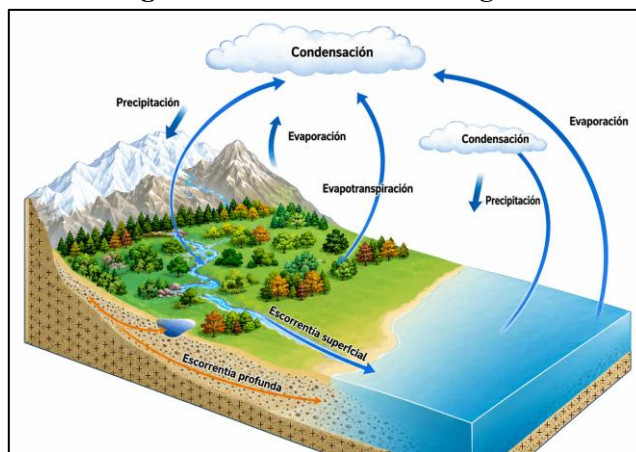
P = precipitación

Q = caudal o escorrentía total

ET = evapotranspiración

ΔS = cambio de almacenamiento

Figura 8. Balance Hidrológico.



2.2.12. Evapotranspiración.

La evapotranspiración corresponde al proceso mediante el cual el agua retorna a la atmósfera como resultado de la evaporación desde superficies libres de agua, el suelo y la vegetación, así como de la transpiración realizada por las plantas. Este proceso constituye uno de los principales componentes del balance hidrológico, ya que representa una de las mayores pérdidas de agua dentro de una cuenca hidrográfica y condiciona la disponibilidad del recurso hídrico para los diferentes usos [46], [86].

Linsley, Kohler y Paulhus señalan que, en el análisis del balance hídrico de una cuenca, la evapotranspiración representa el conjunto de las pérdidas de agua ocasionadas por la evaporación y la transpiración, desempeñando un papel fundamental en la distribución del agua entre la atmósfera, el suelo y la vegetación [46].

La magnitud de la evapotranspiración también depende de factores relacionados con las características de la cobertura vegetal, el tipo de cultivo, la disponibilidad de humedad en el suelo y el estado de desarrollo de la vegetación. En consecuencia, este proceso presenta una marcada variabilidad espacial y temporal, siendo uno de los componentes más importantes para la estimación del balance hídrico y la modelación hidrológica de cuencas [86].

2.2.13. Infiltración.

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua atraviesa la superficie del suelo y penetra en su interior como consecuencia de la acción combinada de las fuerzas gravitacionales y capilares. Este proceso constituye uno de los componentes fundamentales del ciclo hidrológico, ya que regula la distribución del agua entre la escorrentía superficial, el almacenamiento de humedad en el suelo y la recarga de los acuíferos [45], [46].

Aparicio Mijares define la infiltración como el movimiento del agua desde la superficie hacia el interior del suelo, destacando que este proceso desempeña un papel esencial en la relación precipitación–escorrentía y en el diseño hidrológico de obras hidráulicas, debido a su influencia sobre la generación de caudales y la respuesta de las cuencas frente a los eventos de lluvia [45].

Por su parte, Linsley, Kohler y Paulhus indican que la capacidad de infiltración depende de diversos factores, entre los que destacan la textura y estructura del suelo, la humedad antecedente, el contenido de materia orgánica, la cobertura vegetal, la compactación del terreno y la época del año. La interacción de estos factores determina la velocidad con la que el agua penetra en el suelo y la proporción que se transforma en escorrentía superficial [46].

Desde el punto de vista hidrológico, la infiltración controla la disponibilidad de agua almacenada en el suelo, la recarga de aguas subterráneas y la magnitud de la escorrentía superficial. Una elevada capacidad de infiltración favorece la reducción de los caudales pico y disminuye el riesgo de inundaciones, mientras que una baja capacidad incrementa la generación de escorrentía y la probabilidad de ocurrencia de avenidas durante eventos de precipitación intensa [45], [46].

2.2.14. Caudal o escorrentía superficial.

La escorrentía superficial corresponde a la fracción de la precipitación que no logra infiltrarse en el suelo ni retornar a la atmósfera mediante evapotranspiración, desplazándose sobre la superficie del terreno hasta incorporarse a la red de drenaje de la cuenca. Este proceso constituye uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y representa el mecanismo mediante el cual el agua precipitada es transportada hacia quebradas, ríos y demás cuerpos de agua superficiales [77], [78].

De acuerdo con el National Weather Service, la escorrentía corresponde a la porción de la precipitación que no logra infiltrarse en el suelo y fluye superficialmente hacia los cauces naturales o artificiales, dependiendo de las condiciones topográficas y de drenaje del terreno [78]. Por su parte, Salguero Pérez señala que la escorrentía

superficial se genera cuando la intensidad de la lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo, siendo un proceso condicionado por factores como la pendiente, la cobertura vegetal, las características del suelo y las irregularidades del terreno [77].

La magnitud de la escorrentía depende de la interacción entre las condiciones climáticas, las características fisiográficas de la cuenca y el uso del suelo. Variables como la intensidad y duración de la precipitación, la humedad antecedente, la permeabilidad del suelo, la cobertura vegetal y la pendiente influyen directamente en el volumen y la velocidad del escurrimiento superficial, condicionando la respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos de lluvia [77].

Salguero Pérez indica que los caudales máximos pueden estimarse mediante diversos procedimientos, entre los que se incluyen métodos empíricos, semiempíricos, análisis estadísticos y modelos matemáticos. Entre las metodologías de mayor aplicación se encuentran el método racional, los hidrogramas unitarios y modelos hidrológicos como HEC-RAS, los cuales permiten simular la transformación de la precipitación en escorrentía y estimar caudales de diseño para diferentes períodos de retorno [77].

2.2.15. Periodos de retorno, intensidad de lluvia y caudales de crecida.

El periodo de retorno representa la frecuencia estadística con la que puede presentarse un evento de determinada magnitud. Su aplicación permite estimar precipitaciones o caudales asociados a escenarios de crecida y definir condiciones de análisis para obras hidráulicas y estudios de amenaza. La intensidad de lluvia, la duración del evento y las características de la cuenca influyen en la magnitud del caudal máximo generado durante una crecida [45], [107].

2.2.16. Crecidas.

Una crecida corresponde al incremento temporal del caudal y del nivel del agua en un cauce como consecuencia del aumento de los aportes provenientes de la precipitación, la escorrentía superficial, el flujo subsuperficial o cambios en las condiciones hidrológicas de la cuenca. La magnitud y duración de estos eventos dependen de factores como la intensidad y duración de la lluvia, las características fisiográficas de la cuenca, la capacidad de infiltración del suelo y las condiciones de la red de drenaje [45], [46].

De manera complementaria, Aparicio Mijares indica que el escurrimiento superficial se inicia cuando la precipitación alcanza la superficie del terreno, satisface las pérdidas iniciales por infiltración y almacenamiento en depresiones, y posteriormente comienza a desplazarse hacia los cauces definidos, contribuyendo al incremento progresivo del caudal y al desarrollo de las crecidas [45].

Desde el punto de vista hidrológico, una crecida representa la respuesta natural de la cuenca frente a un evento de precipitación y constituye el proceso mediante el cual se concentra el escurrimiento hacia la red hidrográfica. La magnitud del evento depende de la interacción entre las condiciones meteorológicas, las características geomorfológicas de la cuenca, el uso del suelo, la cobertura vegetal y la capacidad de almacenamiento e infiltración del terreno [45], [46].

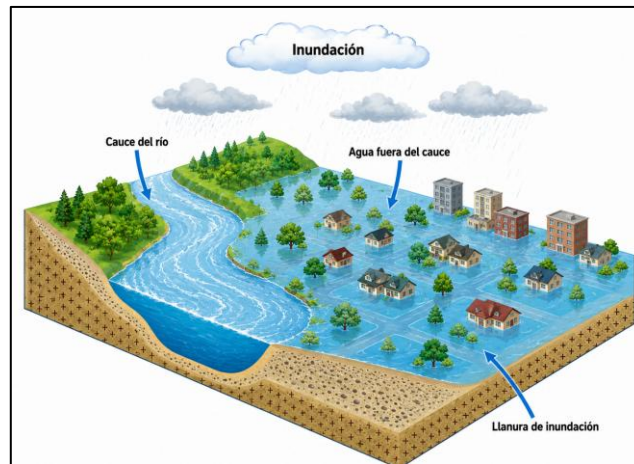
2.2.17. Inundación.

La inundación es un fenómeno hidrológico que ocurre cuando el caudal de un río, quebrada o sistema de drenaje supera la capacidad de conducción de su cauce o de las obras hidráulicas asociadas, provocando el desbordamiento del agua hacia áreas que, en condiciones normales, permanecen secas. La ocurrencia de inundaciones está estrechamente relacionada con eventos de precipitación intensa, crecidas extraordinarias, cambios en el uso del suelo y limitaciones en la capacidad hidráulica de los cauces [77], [84], [87].

El U.S. Geological Survey (USGS) define una inundación como un flujo relativamente alto que excede la capacidad de las márgenes naturales o artificiales de un río, ocasionando el desbordamiento del agua sobre las zonas adyacentes [84]. Desde el punto de vista hidrológico, las inundaciones representan la manifestación superficial de una respuesta extrema de la cuenca frente a eventos de precipitación o aportes extraordinarios de esorrentía. Su magnitud depende de factores como la intensidad y duración de la lluvia, las características fisiográficas de la cuenca, la capacidad de infiltración del suelo, la cobertura vegetal, la ocupación del territorio y las condiciones hidráulicas del cauce [77].

Salguero Pérez señala que las inundaciones se evidencian cuando el caudal excede la capacidad de conducción de un cauce natural o de una obra hidráulica, generando el desbordamiento del agua y la afectación de las áreas circundantes. Estos eventos suelen estar asociados a elevados caudales de escurrimiento y constituyen uno de los principales riesgos hidrológicos para la población, la infraestructura y las actividades económicas [77].

Figura 9. *Proceso de Inundación.*



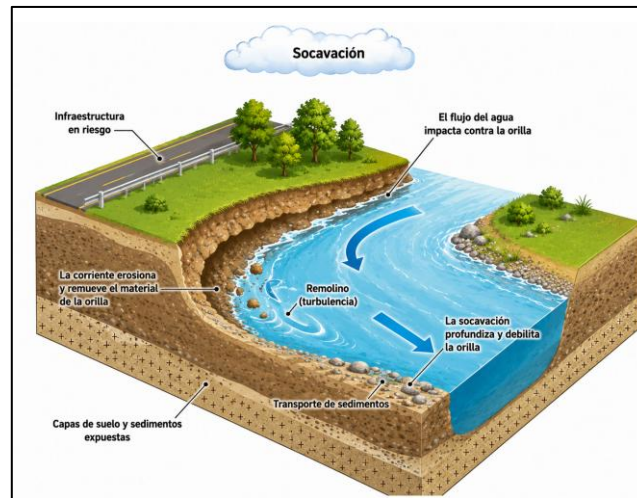
2.2.17. Socavación.

La socavación es un proceso erosivo originado por la acción del flujo de agua sobre el lecho y las márgenes de un cauce, el cual ocurre cuando las fuerzas hidráulicas ejercidas por la corriente superan la resistencia de los materiales que conforman el fondo y las riberas. Este fenómeno constituye uno de los principales mecanismos de modificación morfológica de los ríos y representa una de las causas más importantes de falla en obras hidráulicas, puentes y estructuras ubicadas en cauces naturales [46], [88].

Por su parte, Arneson, Zevenbergen, Lagasse y Clopper señalan que la evaluación de la socavación constituye un aspecto fundamental en el diseño y la seguridad de puentes y demás obras hidráulicas, distinguiendo tres mecanismos principales: socavación general o degradación del cauce, socavación por contracción, producida por la reducción de la sección hidráulica, y socavación local, desarrollada alrededor de pilas, estribos y otras estructuras debido a la formación de vórtices y al incremento local de las velocidades del flujo [88].

La magnitud de la socavación está directamente relacionada con variables hidráulicas y geomorfológicas como el caudal, la velocidad del flujo, la pendiente longitudinal, la rugosidad del cauce, la carga sedimentaria, la geometría de la sección transversal y las propiedades geotécnicas de los materiales que conforman el lecho y las márgenes. Durante eventos de crecida, el incremento de la energía del flujo favorece la movilización de sedimentos y aumenta la probabilidad de erosión del cauce y de afectación a la infraestructura hidráulica [46], [88].

Figura 10. Proceso de Socavamiento.



2.2.18. Transporte de sedimentos.

El transporte de sedimentos está relacionado con la erosión, la socavación y la estabilidad del cauce. Durante eventos de crecida, el aumento del caudal y de la velocidad incrementa la capacidad del río para movilizar partículas del lecho y de las márgenes. El transporte de sedimentos comprende procesos de erosión, movimiento y deposición de partículas, los cuales dependen de variables hidráulicas como velocidad, esfuerzo cortante, profundidad y pendiente del cauce [109].

2.2.18. Modelación hidrológica lluvia-escorrentía.

La modelación hidrológica lluvia-escorrentía permite estimar la respuesta de una cuenca frente a eventos de precipitación, transformando la lluvia en escorrentía y caudal. El modelo HEC-HMS permite representar procesos de precipitación-escorrentía y tránsito de caudales en sistemas naturales o controlados, por lo que resulta útil para obtener hidrogramas y caudales de diseño en estudios de crecidas [111], [112]. Este tipo de modelación es importante cuando no existen suficientes registros hidrométricos, ya que permite estimar caudales a partir de información climática, topográfica y morfométrica de la cuenca.

2.2.18.1. Modelación hidráulica con HEC-RAS.

La modelación hidráulica bidimensional permite analizar el comportamiento del flujo considerando su variación longitudinal y lateral dentro del cauce y sus márgenes. HEC-RAS utiliza un modelo de terreno, una malla computacional, condiciones de frontera y valores de rugosidad de Manning para representar la propagación del flujo sobre una superficie determinada [112]. Por ello, esta herramienta es adecuada para identificar

zonas de desbordamiento, concentración de velocidades y posibles áreas de afectación en tramos urbanos de ríos.

Figura 11. Modelamiento con Hec-Ras.



2.2.18.2. Fundamentos del flujo no permanente.

El flujo no permanente se presenta cuando el caudal y el nivel de agua varían con el tiempo, como ocurre durante una crecida generada por lluvias intensas. Este tipo de simulación permite representar la propagación de la onda de crecida a través del cauce y hacia las áreas laterales, considerando los cambios temporales del hidrograma de entrada [94], [111].

2.2.18.3. Topografía del terreno y representación del cauce.

La topografía del terreno constituye la base de la simulación hidráulica, ya que permite representar la geometría del lecho, las márgenes, los taludes y las zonas adyacentes al río. La calidad de esta información influye directamente en la representación del comportamiento del flujo dentro del modelo [111], [112].

2.2.18.4. Malla computacional y resolución espacial.

En la modelación bidimensional, el área de análisis se divide en una malla computacional formada por celdas. Cada celda permite calcular las variables hidráulicas del flujo en una parte específica del terreno. Una malla con mayor resolución mejora la representación de sectores críticos, como puentes, estrechamientos, curvas del cauce y márgenes próximas a zonas urbanas; sin embargo, también incrementa el tiempo de procesamiento [112].

2.2.18.5. Rugosidad hidráulica de Manning.

El coeficiente de Manning representa la resistencia que ofrece el cauce y las superficies laterales al movimiento del agua. Su valor depende de las condiciones del lecho, la vegetación, la presencia de rocas, irregularidades, obstrucciones y características de las

márgenes. La correcta asignación de la rugosidad permite representar de manera más realista la velocidad y profundidad del flujo durante los escenarios de crecida [94], [111].

2.2.18.6. Condiciones de frontera e hidrogramas.

Las condiciones de frontera definen la forma en que el agua ingresa y sale del modelo hidráulico. En simulaciones de flujo no permanente, generalmente se incorpora un hidrograma de caudal como condición de entrada aguas arriba y una condición hidráulica de salida aguas abajo. Estos parámetros permiten reproducir la variación temporal del caudal y analizar la respuesta del río frente a eventos de crecida [111], [112].

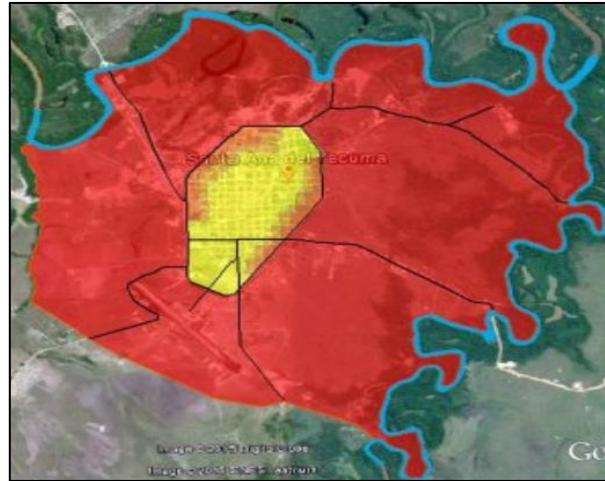
2.2.18.7. Profundidad, velocidad y extensión de inundación.

Los principales resultados de una simulación hidráulica bidimensional son la profundidad del agua, la velocidad del flujo, el nivel de la superficie libre y la extensión de las áreas ocupadas por la crecida. La interpretación conjunta de estas variables permite identificar sectores con mayor posibilidad de desbordamiento, afectación a márgenes, interacción con infraestructura y condiciones favorables para procesos de erosión o socavación [111], [112].

2.2.19. Zonificación de susceptibilidad a inundación y socavación.

La zonificación de susceptibilidad permite identificar espacialmente los sectores donde las condiciones físicas del terreno y el comportamiento hidráulico del río favorecen la ocurrencia de inundaciones, erosión de márgenes y socavación. Para ello, se integran variables territoriales, hidrológicas e hidráulicas mediante herramientas SIG, obteniendo categorías que facilitan la interpretación preventiva del área de estudio [104], [111].

Figura 12. Zonificación de inundaciones.



2.2.19.1 Diferencia entre susceptibilidad, amenaza, exposición, vulnerabilidad y riesgo.

La susceptibilidad corresponde a la predisposición física de un sector para presentar inundaciones o socavación, de acuerdo con sus condiciones topográficas, geológicas, geomorfológicas e hidráulicas. La amenaza incorpora la probabilidad e intensidad de ocurrencia de un evento; la exposición se refiere a las personas, viviendas, vías o infraestructura localizadas en el área afectable; y la vulnerabilidad representa el grado de afectación que estos elementos podrían sufrir. El riesgo resulta de la interacción entre amenaza, exposición y vulnerabilidad [16]. En la presente investigación se desarrolla principalmente una zonificación de susceptibilidad, ya que no se realiza una valoración integral de pérdidas ni de vulnerabilidad.

2.2.19.2. Factores condicionantes: pendiente, geología, geomorfología, cobertura vegetal y proximidad al cauce.

Los factores condicionantes son las características del territorio que pueden favorecer la acumulación, concentración o propagación del agua. La pendiente influye en la velocidad de escurrimiento; la geología y geomorfología permiten identificar materiales aluviales, terrazas y sectores con mayor sensibilidad a la erosión; mientras que la cobertura vegetal puede modificar la infiltración y reducir la escorrentía superficial. La proximidad al cauce permite reconocer las áreas con mayor influencia directa de las crecidas y de la erosión lateral del río [104], [109].

2.2.19.3. Factor desencadenante: precipitación.

La precipitación constituye el principal factor desencadenante de las inundaciones y crecidas, debido a que los eventos de lluvia intensa incrementan la escorrentía superficial y el caudal del río. Su influencia debe analizarse conjuntamente con las

características físicas de la cuenca, puesto que una misma precipitación puede generar diferentes respuestas según la pendiente, cobertura, capacidad de infiltración y condiciones del cauce [46], [104].

2.2.19.4. Integración de variables mediante SIG y análisis multicriterio.

El análisis multicriterio permite integrar las capas temáticas de los factores condicionantes y desencadenantes mediante procesos de reclasificación y ponderación en un entorno SIG. De esta forma, cada variable recibe una valoración según su influencia relativa en la ocurrencia de inundaciones o socavación. Para complementar este análisis, los resultados de la modelación hidráulica permiten incorporar información sobre profundidad, velocidad y extensión del flujo durante escenarios de crecida [104], [111], [112].

En el caso de la socavación, deben considerarse especialmente los sectores donde el flujo presenta mayor velocidad, cambios de dirección, estrechamientos o interacción con puentes y márgenes. Estas condiciones pueden aumentar la capacidad erosiva del agua y favorecer la remoción de materiales del lecho o de las riberas [108], [109].

2.2.19.5. Clasificación de niveles de susceptibilidad.

Una vez integradas las variables, los valores obtenidos se clasifican en niveles de susceptibilidad, como bajo, medio, alto y muy alto. Esta clasificación permite representar cartográficamente los sectores prioritarios para monitoreo, control de ocupación del suelo, conservación de márgenes y evaluación de medidas de protección. Los resultados deben contrastarse con observaciones de campo, antecedentes de inundación y evidencias de erosión para fortalecer la confiabilidad de la zonificación [104].

2.2.20. Incertidumbre y validación de modelos hidráulicos.

Los modelos hidrológicos e hidráulicos presentan incertidumbre porque simplifican procesos naturales complejos. Esta incertidumbre puede originarse en la calidad de los datos de precipitación, la resolución del modelo digital del terreno, el tamaño de la malla, los coeficientes de Manning y las condiciones de frontera. En HEC-RAS 2D, la preparación del terreno, la generación de la malla y la asignación de rugosidad son etapas fundamentales para representar correctamente el flujo [111], [112]. La validación puede realizarse mediante observaciones de campo, registros históricos, fotografías, encuestas, marcas de inundación o comparación con eventos ocurridos; además, los mapas de susceptibilidad deben contrastarse con información de campo para mejorar su confiabilidad.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se describe la metodología empleada en esta investigación, especificando el tipo y diseño de investigación, las unidades de estudio, la población y muestra, las técnicas e instrumentos de recolección de información y las técnicas de análisis de datos, con el fin de garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos.

3.1. Tipo de investigación.

La presente investigación es de tipo proyectiva, no experimental, con enfoque cuantitativo y finalidad aplicada, debido a que busca generar una propuesta técnica para la delimitación de zonas de riesgo por socavación y crecidas del río Caluma, fundamentada en el análisis hidrológico, la modelación hidráulica y el uso de Sistemas de Información Geográfica.

Hurtado de Barrera explicó que la investigación proyectiva “propone soluciones a una situación específica basada en un proceso de indagación. Implica explorar, describir, explicar y sugerir alternativas para el cambio, pero no necesariamente ejecutar la propuesta” [89]. En este enfoque, la investigación no se limita simplemente a describir o explicar un fenómeno, sino que desarrolla una propuesta técnicamente respaldada para abordar algún problema específico.

De manera complementaria, Hurtado de Barrera señala que la investigación proyectiva consiste en la elaboración de un plan, programa, modelo o propuesta orientado a solucionar un problema práctico previamente diagnosticado, sustentando dicha propuesta en información obtenida mediante un proceso sistemático de investigación [90].

En este sentido, la investigación es proyectiva porque, a partir del análisis de las condiciones hidrológicas, hidráulicas y territoriales del río Caluma, se busca generar una base cartográfica que permita delimitar zonas de riesgo por socavación y crecidas en el casco urbano del cantón Caluma. La propuesta del estudio no implica la implementación de obras, sino el desarrollo de una herramienta de apoyo técnico para identificar y comprender las áreas susceptibles.

La investigación es no experimental ya que no se manipularán las condiciones hidrológicas, hidráulicas y territoriales del área de estudio. Por otro lado, se investigarán las condiciones actuales basándose en información documental y observación de campo, así como encuestas realizadas a propietarios o responsables de propiedades ribereñas.

El enfoque cuantitativo ayudará a organizar y analizar la información y utilizar datos numéricos, frecuencias, porcentajes, tablas y gráficos. Los datos que consideraremos son la distancia aproximada de la propiedad al río, la duración de la residencia, la frecuencia de las inundaciones, el nivel máximo de agua alcanzado, el grado de impacto, la pérdida aproximada de terreno y la existencia de obras de protección de la ribera.

Desde esta perspectiva, podemos ver que la investigación será útil en el futuro para identificar las áreas susceptibles a crecidas, inundaciones y erosión, y se podrá utilizar para mejorar la planificación territorial y la gestión preventiva de riesgos en la ciudad del cantón Caluma.

3.2.Diseño de investigación.

Según Hurtado de Barrera, el diseño de investigación "se refiere a dónde y cuándo se recoge la información, así como a la amplitud de la información que se va a recoger, para que la pregunta de investigación pueda ser respondida de la manera más adecuada posible" [89]. En este sentido, la presente investigación adopta un diseño de campo, documental y transversal, de acuerdo con la naturaleza del problema y los objetivos.

El estudio es de campo porque la información será recolectada directamente en el área donde ocurre el fenómeno de estudio, es decir, en los predios ubicados dentro del perímetro ribereño urbano del río Caluma. Gallardo Echenique define la investigación de campo como el proceso de recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular ni controlar las variables objeto de estudio [91]. En la presente investigación, la información será obtenida mediante recorridos de campo, levantamiento de información georreferenciada y encuestas aplicadas a propietarios, arrendatarios o responsables de los predios ubicados en las zonas de influencia del río Caluma.

Asimismo, el estudio presenta un diseño documental, debido a que empleará información secundaria proveniente de registros hidrometeorológicos, cartografía oficial, Modelos Digitales de Elevación, ortofotografías, estudios técnicos, normativa vigente y literatura científica relacionada con la hidrología, la hidráulica y la gestión del riesgo. El análisis de esta información permitirá sustentar técnicamente la caracterización de la cuenca y la modelación hidrológica e hidráulica requerida para el desarrollo de la investigación [89].

También corresponde a un diseño documental, porque se utilizará información técnica relacionada con registros hidrometeorológicos, cartografía base, modelos digitales del terreno, estudios previos, normativa, bibliografía especializada y datos oficiales necesarios para sustentar el análisis hidrológico, hidráulico y espacial de la investigación.

En cuanto a la temporalidad, la investigación presenta un diseño transeccional o transversal, debido a que la información será recopilada en un único momento del proceso investigativo, sin efectuar seguimiento de las variables a lo largo del tiempo. Según Hurtado de Barrera, en el diseño transeccional el investigador estudia el evento en un momento específico, obteniendo información correspondiente a ese período de análisis [89].

3.3. Unidades de estudio.

Según Hurtado de Barrera, las unidades de estudio corresponden a las entidades sobre las cuales se observa o analiza el fenómeno de investigación, pudiendo estar constituidas por personas, objetos, instituciones, documentos, regiones o cualquier otro elemento que posea las características relacionadas con el evento de estudio [89].

En la presente investigación, las unidades de estudio estarán conformadas por los predios ubicados dentro del perímetro ribereño urbano del río Caluma y por los propietarios, arrendatarios o responsables de dichos predios, quienes proporcionarán información referente a las afectaciones ocasionadas por procesos de crecida, inundación y socavación registrados en el área de estudio.

La unidad espacial de análisis corresponde al predio ribereño, debido a que constituye el elemento territorial directamente expuesto a las dinámicas hidrológicas e hidráulicas del río Caluma y, por tanto, susceptible a procesos de desbordamiento, erosión lateral y pérdida de terreno. Su evaluación permitirá relacionar las condiciones físicas del territorio con los resultados obtenidos mediante la modelación hidrológica e hidráulica.

Por otra parte, la unidad informante estará integrada por los propietarios, arrendatarios o responsables de los predios, quienes, a partir de su conocimiento y experiencia, aportarán información sobre la ocurrencia de eventos de inundación, niveles máximos alcanzados por el agua, frecuencia de las afectaciones, pérdida de terreno por socavación y otras evidencias relacionadas con el comportamiento histórico del río Caluma. La información obtenida mediante las encuestas constituirá un complemento para la validación e interpretación de los resultados derivados del análisis hidrológico, la modelación hidráulica y la delimitación cartográfica de las zonas de riesgo.

3.3.1. Población.

La población de estudio estará conformada por aproximadamente 130 predios localizados dentro del perímetro ribereño urbano del río Caluma, en el casco urbano del cantón Caluma, provincia Bolívar. Estos predios constituyen el universo de análisis debido a su proximidad al cauce principal y a su potencial exposición frente a procesos de crecida, inundación, erosión lateral y socavación, fenómenos que representan la problemática central de la presente investigación.

Según Hurtado de Barrera, la población corresponde al conjunto de unidades que poseen las características o el evento objeto de estudio y que cumplen con los criterios de inclusión establecidos para la investigación [89]. En este contexto, la población está integrada por los predios ubicados en la franja ribereña urbana del río Caluma, los cuales comparten como característica común su localización dentro del área susceptible a la influencia directa de los procesos hidrológicos e hidráulicos del cauce.

3.3.2. Muestra.

Según Hurtado de Barrera, la muestra corresponde a una parte representativa de la población seleccionada para el estudio, a la cual se recurre cuando no resulta factible investigar la totalidad de las unidades que conforman el universo de análisis [89].

En la presente investigación, aunque la población está conformada por aproximadamente 130 predios ubicados dentro del perímetro ribereño urbano del río Caluma, se trabajará con una muestra representativa de 62 predios, seleccionada con el propósito de obtener información confiable y estadísticamente válida sobre las afectaciones ocasionadas por procesos de crecida, inundación y socavación.

La selección de la muestra permitirá optimizar los recursos humanos, económicos y de tiempo disponibles para la investigación, garantizando al mismo tiempo la representatividad de la población objeto de estudio.

Para determinar la muestra se aplicará la fórmula para poblaciones finitas:

$$n = (N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q) / [e^2 (N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q] \quad (2)$$

Donde:

n = tamaño de la muestra

N = tamaño de la población

Z = nivel de confianza

p = probabilidad de ocurrencia

q = probabilidad de no ocurrencia

e = margen de error permitido

La muestra estará conformada por 62 predios, considerando un nivel de confianza del 95 %, una probabilidad de ocurrencia y no ocurrencia de 0,5 y un margen de error aproximado del 9 %. La selección de los predios se realizará procurando cubrir diferentes sectores del perímetro ribereño urbano, distancias variables respecto al cauce y zonas donde existan antecedentes o evidencias de afectación por crecidas, inundaciones o socavación.

3.4. Prueba de hipótesis - pregunta científica - idea a defender.

La presente investigación se orienta a responder la siguiente pregunta científica:

¿El estado hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Caluma influye en la socavación y los altos niveles de crecida, determinando la delimitación de zonas de riesgo en el casco urbano del cantón Caluma?

A partir de esta pregunta se plantea como idea a defender que el análisis de las condiciones hidrológicas, hidráulicas, cartográficas y de campo, complementado con información proporcionada por los propietarios de predios ribereños, permite identificar zonas susceptibles a crecidas, inundaciones y procesos de socavación en el casco urbano del cantón Caluma.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de información.

La técnica principal de recolección de información será la encuesta, debido a que permite obtener información directa de los propietarios, arrendatarios o responsables de los predios ubicados dentro del perímetro ribereño urbano del río Caluma. Según Morán y Alvarado, la encuesta “consiste en la interrogación sistemática de individuos a fin de generalizar. Se usa para conocer la opinión de un determinado grupo de personas respecto de un tema que define el investigador” [92]. En la presente investigación, esta técnica permitirá recopilar información sobre los antecedentes de inundación, crecidas y procesos de socavación registrados en los predios objeto de estudio.

Como instrumento de recolección de datos se utilizará un cuestionario estructurado, diseñado para obtener información homogénea y facilitar el procesamiento estadístico de las respuestas. Bernal define el cuestionario como “un conjunto de preguntas diseñadas para generar los datos necesarios, con el propósito de alcanzar los objetivos del proyecto de investigación” [93]. En este estudio, el cuestionario permitirá recopilar información relacionada con los antecedentes de inundación, frecuencia de ocurrencia de eventos, niveles máximos alcanzados por el agua, grado de afectación, pérdida de terreno por socavación, incremento de la erosión y existencia de obras de protección ribereña.

Habrán tres secciones en el cuestionario. La primera sección tratará sobre la propiedad, que contendrá el código de la propiedad, el barrio o sector, la ubicación geográfica de la propiedad (GPS), el tipo de propiedad, residencia o estancia y la distancia aproximada al cauce del río. La segunda sección tratará sobre la historia de la inundación, incluyendo preguntas sobre el número de eventos, años de mayor impacto, frecuencia de las inundaciones, nivel máximo de agua en el río e impacto de la inundación en la propiedad. La tercera sección tratará sobre el proceso de socavación e incluirá preguntas sobre la pérdida de terreno, la dirección de la erosión, la evolución del proceso de erosión y las obras de protección de la ribera.

Se utilizará la observación directa durante las excursiones de campo para verificar el estado físico del lecho del río, las riberas, las propiedades en las áreas de influencia, la erosión lateral, la pérdida de terreno, los depósitos sedimentarios y las obras de protección existentes. Esto permitirá comparar las respuestas dadas por los encuestados con la evidencia observada en el área de estudio y mejorará la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Además, se llevará a cabo una revisión de documentos técnicos mediante la recopilación y análisis de información hidrometeorológica, cartográfica, topográfica, normativa y bibliográfica sobre el comportamiento hidrológico e hidráulico de la cuenca del río Caluma. Esta información constituirá un insumo fundamental para complementar los datos obtenidos mediante las encuestas y la observación de campo, así como para sustentar el análisis técnico desarrollado en la investigación.

3.6. Procesamiento de la información y análisis estadístico:

La información obtenida mediante la aplicación de las encuestas será procesada utilizando estadística descriptiva, con el propósito de organizar, resumir e interpretar los datos recopilados durante el trabajo de campo. Según Gallardo Echenique, la estadística descriptiva constituye un conjunto de técnicas que permiten caracterizar, resumir y presentar la información mediante tablas, gráficos y medidas descriptivas, facilitando su interpretación y análisis [91].

En la presente investigación, los datos recolectados serán organizados en una matriz de información elaborada en una hoja de cálculo, en la que las respuestas serán clasificadas de acuerdo con variables como el barrio o sector, tipo de predio, tiempo de residencia, distancia al cauce del río, antecedentes de inundación, frecuencia de ocurrencia de eventos, nivel máximo alcanzado por el agua, grado de afectación, pérdida de terreno por socavación y existencia de obras de protección ribereña.

Luego se calcularán las frecuencias absolutas, las frecuencias relativas y los porcentajes para cada una de las variables mencionadas en el cuestionario. Los resultados se presentarán en tablas y representaciones gráficas y ayudarán a identificar patrones, tendencias y la distribución de los impactos causados por inundaciones, anegamientos y procesos de erosión en las propiedades ubicadas dentro del perímetro urbano ribereño del río Caluma.

Cuando la información disponible lo permita, los resultados obtenidos en las encuestas serán integrados con la ubicación geográfica de los predios mediante las coordenadas obtenidas con receptores GPS. Esta integración permitirá relacionar la información social recopilada durante el trabajo de campo con la cartografía temática generada mediante Sistemas de Información Geográfica, facilitando la comparación entre las

percepciones de los habitantes y las zonas susceptibles identificadas mediante el análisis hidrológico, la modelación hidráulica y el procesamiento geoespacial.

La integración de los resultados estadísticos con la información espacial contribuirá a fortalecer la interpretación de las condiciones de riesgo presentes en el área de estudio y permitirá validar, desde una perspectiva territorial, la delimitación de las zonas expuestas a procesos de inundación y socavación propuesta en la investigación.

De esta manera, el análisis de información permitirá interpretar los antecedentes de afectación reportados por los propietarios y complementar la delimitación de zonas de riesgo por socavación y crecidas del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos tras la aplicación del instrumento de recolección de información dirigido a los habitantes del casco urbano del cantón Caluma, con el propósito de conocer su percepción respecto a las condiciones del río Caluma, los eventos de crecida, inundación y posibles procesos de socavación que pueden afectar a las zonas cercanas al cauce. Para la recopilación de datos se empleó una encuesta estructurada, diseñada con preguntas orientadas a identificar el nivel de conocimiento de la población sobre los riesgos asociados al río, la existencia de afectaciones previas en viviendas, vías, puentes y márgenes.

Antes de aplicar el instrumento, se revisó el instrumento de investigación para asegurar la claridad, relevancia y conexión de los ítems con los objetivos de la investigación. De esta manera, se utilizaron las preguntas para obtener la información de la población que estaba asociada con el área de estudio. A partir de los resultados de la encuesta, se encontraron las principales percepciones de la población sobre la amenaza de inundaciones y erosión en el área urbana del cantón Caluma. Esta información permite complementar el análisis técnico de la investigación, incorporando la experiencia y observación de los habitantes.

4.1. Alcance del análisis.

El análisis estadístico se utiliza como evidencia complementaria para contrastar la hipótesis de investigación. La demostración física de causalidad y la delimitación definitiva de las zonas de riesgo requieren su integración con caudales de diseño, hidrogramas, niveles máximos, velocidades, profundidades de socavación y resultados de modelación HEC-RAS 2D en un entorno SIG.

4.2. Hipótesis de la investigación.

Hipótesis nula (H_0): No existe asociación estadísticamente significativa entre los indicadores del estado hidrológico e hidráulico de la cuenca, la socavación y la percepción de delimitación del riesgo en el casco urbano de Caluma.

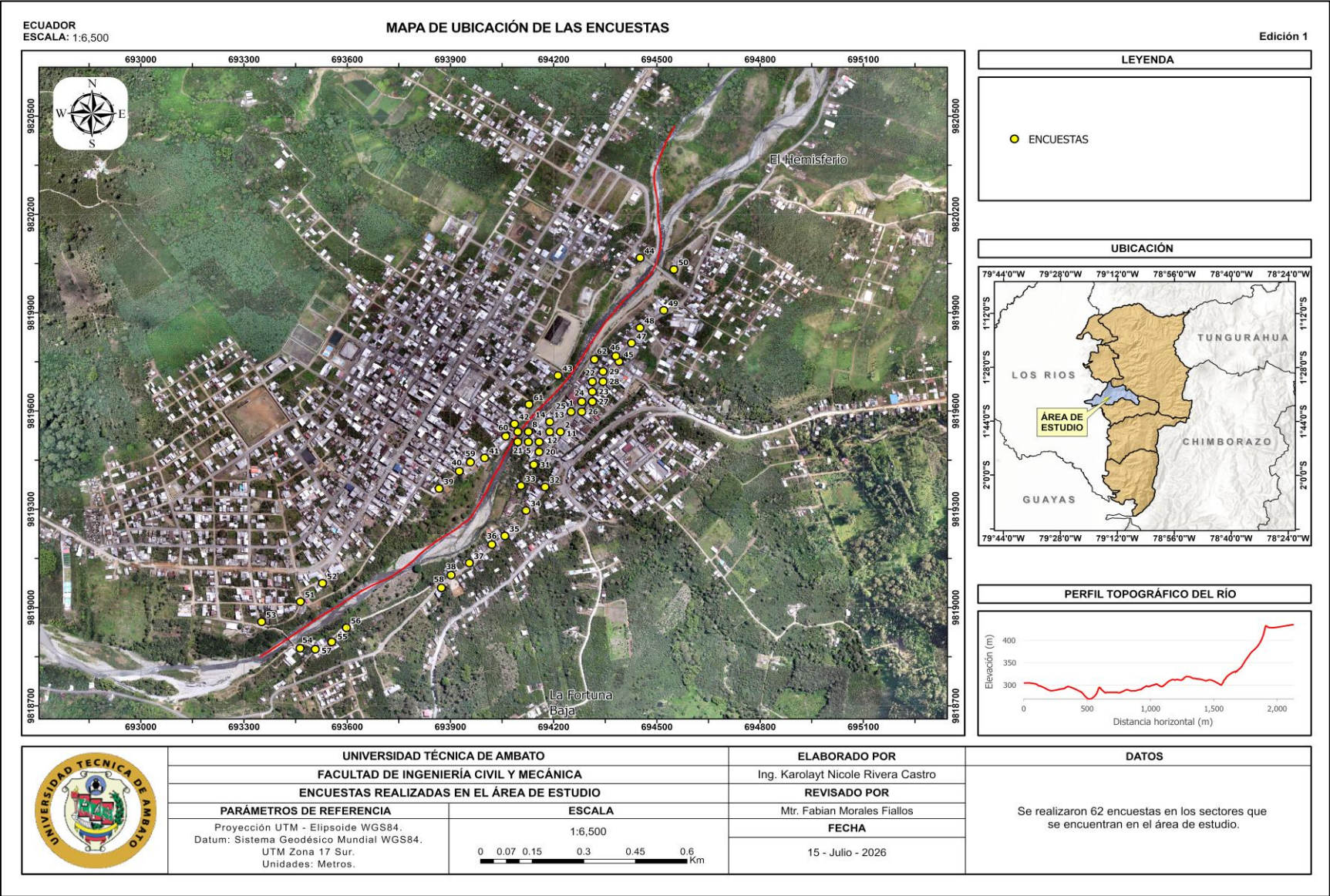
Hipótesis alternativa (H_1): Existe asociación estadísticamente significativa entre los indicadores del estado hidrológico e hidráulico de la cuenca, la socavación y la percepción de delimitación del riesgo en el casco urbano de Caluma.

La hipótesis en esta investigación se comprueba mediante el anexo B, correspondiente a la encuesta aplicada a los habitantes, dueños de los predios de los márgenes del río Caluma del cantón Caluma, en base a lo cual se determina lo siguiente:

Se rechaza H_0 para una relación específica cuando $p < 0,05$.

4.3. Mapa de ubicación de las encuestas realizadas a los habitantes.

Figura 13. Mapa de ubicación de los sitios encuestados.



Realizado por: Elaboración propia.

4.4 Base de datos obtenida de la encuesta.

La base de datos consistió en 62 observaciones de residentes de propiedades a lo largo de las orillas del río Caluma, en el cantón Caluma. La herramienta de recolección de datos utilizada en la investigación se muestra en el Apéndice D. Para el análisis estadístico, se consideraron las dimensiones de inundación, erosión, daño y percepción del riesgo de acuerdo con los objetivos de la investigación.

Los ítems de daño fueron tratados como variables dicotómicas, y las respuestas se tomaron como sí/no, y las preguntas sobre las otras dimensiones se organizaron en escalas ordinales.

TABLA 1. Procedimiento de análisis estadístico.

Procedimiento	Finalidad
Estadística descriptiva	Frecuencias, porcentajes, media, mediana, desviación estandar y rango.
Chi- Cuadrado de independencia	Contraste de asociación entre variables categóricas.
Prueba exacta de fisher	Verificación complementaria cuando existen frecuencias esperadas pequeñas.
V de Cramer / coeficiente phi	Medición de la magnitud de asociación.
Correlación de Spearman	Asociación monotónica entre variables ordinals sin asumir normalidad.
Alfa de Cronbach	Diagnóstico de consistencia interna por dimensión, sin forzar escalas heterogéneas.

Fuente: Elaboración propia

4.5 Resultados descriptivos consolidados:

4.5.1 Indicadores principales

TABLA 2. Indicadores principales.

Indicador	Frecuencia	Porcentaje
Experiencia de inundación (P7)	49 de 62	79,0 %
Evento registrado en 2023 (P8)	44 de 62	71,0 %
Intensidad alta de crecida: categorías 4–5 (P11)	51 de 62	82,3 %
Presencia de socavación: categoría 2 (P12)	34 de 62	54,8 %
Socavación en categoría 3 (P14)	37 de 62	59,7 %
Necesidad de acciones preventivas (P22)	62 de 62	100,0 %
Respuesta uniforme en P20	62 de 62	100,0 % en categoría 2

Fuente: Elaboración propia

La concentración de respuestas en categorías altas de crecida y la presencia mayoritaria de socavación evidencian una percepción consistente de amenaza hidrológica e hidráulica. El consenso observado en P22 respalda la necesidad de adoptar acciones preventivas y delimitar espacialmente el riesgo.

4.5.2 Estadísticos de variables ordinales.

TABLA 3. Variables Ordinales.

Variable	Media	Desv. estándar	Mediana	Rango
P9	2,258	0,676	2	1–4
P10	3,887	0,447	4	1–4
P11	4,355	1,073	5	1–5
P12	1,548	0,502	2	1–2
P13	1,468	0,646	1	1–3
P14	2,242	0,953	3	1–3
P15	1,161	0,371	1	1–2
P16	2,871	0,338	3	2–3
P18	1,355	0,603	1	1–3
P19	1,532	0,762	1	1–4

Fuente: Elaboración propia

P20 y P22 presentan varianza cero; por tanto, no pueden contribuir a correlaciones ni discriminar diferencias entre participantes. Estos ítems aportan evidencia descriptiva de consenso, pero deben reformularse en futuras aplicaciones para mejorar la capacidad analítica del instrumento.

4.5.3 Daños reportados.

TABLA 4. Variables Ordinales.

Tipo de afectación	Casos	Porcentaje
Columnas (P17_COL)	61	98,4 %
Alcantarillas (P17_ALC)	54	87,1 %
Vías (P17_VIAS)	53	85,5 %
Agua potable (P17_AP)	45	72,6 %
Pérdidas/afectaciones personales o prediales (P17_PER)	38	61,3 %
Agricultura o cultivos (P17_GRI)	16	25,8 %
Ningún daño (P17_NIN)	0	0,0 %

Fuente: Elaboración propia

El patrón de daños se concentra en infraestructura urbana y elementos próximos al cauce. La afectación de columnas, alcantarillas y vías es compatible con desbordamientos y procesos erosivos; sin embargo, su magnitud física debe validarse mediante inspección de campo y modelación hidráulica.

4.6 Resultados Inferenciales.

4.6.1 Intensidad de Crecida y presencia de socavación.

Para mejorar la estabilidad del contraste, P11 se agrupó en intensidad baja/moderada (categorías 1–3) y alta (categorías 4–5). P12 se trató como variable dicotómica de presencia de socavación.

TABLA 5. Intensidad de crecida y socavación.

Estadístico	Resultado
Chi-cuadrado con corrección de continuidad	$\chi^2 = 5,366$; gl = 1; p = 0,0205
Prueba exacta de Fisher	p = 0,0087
Coeficiente phi	$\phi = 0,294$; asociación cercana a moderada
Correlación de Spearman sin recodificar	$\rho = -0,436$; p = 0,0004

Fuente: Elaboración propia.

La relación es estadísticamente significativa. El signo negativo de Spearman corresponde al sentido numérico de la codificación de P12 y no representa una reducción física del socavamiento.

4.6.2 Intensidad de crecida y percepción de riesgo

TABLA 6. Intensidad de crecida y percepción de riesgo.

Estadístico	Resultado
Chi-cuadrado con corrección de continuidad	$\chi^2 = 5,864$; gl = 1; p = 0,0155
Prueba exacta de Fisher	p = 0,0097
Coeficiente phi	$\phi = 0,308$; asociación moderada
Correlación de Spearman P11–P18	$\rho = -0,627$; p < 0,001

Fuente: Elaboración propia

Se identifica una asociación significativa y de magnitud moderada a fuerte entre la intensidad de las crecidas y la percepción del riesgo. El signo depende del orden de codificación, mientras que la magnitud y la significancia muestran un patrón sistemático de respuesta.

4.6.3 Relaciones sin significancia estadística

TABLA 7. Resultados sin significancia estadística.

Relación	Resultado	Interpretación
P11 – P14	$\rho = -0,230$; $p = 0,0717$	Tendencia débil; no significativa al 5 %.
P14 – P18	$\rho = 0,155$; $p = 0,2283$	No se evidencia asociación monotónica significativa.
P12 – P18	$\chi^2 = 3,111$; $p = 0,2111$	No significativa en su forma categórica original.

Fuente: *Elaboración propia*

La hipótesis no debe sustentarse en una sola pregunta. Su valoración debe considerar el conjunto de evidencias significativas y la triangulación con resultados hidrológicos, hidráulicos y cartográficos.

Los resultados respaldan que el estado hidrológico e hidráulico está asociado con la socavación, los altos niveles de crecida y la necesidad de delimitar zonas de riesgo.

CAPÍTULO V

PROPUESTA

5.1. Título.

Propuesta técnica de zonificación preventiva para la gestión de zonas susceptibles a inundación, socavación y crecidas del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma, provincia Bolívar.

5.2. Descripción.

La presente propuesta consiste en la elaboración de una zonificación preventiva de las zonas susceptibles a crecidas, inundación y procesos de socavación del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma. Esta se desarrolló a partir de los resultados obtenidos en el análisis hidrológico, hidráulico y cartográfico, complementados con la información recopilada mediante observación de campo y encuestas aplicadas a propietarios de predios ribereños.

La propuesta no es un plan de implementación para obras, sino un resultado técnico de investigación. El objetivo es organizar los resultados obtenidos y traducirlos en criterios de zonificación, mapas de apoyo y directrices preventivas que permitan la interpretación de áreas con mayor susceptibilidad en la zona urbana cercana al cauce del río.

Desde el punto de vista hidrológico, la propuesta también examina la relación actual entre la precipitación, el escurrimiento, los aspectos fisiográficos de la cuenca y la generación de flujos de inundación. Estos componentes permiten comprender la respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos de precipitación y constituyen la base para la estimación de caudales de diseño utilizados en la modelación hidráulica. Aparicio Mijares señala que el análisis hidrológico permite estudiar el escurrimiento superficial y su relación con las características físicas de la cuenca, facilitando la comprensión de los procesos que intervienen en la transformación de la precipitación en escorrentía [45]. De manera complementaria, Linsley, Kohler y Paulhus indican que la respuesta hidrológica de una cuenca está condicionada por factores como la intensidad y duración de la lluvia, la topografía, la cobertura vegetal, las características del suelo y la humedad antecedente, los cuales determinan la magnitud y velocidad del escurrimiento generado [46].

Desde el enfoque hidráulico, la propuesta analiza el comportamiento del flujo en el cauce del río Caluma mediante la evaluación de variables como el tirante de agua, la velocidad del flujo, la pendiente longitudinal, la rugosidad del cauce y la geometría de la sección transversal. Estas variables permiten caracterizar la capacidad hidráulica del río, identificar sectores susceptibles a desbordamientos y evaluar los procesos de

erosión lateral y socavación asociados a eventos de crecida. Chow establece que el comportamiento del flujo en canales abiertos depende de la interacción entre la geometría de la sección hidráulica, la pendiente del cauce, la rugosidad y las condiciones del flujo, factores que determinan la distribución de velocidades, profundidades y esfuerzos cortantes sobre el lecho y las márgenes [94].

5.3. Justificación de la propuesta.

La propuesta se justifica por la necesidad de contar con una herramienta técnica que permita organizar e interpretar los resultados de la investigación respecto a las zonas susceptibles a crecidas y socavación del río Caluma. En el casco urbano del cantón existen predios, viviendas, vías e infraestructura cercanas al cauce, lo que incrementa la exposición frente a eventos de precipitación intensa y aumento del caudal.

El análisis hidrológico, el análisis hidráulico, el SIG, la observación de campo y las encuestas que hemos descubierto indican que no todos los sectores ribereños están en riesgo. Hay factores como la distancia al río, la topografía, las áreas bajas, el historial de inundaciones, la pérdida de tierras, la erosión de las orillas y la ausencia de protección de las riberas en un área particular, la pérdida de la línea costera y la presencia de flujos de agua.

Así que la propuesta permitirá integrar información técnica y de campo en una zonificación preventiva que es una forma de entender el riesgo del área ribereña. Su importancia radica en que transforma los resultados de la investigación en un producto técnico útil para la planificación territorial, la prevención y la toma de decisiones.

5.4. Descripción de los beneficiarios y responsables.

Los beneficiarios directos de la propuesta son los propietarios, arrendatarios y habitantes de los predios ubicados en el perímetro ribereño urbano del río Caluma, debido a que la zonificación permite reconocer sectores con mayor susceptibilidad a crecidas, inundación y socavación. También benefician a los técnicos del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Caluma, especialmente en términos de planificación territorial, gestión de riesgos, obras públicas, medio ambiente, avalúos y catastros, ya que la propuesta es una base técnica para interpretar el comportamiento del río y su relación con el entorno urbano.

La elaboración de la propuesta es gestionada por el investigador y dirigida por el director del trabajo de titulación. Además, la información aportada por los propietarios de predios ribereños mediante encuestas permitió complementar los resultados técnicos con antecedentes locales de inundación y pérdida de terreno.

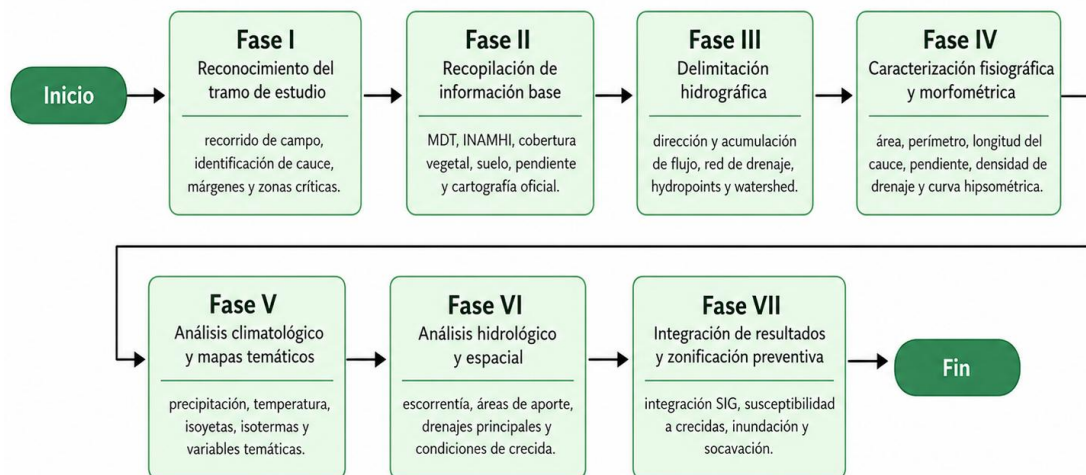
5.5. Desarrollo de la propuesta.

El desarrollo de la propuesta comprende los aspectos de relevancia que permitieron su elaboración, considerando fases, etapas, planificación, criterios técnicos, organización cartográfica y productos resultantes.

5.5.1. Metodología para la elaboración de la propuesta.

La propuesta fue elaborada mediante una metodología organizada en fases, basada en el análisis hidrológico, hidráulico y espacial del río Caluma. Este proceso permitió integrar información de campo, modelos digitales del terreno, datos hidrometeorológicos, delimitación hidrográfica, parámetros morfométricos y herramientas de Sistemas de Información Geográfica, con el fin de construir una zonificación preventiva de zonas susceptibles a socavación y crecidas en el casco urbano del cantón Caluma.

Figura 14. Esquema metodológico de la propuesta.



Realizado por: Elaboración propia.

Fase I: Reconocimiento del tramo de estudio.

Inicialmente, el reconocimiento de la parte urbana del río Caluma se realizó a través de encuestas de campo. Fue entonces cuando se identificaron las condiciones generales del cauce, las orillas, el relieve, la cobertura vegetal, las pendientes, el escurrimiento superficial, las áreas bajas, las propiedades ribereñas y la evidencia de impactos por inundaciones o procesos erosivos.

El trabajo de campo permitió la comparación de la información cartográfica con las condiciones reales del área de estudio en las regiones donde el cauce y las propiedades urbanas estaban más cerca entre sí.

Fase II: Recopilación de información base.

En esta fase se recopiló la información necesaria para el desarrollo del análisis hidrológico y espacial. Entre los principales insumos se consideraron modelos digitales del terreno con tamaño de celda de 4,5 m, información hidrometeorológica obtenida del INAMHI, cartografía de cobertura vegetal, tipo de suelo, textura, permeabilidad, pendientes y demás información oficial disponible.

Dicha información permite desarrollar la base técnica para el procesamiento cartográfico, la delimitación de las áreas contribuyentes y el análisis de las condiciones físicas de la cuenca.

Fase III: Delimitación hidrográfica.

La delimitación hidrográfica se llevó a cabo teniendo en cuenta el sistema de codificación Pfafstetter, que permite la organización de unidades de drenaje basadas en criterios topológicos y geomorfológicos. Este método facilita la identificación de áreas contribuyentes, canales principales, subcuencas y relaciones espaciales entre unidades hidrográficas. A partir de este modelo digital del terreno, se generaron productos como dirección de flujo, acumulación de flujo, red de drenaje, puntos hidrológicos y áreas contribuyentes a través de procesos tipo cuenca. Estos factores permitieron el estudio de la estructura hidrográfica de la cuenca y su relación con la parte urbana del río Caluma.

Fase IV: Caracterización fisiográfica y morfométrica.

Una vez realizada la delimitación hidrográfica, se determinaron los parámetros fisiográficos, geomorfológicos y de la red de drenaje de la cuenca del río Caluma. Para ello, se determinaron el área de la cuenca, el perímetro, la longitud del canal principal, la pendiente media, la densidad de drenaje y la curva hipsométrica, así como otros parámetros morfométricos que describen las características físicas del sistema hidrográfico. Utilizando estos indicadores, se caracterizó la estructura geomorfológica de la cuenca y se evaluó su influencia en la respuesta hidrológica a los eventos de precipitación. Las características morfométricas condicionan procesos como la concentración del escurrimiento, los tiempos de respuesta, la magnitud de los caudales de crecida y la dinámica del flujo superficial, constituyendo un insumo fundamental para la modelación hidrológica e hidráulica desarrollada en la presente investigación.

Las características físicas de una cuenca ejercen una influencia directa sobre la generación del escurrimiento superficial y el comportamiento de los caudales de crecida, razón por la cual su determinación constituye una etapa esencial dentro de los estudios hidrológicos orientados al diseño de obras hidráulicas y a la evaluación del riesgo por inundaciones [45].

Fase V: Análisis climatológico y elaboración de mapas temáticos.

En esta etapa, se elaboraron los mapas de distribución espacial de la precipitación y la temperatura a partir de los datos de lluvia y meteorológicos recopilados por las estaciones de monitoreo en la cuenca del río Caluma y sus alrededores. Para este propósito, se aplicaron técnicas de interpolación espacial en un Sistema de Información Geográfica para obtener superficies continuas de la precipitación y la temperatura, como isoietas e isotermas respectivamente, para caracterizar la variabilidad climática de la cuenca. La cobertura vegetal y el área, el uso y tipo de suelo, la permeabilidad del terreno y la pendiente del terreno, que son importantes en la infiltración, escorrentía y respuesta hidrológica de la cuenca, se incluyeron en estas capas de información para caracterizar el entorno y el análisis hidrológico antes del modelado hidráulico.

La respuesta hidrológica de una cuenca está condicionada por la interacción entre la intensidad y duración de la precipitación, la topografía, la cobertura del suelo, la humedad antecedente y las propiedades físicas del terreno, factores que controlan la generación del escurrimiento superficial y el comportamiento de los caudales de crecida [46]. En consecuencia, la integración de estas variables permitió disponer de una base técnica para la caracterización hidrológica de la cuenca del río Caluma y para el desarrollo de la modelación hidrológica e hidráulica orientada a la delimitación de zonas de riesgo por inundación y socavación.

Fase VI: Análisis hidrológico y espacial.

Utilizando la información recopilada en este proceso, se llevó a cabo un análisis hidrológico utilizando herramientas de análisis espacial. Esta fase nos permitió interpretar las condiciones de escorrentía superficial, las áreas contribuyentes, los principales sistemas de drenaje y las regiones con concentración de flujo hacia la sección urbana del río Caluma. El análisis hidrológico permitió la correlación de las características físicas de la cuenca con las condiciones de inundación y desarrollar insumos técnicos para determinar las áreas susceptibles.

Fase VII: Integración de resultados y zonificación preventiva.

Finalmente, se integró información hidrológica, hidráulica, geomorfológica, cartográfica y de campo con herramientas de SIG, lo que resultó en niveles de

susceptibilidad a inundaciones, anegamientos y erosión en el área urbana del cantón Caluma. A partir de esto, se desarrolló una zonificación preventiva para clasificar las áreas según sus niveles de susceptibilidad y desarrollar directrices técnicas a partir de los resultados. Por lo tanto, la propuesta se construyó como un producto de apoyo técnico para la interpretación de zonas de riesgo asociadas al río Caluma.

5.5.2. Información utilizada para elaborar la propuesta.

Para la elaboración de la propuesta se empleó información topográfica, cartográfica, hidrológica, hidráulica, geológica, geomorfológica y social. Entre los insumos principales se consideraron el modelo digital de elevación, cartografía base, red hidrográfica, delimitación de cuenca, pendientes, resultados de susceptibilidad, observaciones de campo, fotografías, encuestas aplicadas a propietarios de predios ribereños y antecedentes relacionados con crecidas del río Caluma.

Los datos geomorfológicos y geológicos fueron importantes para interpretar la susceptibilidad del entorno de la ribera, ya que los depósitos aluviales y coluvio-aluviales cerca del canal pueden ser más propensos a la erosión, el transporte de sedimentos y la inestabilidad durante eventos de inundación.

La información social recopilada a través de encuestas nos permitió incorporar impactos históricos, percepción del riesgo y evidencia de pérdida de tierras. Esta información ayudó a informar el análisis técnico y a fortalecer la interpretación territorial de la ribera.

5.5.3. Planificación utilizada para elaborar la propuesta.

La elaboración de la propuesta siguió una planificación ordenada, orientada a integrar los resultados obtenidos en el proceso investigativo. Esta planificación permitió pasar de la información inicial a la formulación de un producto técnico final.

TABLA 8. Planificación del proceso de elaboración de la propuesta.

Etapas	Actividad realizada	Producto Obtenido
1	Revisión de objetivos y posibles resultados de investigación	Identificación de la necesidad de una propuesta técnica de zonificación
2	Organización de información hidrológica, hidráulica, cartográfica y topográfica.	Base técnica inicial para la propuesta
3	Sistematización de encuestas y observaciones de campo	Información complementaria sobre afectaciones históricas y evidencias de socavación.
4	Delimitación hidrográfica, Caracterización fisiográfica y morfométrica, análisis climatológico y análisis hidrológico.	Datos necesarios para para clasificar zonas de riesgo.
5	Integración de información en SIG	Mapas de zonas susceptibles
6	Redacción final de la propuesta	Documento de propuesta técnica

Realizado por: Elaboración propia

5.5.4. Cronograma de elaboración de la propuesta.

El cronograma corresponde al proceso seguido para elaborar la propuesta dentro del desarrollo del trabajo de titulación. No representa un cronograma de implementación institucional, sino una secuencia de actividades realizadas para construir la propuesta técnica.

TABLA 9. Cronograma referencial de elaboración de la propuesta.

Actividad	Semana					
	1	2	3	4	5	6
Revisión de resultados del diagnóstico	X					
Organización de información de campo y encuestas	X	X				
Análisis de criterios de susceptibilidad		X	X			
Elaboración de mapas y base cartográfica			X	X		
Construcción de mapas de susceptibilidad				X	X	
Estructuración final de la propuesta					X	X

Realizado por: Elaboración propia

5.5.5. Recursos utilizados para la elaboración de la propuesta.

1. Se utilizaron recursos documentales, técnicos, tecnológicos y de campo.
2. Los recursos documentales incluyeron bibliografía en hidrología, hidráulica, sistemas de información geográfica, gestión de riesgos y estudios previos.
3. Los recursos técnicos incluyeron datos topográficos obtenidos en el campo, modelo digital de elevación, cartografía base, registros hidrometeorológicos disponibles, resultados de análisis hidrológicos, resultados de análisis hidráulicos, observaciones de campo y encuestas realizadas a propietarios de propiedades ribereñas.
4. Los recursos tecnológicos incluyeron computadora, software SIG, hojas de cálculo, herramientas de georreferenciación, imágenes satelitales y programas utilizados para organizar y representar la información.
5. Los recursos de campo incluyeron fichas de observación, registros fotográficos, coordenadas GPS, encuestas impresas y recorridos por el tramo urbano del río Caluma.

5.5.6. Producto final de la propuesta.

El producto final de la propuesta corresponde a una zonificación técnica preventiva de zonas susceptibles a crecidas, inundación y socavación del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma. Esta zonificación se encuentra acompañada de criterios de clasificación, base cartográfica, matrices de interpretación y lineamientos técnicos preventivos.

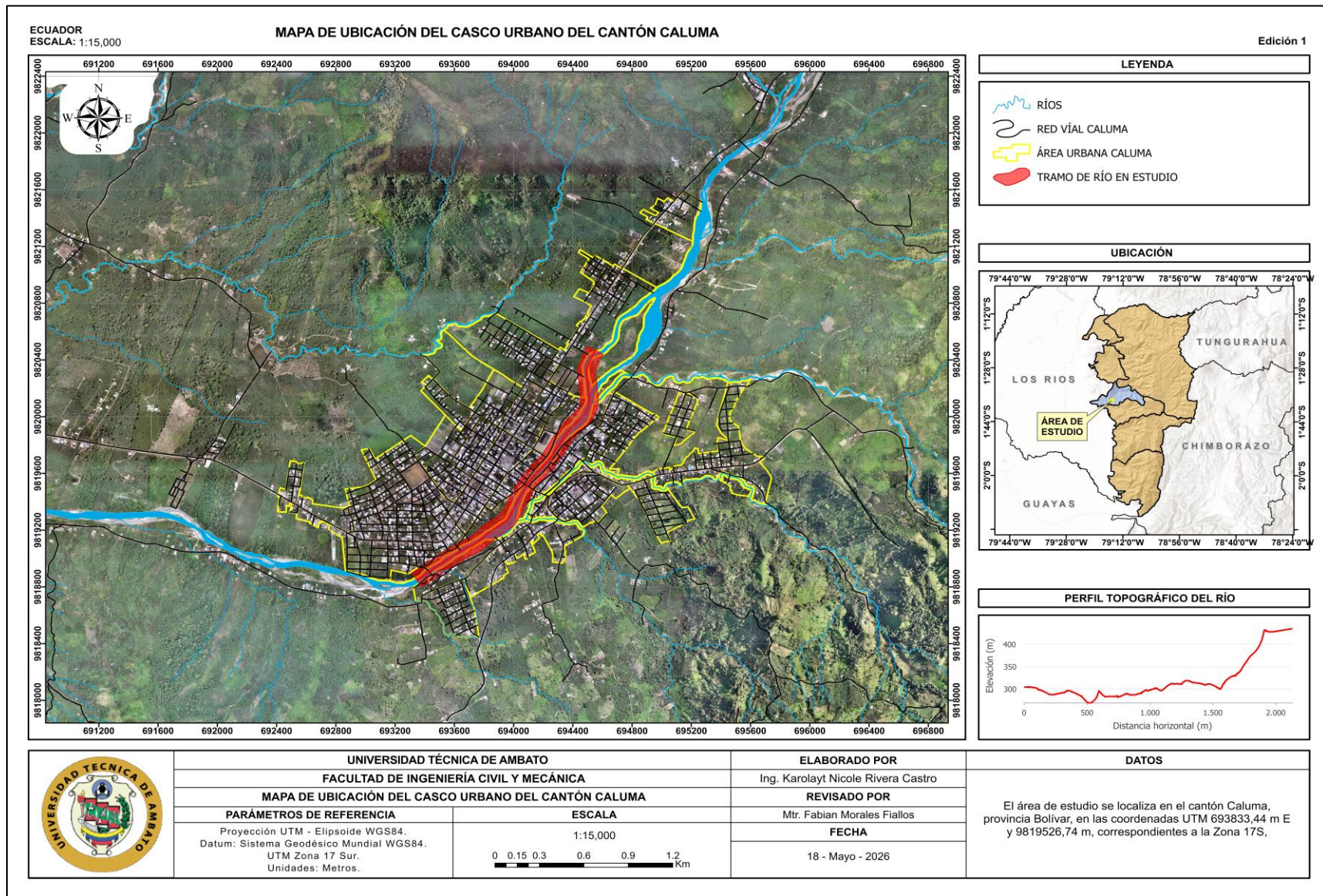
La propuesta permite identificar sectores con diferentes niveles de susceptibilidad y sintetiza los resultados obtenidos durante la investigación. De esta manera, el producto final no constituye una obra física ni un plan operativo de intervención, sino una herramienta técnica de apoyo para la comprensión del riesgo ribereño y la planificación territorial.

5.6. Zonificación preventiva para la gestión de zonas susceptibles a inundación, socavación y crecidas del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma.

5.6.1. Ubicación.

El área de estudio corresponde al casco urbano del cantón Caluma, ubicado en la provincia de Bolívar, Ecuador, en el sector occidental de la provincia, próximo al límite con la provincia de Los Ríos. El tramo analizado se desarrolla sobre el cauce del río Caluma, el cual atraviesa longitudinalmente el área urbana y presenta interacción directa con la red vial, zonas consolidadas y áreas ribereñas. Cartográficamente, el sitio se encuentra referenciado en el sistema de coordenadas UTM, Datum WGS84, Zona 17S, tomando como punto de referencia las coordenadas 693833,44 E y 9819526,74 N. Esta ubicación permite contextualizar espacialmente el análisis hidrológico e hidráulico, así como delimitar las zonas susceptibles a crecidas, inundación y procesos de socavación dentro del entorno urbano del cantón Caluma.

Figura 15. Mapa de ubicación del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.2. Geología.

El tramo del río analizado atraviesa longitudinalmente el casco urbano y se encuentra representado sobre depósitos recientes asociados a la dinámica fluvial, principalmente materiales aluviales, terrazas, abanicos aluviales y depósitos coluvio-aluviales. Estas unidades se localizan en las zonas bajas y próximas al cauce, por lo que tienen importancia directa en el análisis de crecidas, inundación, erosión lateral y socavación.

En el margen del área urbana, se observan unidades de ladera como depósitos coluviales y áreas de deslizamientos en el borde del territorio, que están relacionadas con la pendiente del terreno y la inestabilidad de las laderas y con las fuerzas gravitacionales. También se identifica la Formación Macuchi, una unidad geológica regional de origen volcánico-volcanosedimentario. Hay una falla geológica que cruza el sector en dirección suroeste-noreste. Esta geología indica que el área urbana de Caluma está en una zona de transición entre los depósitos fluviales recientes, materiales de ladera y los más antiguos de origen volcánico en la región, y debe considerarse al evaluar la situación de inundaciones y socavaciones.

Los depósitos aluviales representan materiales cuaternarios transportados por corrientes fluviales y que están compuestos principalmente de arcillas, limos, arenas y gravas. Estas unidades se ubican típicamente en áreas bajas y cerca de los cauces de los ríos, por lo que están directamente relacionadas con procesos de inundación, erosión lateral y socavación durante eventos de crecidas. Los depósitos aluviales se forman a partir de sedimentos transportados y depositados por corrientes fluviales, mientras que los depósitos coluviales se forman por el desprendimiento y acumulación de materiales en las laderas debido a la gravedad. Los depósitos aluviales están constituidos por sedimentos acarreados por los cuerpos de agua, mientras que los depósitos coluviales se forman por la acumulación de materiales provenientes de las pendientes adyacentes como consecuencia de la acción de la gravedad [95].

En el área de estudio también se identifican depósitos coluvio-aluviales, los cuales presentan un origen mixto al combinar materiales transportados por corrientes fluviales con aportes gravitacionales procedentes de las laderas circundantes. Estos depósitos adquieren especial importancia para el análisis de riesgo, debido a que durante eventos de precipitación intensa pueden aportar sedimentos al cauce, modificar localmente las condiciones hidráulicas y favorecer procesos de sedimentación o erosión. De acuerdo con el Instituto Espacial Ecuatoriano y el MAGAP-SINAGAP, los depósitos coluvio-aluviales se forman por la deposición conjunta de materiales transportados por corrientes fluviales y de sedimentos movilizados por procesos gravitacionales desde los relieves adyacentes [96].

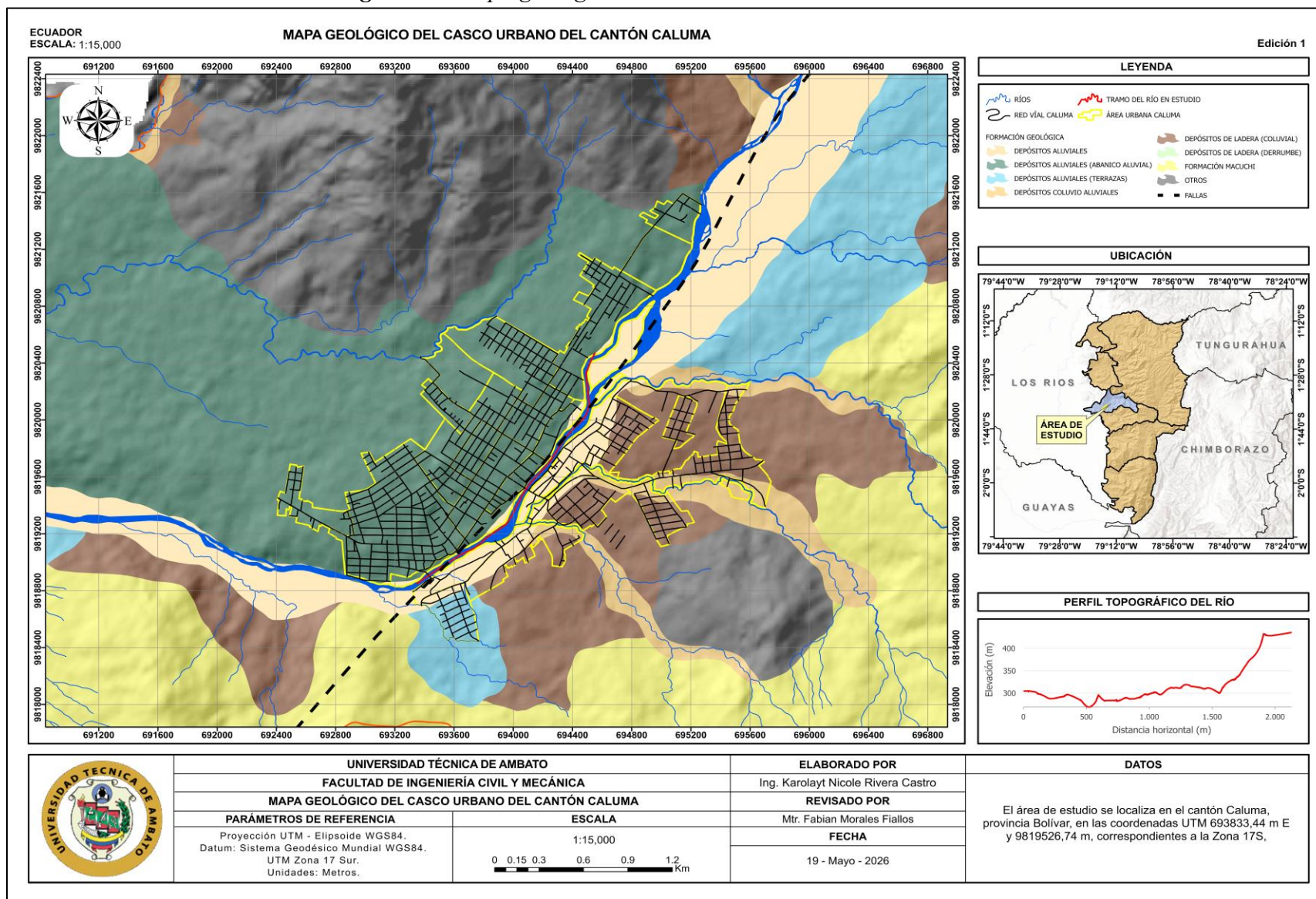
Las terrazas aluviales presentes en el entorno del río Caluma representan antiguos niveles de acumulación fluvial que han quedado elevados con respecto al cauce actual como consecuencia de procesos de incisión, erosión o cambios en la dinámica del río.

Páez Molineros señala que las terrazas de acumulación corresponden a depósitos aluviales preservados después de que el río abandona una fase de agradación e inicia procesos de incisión vertical, dejando superficies escalonadas respecto al cauce activo [97]. La identificación de estas geoformas permite interpretar la evolución geomorfológica del sistema fluvial y reconocer áreas potencialmente asociadas a eventos históricos de crecida.

Desde una perspectiva geológica, el área de estudio está dominada por la Formación Macuchi, una unidad que es ubicua en la Cordillera Occidental de Ecuador. Bustillos et al. describen la Unidad Macuchi como un basamento de composición basáltico-andesítica con afinidad de arco volcánico y que consiste en areniscas de origen volcánico, brechas, tobas, hialoclastitas, limolitas volcánicas, diabasas, basaltos subporfíricos y lavas almohadilladas [98]. De manera complementaria, se señala que el bloque Macuchi está constituido por rocas volcanosedimentarias y volcánicas de edad Paleoceno–Eoceno, asociadas con depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos de importancia regional [99].

La presencia de estructuras geológicas, materiales poco consolidados y depósitos de origen aluvial y coluvial son factores importantes para la estabilidad del terreno y la geomorfología del río Caluma. En lugares con pendientes pronunciadas, depósitos recientes y canales activos, pueden ocurrir procesos de erosión, remoción en masa, inestabilidad de márgenes y socavación asociada a inundaciones. Por lo tanto, la descripción geológica del área urbana de Caluma es necesaria para reforzar los estudios hidrológicos e hidráulicos de la cuenca, y para delinear áreas susceptibles a inundaciones, erosión fluvial y socavación.

Figura 16. Mapa geológico del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.3. Caracterizar la cuenca.

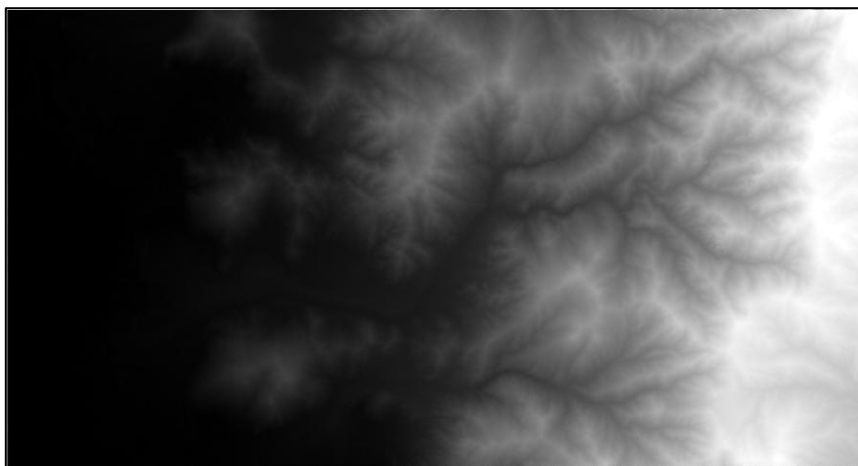
En cumplimiento del Objetivo Específico 1, orientado a caracterizar las condiciones físicas y ambientales de la cuenca del río Caluma, se desarrolla el análisis de ubicación, geología, información cartográfica, topográfica, delimitación hidrográfica, parámetros fisiográficos, geomorfológicos y sistema de drenaje. Estos elementos permitieron reconocer la configuración espacial de la cuenca, su relieve, red hídrica, unidades de drenaje y características territoriales que influyen en la generación de escorrentía y en la dinámica del río dentro del casco urbano.

5.6.3.1. Información cartográfica y topográfica.

Para cumplir con los objetivos propuestos, la base cartográfica y topográfica constituye un insumo fundamental, debido a que permite representar el relieve, delimitar la cuenca y analizar la dirección natural del escurrimiento superficial. En este proyecto se empleó un Modelo Digital del Terreno (MDT) con tamaño de celda de 4,5 m, complementado con información procesada en el software ArcGIS.

El MDT se utilizó como insumo principal para derivar la topografía de la cuenca y realizar el procesamiento hidrológico de superficies ráster. Este procedimiento requiere corregir depresiones espurias, calcular la dirección de flujo, estimar la acumulación de flujo y delimitar las áreas de drenaje. Según Esri (2024), la herramienta *Watershed* utiliza un ráster de dirección de flujo y puntos de salida para generar áreas de drenaje asociadas a cada punto de descarga. De igual manera, el método D8 permite asignar la dirección de flujo hacia la celda vecina de mayor pendiente descendente, lo que facilita la representación digital del comportamiento superficial del escurrimiento.

Figura 17. Modelo Digital del Terreno del Cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.3.2. Información hidrometeorológica.

Tratándose de un estudio orientado al análisis de crecidas, la información hidrometeorológica constituye un insumo esencial para estimar intensidades de lluvia, caudales de diseño y condiciones de escurrimiento. Para este propósito, se utilizó información proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), principalmente relacionada con intensidades máximas de precipitación. Según INAMHI (2019), las ecuaciones de intensidad permiten estimar lluvias máximas asociadas a diferentes duraciones y periodos de retorno, información necesaria para estudios hidrológicos y diseño de obras hidráulicas.

5.6.3.2.1. Caracterización climatológica.

El clima en el Ecuador está condicionado por varios factores físicos y atmosféricos, entre ellos la ubicación ecuatorial, el relieve andino, la circulación atmosférica general, la influencia de masas de aire locales y las corrientes oceánicas del Pacífico. Pourrut (1983) señala que la diversidad climática del Ecuador responde a la combinación entre circulación atmosférica, relieve y condiciones oceánicas, lo que genera importantes variaciones espaciales de precipitación y temperatura.

En este sentido, la caracterización climatológica permite comprender las condiciones generales que influyen en la generación de lluvias, escurrimiento y variabilidad hidrológica dentro de una cuenca. Además, permite identificar la relación entre precipitación, temperatura, relieve y masas de aire, elementos que intervienen directamente en el comportamiento hidrometeorológico de una zona de estudio.

5.6.3.2.2. La circulación atmosférica general.

El Ecuador se ubica dentro de la franja ecuatorial, caracterizada por temperaturas elevadas, alta humedad y presencia de bajas presiones atmosféricas. En esta zona se produce el encuentro de masas de aire procedentes de ambos hemisferios, fenómeno relacionado con la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Según Portilla Farfán los patrones de precipitación en el Ecuador están influenciados por las oscilaciones de la ZCIT, la cual se asocia con la convergencia de masas de aire y con la presencia de bajas presiones en la región ecuatorial. [115]

Las masas de aire procedentes de los hemisferios norte y sur entran en contacto y generan una zona de inestabilidad atmosférica, favoreciendo procesos de ascenso, condensación y precipitación. El desplazamiento estacional de esta franja de convergencia influye en la distribución temporal de las lluvias, especialmente en la región litoral y en zonas de transición hacia la cordillera. De esta manera, la circulación

atmosférica general constituye un factor importante para comprender la variabilidad climática e hidrológica del territorio ecuatoriano.

5.6.3.2.3. Las masas de aire locales.

Debido al relieve contrastado del Ecuador, las masas de aire locales presentan distintas propiedades de humedad, temperatura y dirección de desplazamiento. Las masas de aire cálido de origen oceánico se localizan sobre el Pacífico, contienen alta humedad y se desplazan hacia el continente; al interactuar con las estribaciones de la Cordillera Occidental, pueden ascender, enfriarse y generar condensación y precipitación. Pourrut indica que las condiciones oceánicas y el relieve andino influyen directamente en la distribución climática del país, especialmente por el efecto orográfico que modifica la humedad y la precipitación. [114]

También existen masas de aire cálido de origen continental, localizadas principalmente sobre la región Amazónica. Estas pueden descargar humedad en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes y, en ciertos casos, influir sobre zonas interandinas. Finalmente, las masas de aire frío se localizan en zonas altas, cumbres montañosas y sectores de mayor altitud, donde las bajas temperaturas y la humedad favorecen condiciones de nubosidad, neblina o precipitación débil. En conjunto, estas masas de aire permiten explicar parte de la variabilidad climática que se presenta en las cuencas hidrográficas del Ecuador.

5.6.4. Delimitación hidrográfica.

La delimitación de la cuenca hidrográfica se realizó mediante el uso de ArcGIS y sus herramientas de análisis hidrológico, empleando como insumo base el Modelo Digital del Terreno (MDT). Este procedimiento permitió representar digitalmente la dirección natural del escurrimiento superficial, identificar la red de drenaje, definir puntos de descarga y establecer las unidades de aporte que conforman la cuenca de estudio.

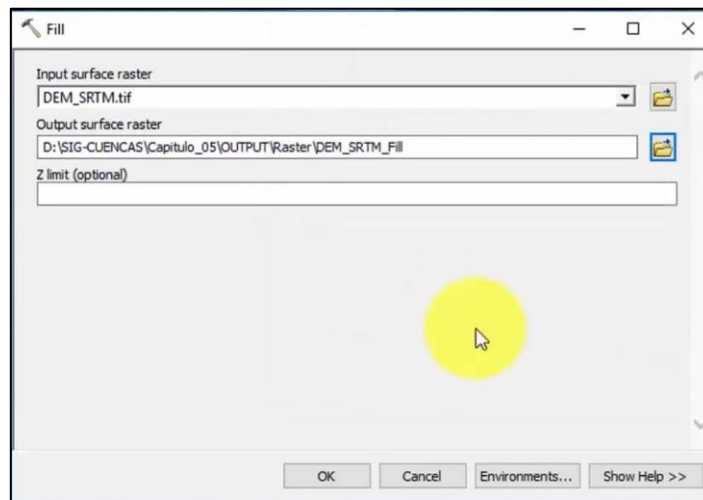
5.6.4.1. Modelo anatómico de superficie.

La delimitación de la cuenca se desarrolló mediante herramientas de análisis espacial orientadas a hidrología, utilizando el MDT como superficie base. A partir de este insumo se generaron capas de dirección de flujo, acumulación de flujo, puntos de descarga, red hídrica y unidades de drenaje. Según Esri, las herramientas hidrológicas permiten modelar el flujo del agua sobre una superficie, identificar depresiones, calcular dirección y acumulación de flujo, delinear cuencas y generar redes de drenaje a partir de Modelos Digitales de Elevación. [57]

Para organizar jerárquicamente las unidades de aporte se consideró el enfoque de codificación Pfafstetter, el cual permite asignar códigos a cuencas y subcuencas de acuerdo con su ubicación y función dentro de la red hidrográfica. Ponce señala que el sistema Pfafstetter describe la anatomía regional de una red de drenaje mediante una organización jerárquica de dígitos, facilitando la identificación de subcuencas procesadas mediante Sistemas de Información Geográfica. [116]

En primer lugar, se realizó el relleno de sumideros del DEM mediante la herramienta *Fill*, con el propósito de corregir depresiones espurias o imperfecciones del ráster que podrían interrumpir artificialmente el flujo superficial. Este paso es importante porque permite obtener una superficie hidrológicamente continua para los cálculos posteriores.

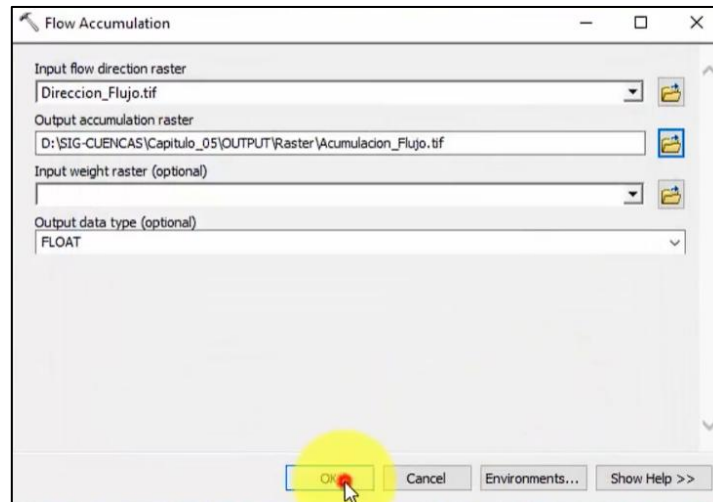
Figura 18. Relleno de sumideros del DEM mediante la herramienta *Fill*.



Realizado por: *Elaboración propia.*

Posteriormente, se calculó la dirección de flujo y la acumulación de flujo. La dirección de flujo permite identificar hacia qué celda vecina se desplaza el agua de acuerdo con la pendiente de la superficie, mientras que la acumulación de flujo determina la cantidad de celdas que aportan escurrimiento hacia cada celda del ráster. De acuerdo con Esri, la herramienta *Flow Accumulation* calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen hacia cada celda descendente. [57]

Figura 19. Cálculo de acumulación de flujo mediante ArcGIS.



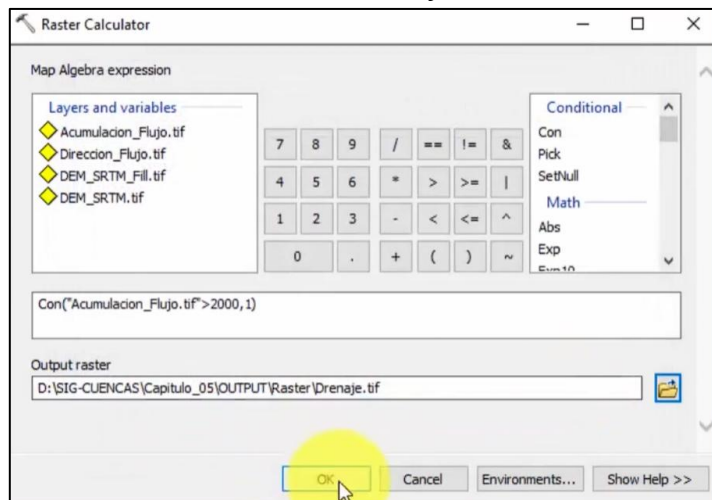
Realizado por: Elaboración propia.

Una vez obtenida la acumulación de flujo, se aplicó la calculadora ráster para extraer la red de drenaje, utilizando un valor umbral que permite seleccionar las celdas con mayor acumulación. Este procedimiento permite diferenciar las zonas donde se concentra el escurrimiento y generar una red de arroyos o cauces a partir del ráster de acumulación. En el presente caso, se empleó la expresión condicional:

`Con("Acumulacion_Flujo.tif" > 1000, 1)`

Con esta expresión se seleccionaron las celdas cuyo valor de acumulación de flujo supera el umbral establecido, asignándoles el valor de 1 para representar la red de drenaje resultante.

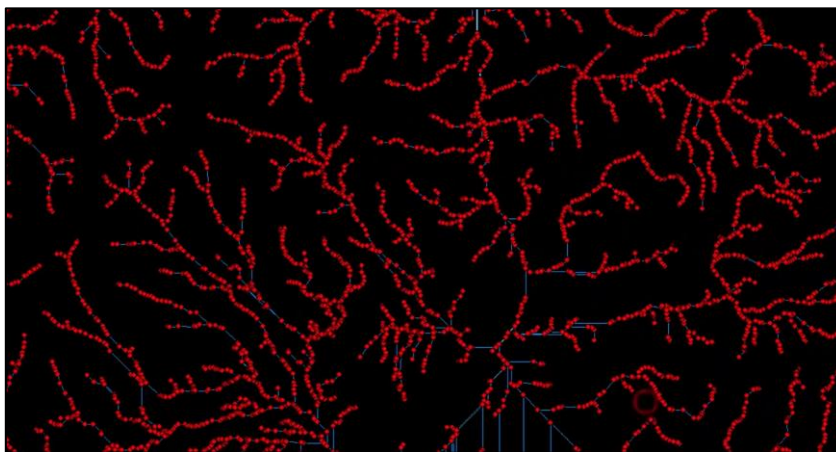
Figura 20. Extracción de la red de drenaje mediante calculadora ráster.



Realizado por: Elaboración propia.

Finalmente, se procedió a la delimitación de la cuenca mediante la herramienta *Watershed* del conjunto de herramientas hidrológicas de ArcGIS, empleando como insumos principales el ráster de dirección de flujo y los puntos de descarga o puntos de aforo. Según Esri, la herramienta *Watershed* delimita el área contribuyente aguas arriba de un punto de salida, utilizando previamente un ráster de dirección de flujo generado a partir de un Modelo Digital de Elevación. [57]

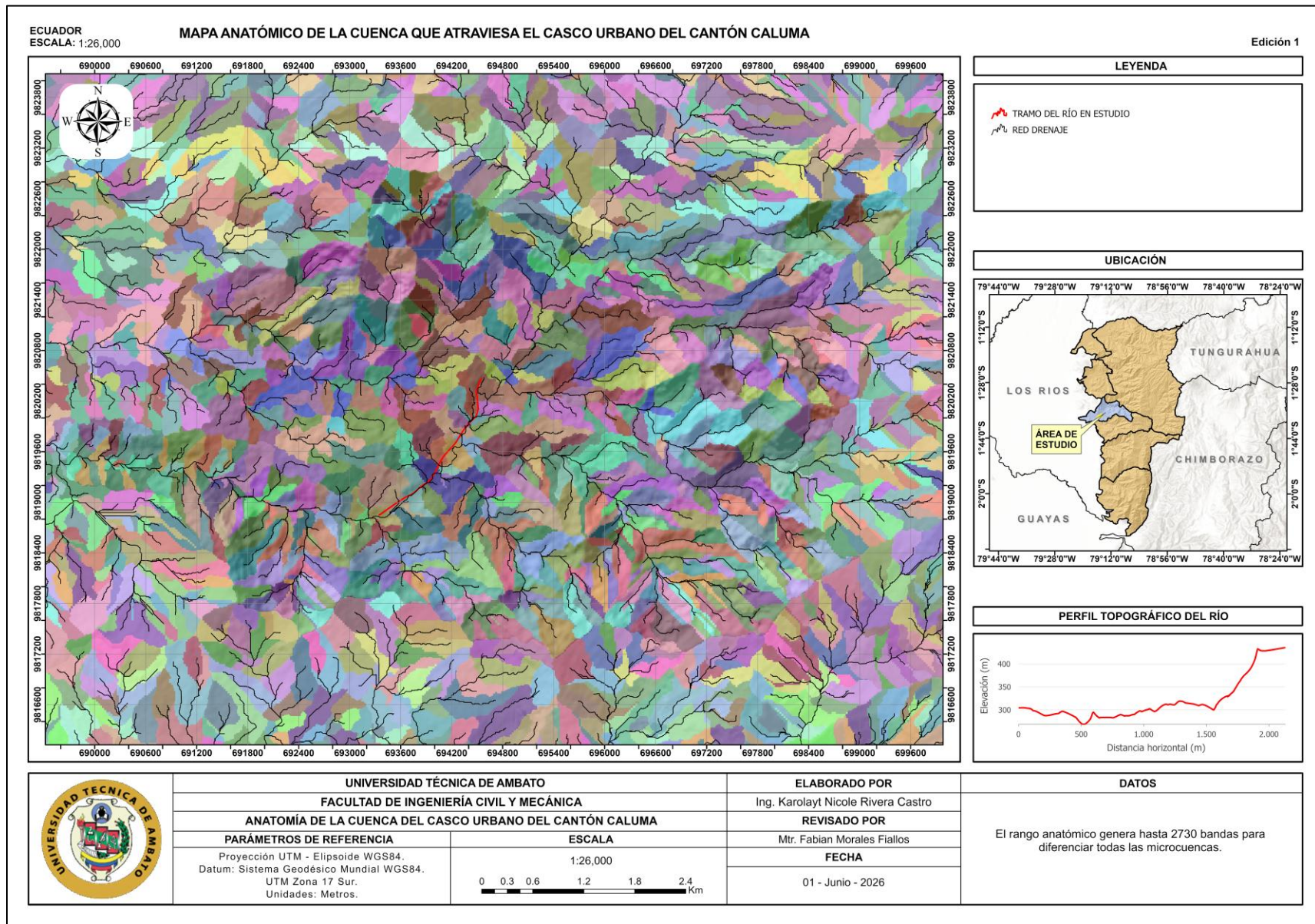
Figura 21. Identificación de puntos de aforo para la delimitación del drenaje.



Realizado por: Elaboración propia.

Con este procedimiento se obtuvo el modelo anatómico de superficie, a partir del cual fue posible identificar las microcuencas y unidades de drenaje asociadas al área de estudio.

Figura 22. Mapa del modelo anatómico de la superficie.

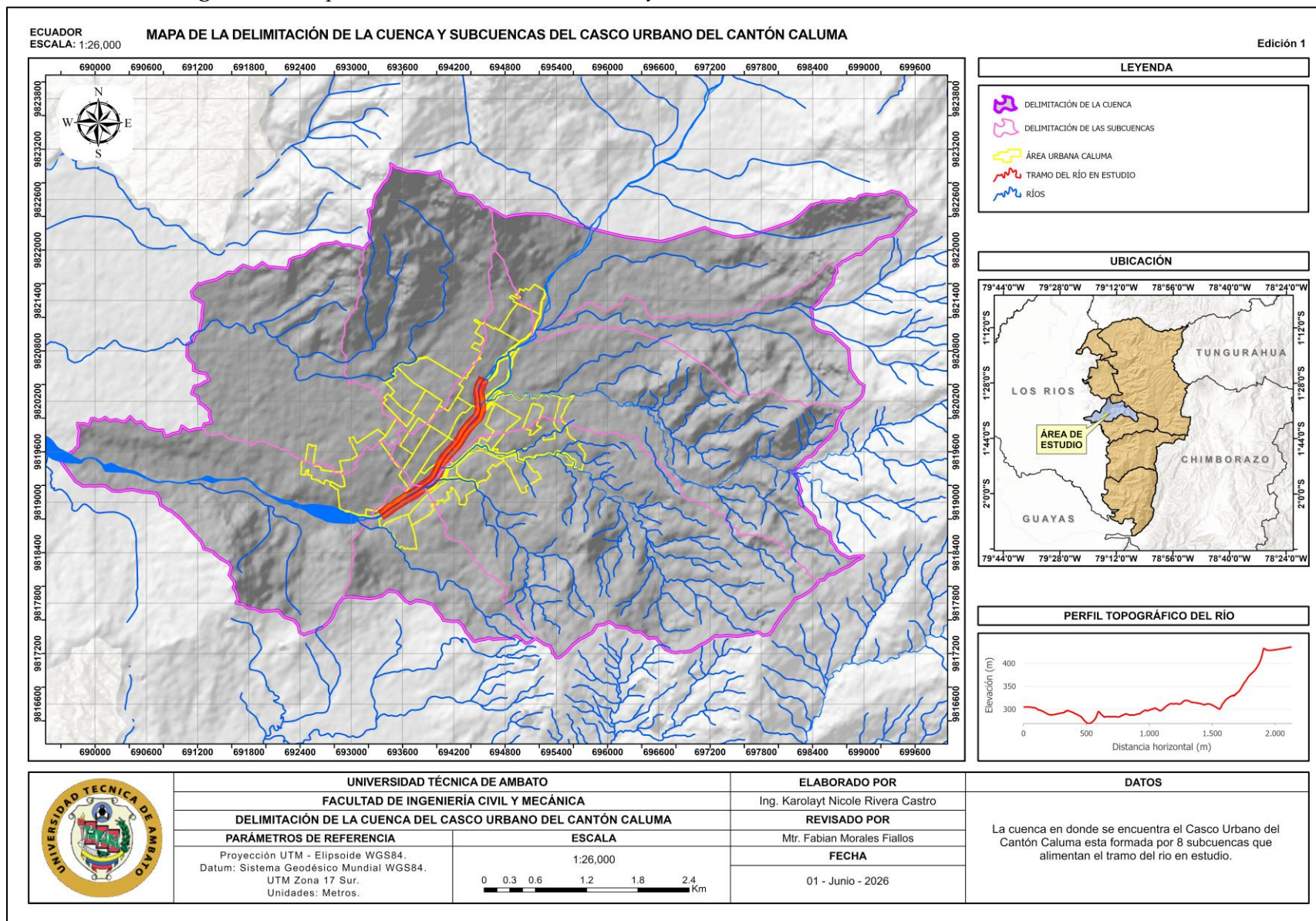


Realizado por: Elaboración propia.

A continuación, se determinó la cuenca principal correspondiente al área de estudio y posteriormente se transformó a formato vectorial para facilitar su representación cartográfica y análisis espacial.

La última delimitación permitió el establecimiento de la cuenca que alimenta el río en estudio en la ciudad del cantón Caluma. Como resultado, se obtuvo la cuenca principal con un área de 36.29 km² y se formaron ocho subcuencas relacionadas con la sección del río estudiada. Esta delimitación forma la base para los cálculos hidrológicos y permite definir el área de contribución, la red de drenaje y las unidades espaciales en las que tiene lugar la escorrentía superficial.

Figura 23. Mapa de delimitación de la cuenca y subcuencas del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.5. Caracterización fisiográfica y morfométrica.

5.6.5.1. Parámetros fisiográficos de la cuenca.

A continuación, se calcularon los parámetros fisiográficos de la cuenca, los cuales permiten caracterizar cuantitativamente su forma, dimensiones y configuración espacial. Entre los principales parámetros considerados se encuentran el área, perímetro, longitud, ancho medio, factor de forma e índice de compacidad, variables fundamentales para interpretar la respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos de precipitación.

Estas características influyen en la concentración del escurrimiento superficial, el tiempo de respuesta de la cuenca y la configuración del hidrograma resultante. De acuerdo con Linsley, Kohler y Paulhus, la forma y las características físicas de una cuenca inciden directamente en los hidrogramas de escorrentía y en la magnitud de los caudales máximos generados durante los eventos de lluvia [46].

En consecuencia, el análisis de estos parámetros permitió evaluar la influencia de la geometría y configuración espacial de la cuenca del río Caluma sobre la concentración de los aportes hídricos y la generación de caudales de crecida, constituyendo un insumo fundamental para el análisis hidrológico y la posterior modelación hidráulica del cauce.

5.6.5.1.1. Área de la cuenca (A).

El área de la cuenca hidrográfica corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas, dentro de la cual las precipitaciones son captadas y conducidas hacia un mismo punto de salida a través de una red de drenaje conformada por cauces principales, tributarios y quebradas. Este parámetro constituye uno de los indicadores morfométricos fundamentales, ya que representa la superficie efectiva de captación de agua y condiciona la magnitud del escurrimiento generado durante los eventos de precipitación. De acuerdo con Aparicio Mijares, toda corriente posee una cuenca de aportación delimitada por el parteaguas, entendido como la línea que separa las aguas que drenan hacia una determinada corriente de aquellas que escurren hacia cuencas vecinas [45].

Para la determinación de este parámetro se emplearon las herramientas de análisis hidrológico del software ArcGIS, utilizando como insumo un Modelo Digital de Elevación (MDE) previamente procesado. A partir de la delimitación automática de la cuenca se obtuvo un área de 36,29 km², la cual representa la superficie total de aporte hacia el punto de salida definido para el estudio.

El área calculada constituye el parámetro base para la determinación de los demás indicadores morfométricos, tales como el factor de forma, el índice de compacidad, la densidad de drenaje y el ancho medio de la cuenca. Asimismo, este valor es un insumo indispensable para los análisis hidrológicos posteriores, incluyendo la estimación de la

escorrentía, el cálculo de caudales de diseño y la modelación hidráulica utilizada para la delimitación de las zonas susceptibles a inundación y socavación en el río Caluma.

5.6.5.1.2. Perímetro De La Cuenca (P).

El perímetro de la cuenca hidrográfica corresponde a la longitud de la línea divisoria de aguas que conforma el contorno externo del área drenada. Este parámetro, en conjunto con el área de la cuenca, permite interpretar su configuración geométrica, diferenciando si presenta una forma alargada, compacta o irregular, características que influyen en la concentración del escurrimiento y en la respuesta hidrológica frente a eventos de precipitación.

El perímetro se define como la longitud del parteaguas proyectado horizontalmente y generalmente se expresa en kilómetros [53]. Este parámetro constituye la base para el cálculo de índices morfométricos como el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, ampliamente utilizado para evaluar la forma de una cuenca hidrográfica.

En la presente investigación, el perímetro de la cuenca fue determinado mediante las herramientas de análisis hidrológico de ArcGIS, utilizando la delimitación de la divisoria de aguas obtenida a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). El valor calculado permitió complementar la caracterización fisiográfica de la cuenca del río Caluma y sirvió como insumo para el cálculo de los índices morfométricos empleados en el análisis hidrológico y en la interpretación de la respuesta de la cuenca frente a eventos de crecida.

5.6.5.1.3. Longitud De Cuenca (L).

La longitud de la cuenca corresponde a la distancia medida desde el punto de salida o desagüe hasta el punto más alejado de la cuenca, siguiendo la dirección general del cauce principal o del eje de drenaje. Este parámetro morfométrico es de gran importancia debido a su influencia sobre el tiempo de concentración, la velocidad de respuesta hidrológica y la configuración del hidrograma generado durante los eventos de precipitación. Las dimensiones y la forma de una cuenca guardan una relación directa con la respuesta hidrológica y con la magnitud de los caudales máximos que pueden generarse [46].

En la presente investigación, la longitud de la cuenca fue determinada mediante herramientas de análisis espacial en ArcGIS, obteniéndose un valor de 9,00 km, mientras que la longitud del cauce principal corresponde a 8,00 km. Estos resultados demuestran una red de drenaje estructurada alrededor de un eje de flujo principal, una

condición que influye en la concentración de aportes superficiales y el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Caluma.

La longitud de la cuenca es también un parámetro fundamental para calcular varios índices morfométricos, como el factor de forma, el ancho promedio y el tiempo de concentración, siendo un insumo esencial para la estimación de caudales de diseño y el desarrollo de modelos hidrológicos e hidráulicos.

5.6.5.1.4. Ancho de Cuenca (W).

El ancho medio de la cuenca corresponde a la relación entre el área total de drenaje y la longitud principal de la cuenca. Este parámetro morfométrico permite representar de manera simplificada la amplitud promedio de la cuenca y complementa el análisis de su configuración geométrica, proporcionando información sobre la distribución espacial del área de drenaje respecto al eje principal de escurrimiento.

El ancho medio puede determinarse mediante la relación entre el área de la cuenca y su longitud principal [65]. Este parámetro, junto con el área, el perímetro y la longitud de la cuenca, permite interpretar la forma general de la unidad hidrográfica y constituye un insumo para el cálculo de otros índices morfométricos relacionados con la respuesta hidrológica de la cuenca.

La fórmula empleada es:

$$W = A / L \quad (3)$$

Donde:

W = ancho de cuenca

A = área de la cuenca

L = longitud de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$W = 36,29 \text{ km}^2 / 9,00 \text{ km}$$

$$W = \mathbf{4,03 \text{ km}}$$

Por lo tanto, el ancho medio de la cuenca es de **4,03 km**.

5.6.5.1.5. Factor de Forma (FT).

El factor de forma es un parámetro morfométrico que permite evaluar el grado de elongación o ensanchamiento de una cuenca hidrográfica. Este índice se expresa como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de su longitud principal,

constituyendo un indicador de la configuración geométrica de la cuenca y de su influencia sobre la respuesta hidrológica [65]. La fórmula empleada es:

$$F_t = A / L^2 \quad (4)$$

Donde:

F_t = factor de forma

A = área de la cuenca

L = longitud de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$F_t = 36,29 \text{ km}^2 / (9,00 \text{ km})^2$$

$$F_t = 36,29 / 81$$

$$F_t = \mathbf{0,45}$$

El factor de forma obtenido es de 0,45, lo cual indica que la cuenca presenta una tendencia alargada. En cuencas con formas alargadas, los aportes de escorrentía suelen llegar al cauce principal en tiempos más diferenciados, a diferencia de las cuencas más circulares, donde existe mayor posibilidad de concentración simultánea de caudales.

5.6.5.1.6. Índice de compacidad.

El índice de compacidad, también denominado coeficiente de Gravelius, es un parámetro morfométrico que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de una circunferencia de igual área. Este índice permite estimar el grado de compactación de la cuenca comparando la configuración real con la de una cuenca ideal de forma circular y es uno de los indicadores más utilizados para describir la geometría de las cuencas hidrográficas [53].

Valores del coeficiente cercanos a uno indican cuencas más compactas o aproximadamente circulares, mientras que valores mayores muestran cuencas alargadas o con contornos irregulares. La forma de la cuenca influye directamente en la concentración del escurrimiento superficial y en el tiempo de respuesta hidrológica, por lo que este parámetro resulta de especial interés para la interpretación del comportamiento de los caudales de crecida.

La fórmula empleada es:

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (5)$$

Donde:

K_c = índice de compacidad

P = perímetro de la cuenca

A = área de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$K_c = 0,28 \cdot 33,00 / \sqrt{36,29}$$

$$K_c = 9,24 / 6,02$$

$$K_c = \mathbf{1,53}$$

El índice de compacidad obtenido para la cuenca del río Caluma es de 1,53, valor que indica que la cuenca presenta una configuración moderadamente alargada e irregular, alejándose de una geometría circular ideal. Esta condición geométrica influye en la forma en que el escurrimiento superficial se concentra y se propaga hacia el punto de salida de la cuenca.

La forma de una cuenca constituye un factor determinante en su respuesta hidrológica, debido a que condiciona la distribución temporal de los aportes de esorrentía y, en consecuencia, la configuración del hidrograma y la magnitud de los caudales máximos generados durante eventos de precipitación [46]. En cuencas con un coeficiente de compacidad mayor que uno, las contribuciones de los diferentes sectores tienden a llegar al canal principal en diferentes momentos. Se espera una concentración de flujo menos uniforme en una geometría más compacta.

Por lo tanto, el valor obtenido indica que la cuenca del río Caluma tiene una respuesta hidrológica con respecto a su configuración geométrica y la distribución espacial de la red de drenaje. No obstante, la concentración del escurrimiento también dependerá de otros factores, como la intensidad y distribución de la precipitación, la pendiente del terreno, la cobertura vegetal, las características del suelo y la organización del sistema de drenaje, variables consideradas en el análisis hidrológico desarrollado en la presente investigación [46].

TABLA 10. Tabla resumen de cálculos de parámetros fisiográficos de la cuenca.

Parámetros Fisiográficos de la Cuenca			
Item	Parámetros	Cantidad	Unidad
1	Área	36.29	km ²
2	Perímetro	33.00	km
3	Longitud de Cuenca	9.00	km
4	Ancho	4.03	km
5	Longitud del Rio Principal	8.00	km
6	Factor de Forma	0.45	
7	Indice de Compacidad	1.53	

Realizado por: *Elaboración propia.*

Finalmente, los parámetros fisiográficos se calcularon utilizando herramientas de ArcGIS y operaciones complementarias en Excel. Los resultados obtenidos nos permiten concluir que la cuenca tiene un área de 36.29 km², una longitud principal de 9.00 km y un factor de forma de 0.45, lo que indica una forma alargada. De manera similar, el índice de compacidad de 1.53 muestra que la cuenca tiene una forma moderadamente irregular; esta forma influye en la manera en que el escurrimiento se concentra hacia el canal principal a través del área urbana. Esta condición confirma la importancia de analizar el tramo urbano no como un elemento aislado, sino como receptor de los procesos hidrológicos generados en toda el área de aporte.

5.6.5.2. Parámetros geomorfológicos de la cuenca.

Los parámetros geomorfológicos se pueden utilizar para determinar la configuración del terreno, la distribución altitudinal y la organización espacial de la tierra dentro de una cuenca hidrográfica. Esta información es necesaria para entender cómo la elevación, la pendiente y la forma del terreno afectan los procesos de infiltración, la generación de escorrentía, la concentración del flujo y la respuesta hidrológica a la precipitación.

La caracterización geomorfológica proporciona información sobre la distribución de las áreas de aporte y la variación del relieve, aspectos que condicionan la velocidad del escurrimiento superficial, los tiempos de concentración y la formación de caudales de crecida. Cuando los procesos hidrológicos dependen de la elevación, es necesario

analizar la distribución del área de la cuenca en función de la altitud mediante curvas área-elevación o curvas hipsométricas, las cuales constituyen herramientas fundamentales para interpretar la organización del relieve y su influencia sobre el comportamiento hidrológico [46].

5.6.5.2.1. Altitud media de la cuenca (HM).

La altitud media de la cuenca corresponde al valor promedio ponderado de las elevaciones existentes dentro del área de drenaje y constituye uno de los principales parámetros geomorfológicos para la caracterización del relieve. Este indicador adquiere especial importancia en cuencas montañosas, debido a que la elevación influye directamente sobre variables climáticas como la temperatura, la precipitación, la evapotranspiración y, en consecuencia, sobre la generación de escorrentía y el comportamiento hidrológico de la cuenca. En regiones de relieve elevado, diversos procesos hidrológicos presentan variaciones asociadas a la altitud, por lo que resulta necesario considerar la distribución altitudinal del área de drenaje durante el análisis hidrológico [46]. La altitud media permite representar de manera integrada la distribución vertical del territorio y constituye un parámetro de referencia para la interpretación de las condiciones climáticas e hidrológicas predominantes dentro de la cuenca.

La expresión utilizada es:

$$H_m = \frac{\sum h_i * S_i}{A} \quad (6)$$

Donde:

H_m = altitud media de la cuenca

h_i = altitud media de cada intervalo altitudinal

S_i = área parcial correspondiente a cada intervalo

A = área total de la cuenca

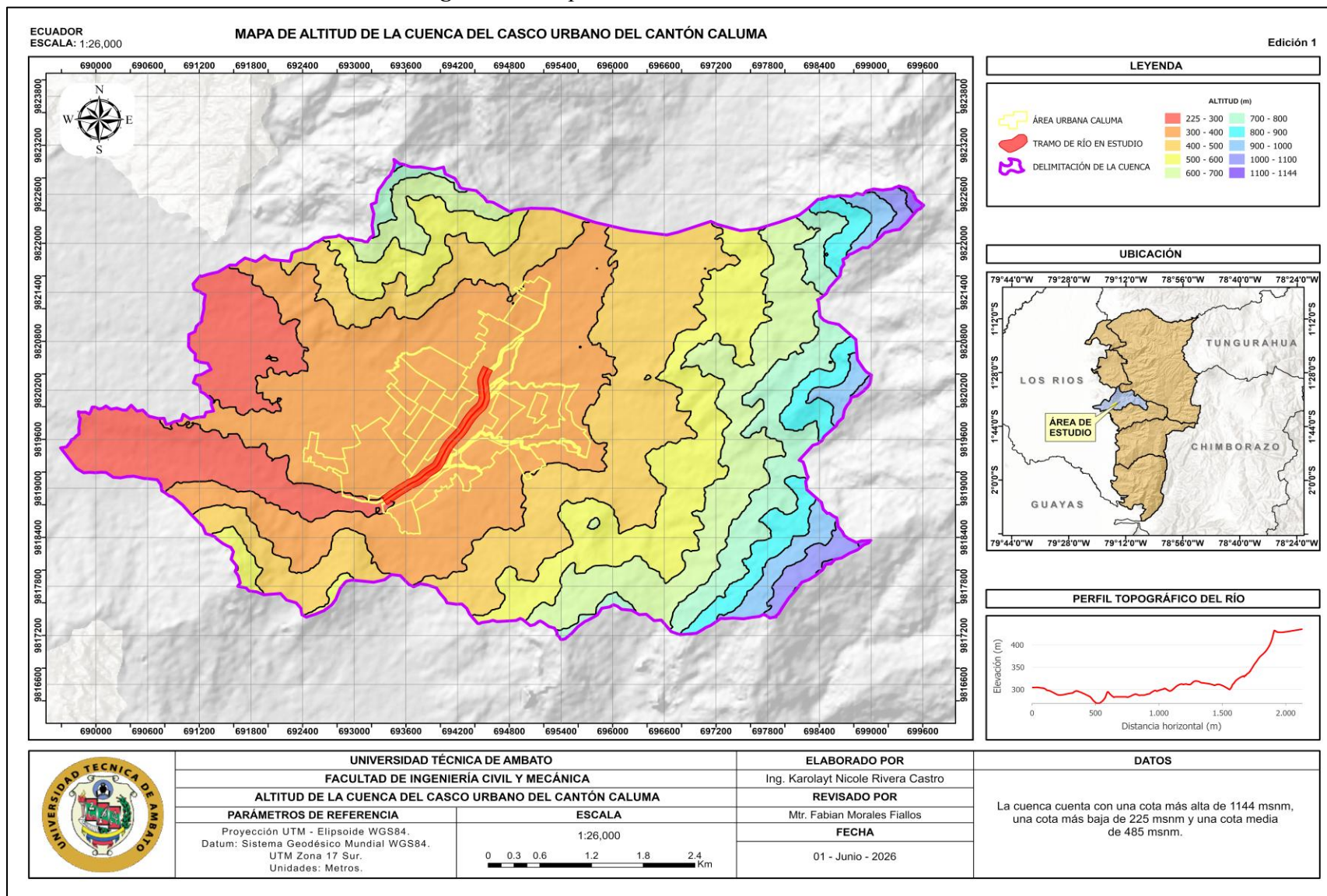
Aplicando los valores obtenidos:

$$H_m = 17591,60 / 36,29$$

$$H_m = \mathbf{484,75 \text{ m s. n. m.}}$$

Para la elaboración del mapa de altitud o elevación de la cuenca se realizó una reclasificación del píxel del Modelo Digital del Terreno, con la finalidad de obtener intervalos altitudinales definidos y una representación más uniforme del relieve. En el mapa generado se observa que la cuenca presenta una cota mínima de 225 m s. n. m. y una cota máxima de 1144 m s. n. m., lo que evidencia un rango altitudinal amplio.

Figura 24. Mapa altitud o elevación de la cuenca.



Realizado por: Elaboración propia.

La diferencia altitudinal observada en la cuenca permite identificar sectores altos, medios y bajos, los cuales pueden presentar comportamientos hidrológicos diferenciados. En cuencas con variaciones importantes de relieve, las lluvias intensas pueden generar escorrentía superficial más concentrada en sectores de pendiente, aumentar el transporte de sedimentos y modificar la energía del flujo hacia el cauce principal.

5.6.5.2.2. Rectángulo equivalente.

El rectángulo equivalente es una transformación geométrica que permite representar una cuenca hidrográfica de forma irregular mediante un rectángulo teórico que conserva la misma área y el mismo perímetro de la cuenca original. Esta representación facilita el análisis de la configuración geométrica del territorio, ya que las curvas de nivel pueden representarse como líneas paralelas al lado menor del rectángulo, simplificando la interpretación de la distribución altitudinal y de las características generales del relieve [68].

El rectángulo equivalente se determina a partir del área y del perímetro de la cuenca, manteniendo además el coeficiente de compacidad o índice de Gravelius, lo que permite conservar las principales propiedades geométricas de la unidad hidrográfica [68]. De esta manera, constituye una herramienta útil para comparar cuencas con diferentes configuraciones espaciales mediante una representación geométrica simplificada.

Las expresiones empleadas para calcular el lado mayor y lado menor son:

$$L = \frac{P}{4} + \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \quad (7)$$

$$l = \frac{P}{4} - \sqrt{\frac{P^2}{16} - A} \quad (8)$$

Donde:

L = lado mayor del rectángulo equivalente

l = lado menor del rectángulo equivalente

P = perímetro de la cuenca

A = área de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$L = 33,00/4 + \sqrt{(33,00^2/16 - 36,29)}$$

$$L = 8,25 + \sqrt{(68,06 - 36,29)}$$

$$L = 8,25 + 5,64$$

$$L = 13,89 \text{ km} \approx 14 \text{ km}$$

$$l = 33,00/4 - \sqrt{(33,00^2/16 - 36,29)}$$

$$l = 8,25 - \sqrt{(68,06 - 36,29)}$$

$$l = 8,25 - 5,64$$

$$l = 2,61 \text{ km} \approx 3 \text{ km}$$

Por lo tanto, el rectángulo equivalente de la cuenca presenta un lado mayor aproximado de 14 km y un lado menor aproximado de 3 km. Estos valores evidencian una forma alargada, coherente con los resultados obtenidos en los parámetros fisiográficos, especialmente con el factor de forma y el índice de compacidad.

TABLA 11. Tabla resumen de cálculos de parámetros geomorfológicos de la cuenca.

Parámetros Geomorfológicos			
1	Altitud Media de la Cuenca	484.75	m
2	Lado Mayor	14	km
3	Lado Menor	3	km

Realizado por: Elaboración propia.

Los cálculos realizados permitieron obtener la altitud media de la cuenca y las dimensiones del rectángulo equivalente. La altitud media de 484,75 m s. n. m. permite reconocer que una parte significativa de la cuenca se desarrolla en cotas bajas e intermedias; mientras que el rectángulo equivalente, con un lado mayor de 14 km y un lado menor de 3 km, confirma la tendencia alargada de la unidad hidrográfica analizada.

5.6.6. Sistema de drenaje de la cuenca.

Los parámetros del sistema de drenaje permiten caracterizar la organización jerárquica de los cauces, la capacidad de evacuación del escurrimiento superficial y el grado de disección del relieve dentro de una cuenca hidrográfica. Su análisis proporciona información sobre la eficiencia con la que el agua precipitada es conducida hacia el cauce principal y constituye un elemento fundamental para interpretar la respuesta hidrológica frente a eventos de lluvia.

La configuración de la red de drenaje influye directamente en los procesos de concentración del escurrimiento, los tiempos de respuesta de la cuenca y la generación de caudales máximos. En este contexto, Horton estableció que la red de drenaje puede describirse cuantitativamente mediante parámetros como el orden de corrientes, la densidad de drenaje, la frecuencia de corrientes y las relaciones de longitud de los cauces, los cuales permiten evaluar el grado de desarrollo y organización del sistema fluvial [71].

5.6.6.1. Red de drenaje.

La red de drenaje corresponde al conjunto de cauces naturales que organizan y conducen el escurrimiento superficial dentro de una cuenca hidrográfica. Está integrada por un cauce principal y por una serie de tributarios de diferente jerarquía, cuya disposición espacial determina la forma en que el agua es recolectada y transportada hacia el punto de salida de la cuenca. De acuerdo con Aparicio Mijares, una cuenca está constituida por una corriente principal y un sistema de corrientes tributarias que conducen el agua hacia un mismo punto de descarga [45].

La red de drenaje indica la condición geomorfológica e hidrológica de la cuenca, ya que refleja el terreno, las características del suelo, la cobertura vegetal, la permeabilidad y los procesos de erosión de los cursos de agua. Además, la estructura y el grado de desarrollo de la red de drenaje determinan la cantidad de escorrentía superficial y la velocidad de respuesta de la cuenca a la precipitación.

De acuerdo con Linsley, Kohler y Paulhus, una densidad de drenaje elevada caracteriza cuencas con un sistema de drenaje bien desarrollado y una respuesta hidrológica relativamente rápida, mientras que una densidad de drenaje baja suele asociarse con áreas de menor desarrollo de cauces, mayor infiltración y una respuesta más lenta frente a la precipitación [46]. En consecuencia, el análisis de la red de drenaje constituye un componente fundamental para interpretar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Caluma y complementar la caracterización morfométrica utilizada en la modelación hidrológica e hidráulica desarrollada en esta investigación.

5.6.6.2. Orden de corrientes.

El orden de corrientes constituye un parámetro morfométrico que permite clasificar jerárquicamente los cauces de acuerdo con su posición dentro de la red de drenaje y el grado de ramificación del sistema hidrográfico. Conforme al método propuesto por Strahler, las corrientes de primer orden son aquellas que no reciben tributarios; cuando confluyen dos corrientes del mismo orden, se genera una corriente del orden inmediatamente superior, mientras que la unión de corrientes de diferente jerarquía

conserva el orden de la corriente de mayor nivel [72]. Esta clasificación facilita la interpretación del grado de disección del relieve y del desarrollo de la red de drenaje.

Desde el punto de vista hidrológico, las corrientes también pueden clasificarse según la permanencia de su flujo. Aparicio Mijares distingue corrientes efímeras, intermitentes y perennes. Las corrientes efímeras transportan agua únicamente durante o inmediatamente después de los eventos de precipitación; las intermitentes presentan flujo durante determinadas épocas del año, generalmente asociado a la variación del nivel freático; mientras que las corrientes perennes mantienen escurrimiento a lo largo de todo el año debido al aporte continuo de aguas subterráneas [45].

TABLA 12. Tabla resumen de cálculos del orden de corrientes de la cuenca.

Orden De Rio		Longitud	
Orden 1	277	91.81	
Orden 2	81	42.55	
Orden 3	11	17.22	
Orden 4	6	15.49	169.96
Orden 5	2	2.89	
Orden 6	Orden de La Cuenca	7.40	
		177.36	

Realizado por: Elaboración propia.

La longitud más larga corresponde a los canales de primer orden y es de 91.81 km, destacando la importancia del drenaje inicial en la generación de esorrentía. Estos canales más pequeños se activan durante eventos de lluvia muy intensa y pueden contribuir rápidamente con agua y sedimentos a la red principal. La longitud total de los canales fue de 177.36 km, lo cual se utilizará para determinar otros parámetros del sistema de drenaje.

5.6.6.3. Longitud de los tributarios.

La longitud de los tributarios corresponde a la suma de las longitudes de los cauces que conforman la red de drenaje de una cuenca hidrográfica. Este parámetro permite

evaluar el grado de desarrollo del sistema fluvial y proporciona información sobre la organización de la red de drenaje, la pendiente del terreno y la capacidad de conducción del escurrimiento superficial. De acuerdo con Linsley, Kohler y Paulhus, Horton estableció que la longitud media de las corrientes tiende a incrementarse progresivamente conforme aumenta el orden de los cauces, siguiendo un patrón de organización característico de las redes hidrográficas [46].

En la presente investigación, la longitud de los tributarios fue determinada mediante el análisis de la red de drenaje generada en ArcGIS, obteniéndose una longitud total de corrientes de 177,36 km, distribuida entre cauces de primer a sexto orden. Este resultado muestra una red hidrográfica extensa en la que los canales de orden inferior forman la mayoría del sistema de drenaje y son responsables del escurrimiento superficial desde las áreas altas y de ladera.

A medida que aumenta el orden de los arroyos, el número de canales disminuye, mientras que su longitud y capacidad de transporte aumentan gradualmente. Esto lleva a la distribución de los afluentes en el canal principal. Esta organización jerárquica favorece la integración del escurrimiento dentro de la cuenca y constituye un elemento fundamental para interpretar su respuesta hidrológica, la concentración de caudales y el comportamiento del flujo durante eventos de precipitación intensa.

5.6.6.4. Densidad de corriente.

La densidad de corriente, también denominada frecuencia de corrientes en algunos estudios morfométricos, expresa la relación entre el número total de cauces que conforman la red de drenaje y el área de la cuenca hidrográfica. Este parámetro permite evaluar el grado de desarrollo del sistema fluvial, indicando la cantidad de corrientes existentes por unidad de superficie y proporcionando información sobre la organización de la red de drenaje y la capacidad de captación del escurrimiento superficial.

Horton incorporó este parámetro dentro del análisis cuantitativo de cuencas hidrográficas como un indicador del desarrollo de la red de drenaje y de la distribución espacial de los cauces [71]. Valores elevados de densidad de corriente suelen asociarse con cuencas que presentan una mayor cantidad de tributarios por unidad de área, mientras que valores bajos reflejan redes de drenaje menos desarrolladas y con menor grado de disección del relieve.

La expresión general es:

$$D_c = N / A \quad (9)$$

Donde:

Dc = densidad de corriente

N = número total de corrientes

A = área de la cuenca

Este parámetro complementa el análisis de la densidad de drenaje, ya que dos cuencas pueden presentar un número similar de cauces por unidad de área, pero diferenciarse en la longitud, distribución y jerarquía de sus corrientes.

5.6.6.5. Densidad de drenaje.

La densidad de drenaje es un parámetro morfométrico que expresa la relación entre la longitud total de los cauces y el área de la cuenca hidrográfica. Este indicador permite evaluar el grado de desarrollo de la red de drenaje y constituye una medida de la eficiencia con la que el escurrimiento superficial es conducido hacia el cauce principal.

De acuerdo con Linsley, Kohler y Paulhus, la densidad de drenaje permite diferenciar cuencas con redes hidrográficas densamente desarrolladas de aquellas donde el drenaje es menos eficiente. Valores elevados de este parámetro suelen asociarse con una respuesta hidrológica más rápida frente a los eventos de precipitación, mientras que valores bajos indican una mayor infiltración y una concentración más lenta del escurrimiento superficial [46].

La fórmula empleada es:

$$Dd = L / A \quad (10)$$

Donde:

Dd = densidad de drenaje

L = longitud total de cauces

A = área de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$Dd = 177,36 \text{ km} / 36,29 \text{ km}^2$$

$$Dd = \mathbf{4,89 \text{ km/km}^2}$$

La densidad de drenaje obtenida es de 4,89 km/km², lo cual sugiere una cuenca con red hídrica desarrollada, relieve disectado y capacidad de concentración relativamente rápida del escurrimiento superficial. Este valor debe analizarse junto con la pendiente, cobertura vegetal, permeabilidad y características geológicas, ya que una densidad alta

puede relacionarse con suelos menos permeables, materiales susceptibles a erosión o fuerte control topográfico.

5.6.6.6. Extensión media de escurrimiento superficial.

La extensión media de escurrimiento superficial representa la distancia promedio que recorre el agua de lluvia sobre la superficie del terreno antes de incorporarse a un cauce definido. Este parámetro constituye un indicador de la eficiencia de la red de drenaje y permite evaluar la longitud media del recorrido superficial del agua hasta alcanzar un canal natural.

De acuerdo con Linsley, Kohler y Paulhus, la extensión media de escurrimiento puede estimarse a partir de la densidad de drenaje, aunque su interpretación debe considerar además factores como la pendiente del terreno, la permeabilidad del suelo, la cobertura vegetal y las características geomorfológicas de la cuenca, los cuales influyen en la velocidad y dirección del flujo superficial [46].

La fórmula empleada es:

$$l = A / 4L \quad (11)$$

Donde:

l = extensión media de escurrimiento superficial

A = área de la cuenca

L = longitud total de cauces

Aplicando los valores obtenidos:

$$l = 36,29 \text{ km}^2 / 4(177,36 \text{ km})$$

$$l = 36,29 / 709,44$$

$$l = \mathbf{0,05 \text{ km}}$$

El valor calculado indica que, en promedio, el agua superficial recorre una distancia corta antes de incorporarse a la red de drenaje. Esto es coherente con una cuenca que presenta una red hídrica densa y abundantes cauces de bajo orden.

5.6.6.7. Frecuencia de ríos.

La frecuencia de ríos, también denominada frecuencia de corrientes, es un parámetro morfométrico que expresa la relación entre el número total de cauces y la superficie de la cuenca hidrográfica. Este indicador permite evaluar el grado de desarrollo de la red

de drenaje y complementar la interpretación de la organización del sistema fluvial, al representar la cantidad de corrientes existentes por unidad de área.

El análisis cuantitativo de cuencas hidrográficas considera parámetros como el número de corrientes, la longitud de los cauces, la densidad de drenaje y el relieve para describir la estructura y el grado de desarrollo de la red hidrográfica [72]. En este contexto, la frecuencia de ríos constituye un indicador que refleja el nivel de disección del terreno y la capacidad de captación del escurrimiento superficial.

La fórmula general es:

$$Fr = N / A \quad (12)$$

Donde:

Fr = frecuencia de ríos

N = número total de corrientes

A = área de la cuenca

En la tabla de resultados del estudio se registra una frecuencia de ríos de 148,06. Este valor refleja una alta presencia de cauces dentro de la cuenca; sin embargo, debe verificarse que el cálculo haya sido realizado bajo el mismo criterio metodológico adoptado para el conteo de corrientes, ya que la frecuencia de ríos normalmente se obtiene a partir del número total de cauces dividido para el área de la cuenca.

5.6.6.8. Pendiente media del río principal.

La pendiente media del río principal permite interpretar la inclinación general del cauce y su influencia en la velocidad del flujo, transporte de sedimentos y energía hidráulica. Esta se calcula mediante la relación entre la diferencia altitudinal del cauce y su longitud.

La fórmula general es:

$$S = \Delta H / L \quad (13)$$

Donde:

S = pendiente media del río principal

ΔH = diferencia de altura entre el punto inicial y final del cauce

L = longitud del río principal

En el presente estudio se obtuvo una pendiente media del río principal de 0,11 m/m, lo cual indica que el cauce posee condiciones de pendiente capaces de favorecer el

transporte de sedimentos y la concentración de energía hidráulica en determinados tramos.

5.6.6.9. Coeficiente de torrencialidad.

El coeficiente de torrencialidad es un parámetro morfométrico que relaciona el número de cauces de primer orden con el área total de la cuenca hidrográfica. Este indicador permite evaluar el grado de desarrollo de los drenajes iniciales y constituye una medida de la capacidad potencial de la cuenca para generar y concentrar escurrimientos superficiales durante eventos de precipitación.

Horton estableció que los cauces de primer orden representan las unidades básicas de la red de drenaje y constituyen el punto de partida para el análisis cuantitativo de la organización de los sistemas fluviales [71]. En este contexto, un mayor número de corrientes de primer orden por unidad de superficie suele asociarse con un mayor grado de disección del relieve y con una respuesta hidrológica más rápida frente a precipitaciones intensas.

La fórmula empleada es:

$$C_t = N_1 / A \quad (14)$$

Donde:

C_t = coeficiente de torrencialidad

N_1 = número de cauces de primer orden

A = área de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$C_t = 277 / 36,29$$

$$C_t = 7,63$$

El coeficiente de torrencialidad de 7,63 evidencia una importante presencia de drenajes iniciales dentro de la cuenca. Esto resulta relevante porque los cauces de bajo orden son los primeros en activarse durante lluvias intensas, generando aportes rápidos hacia la red principal.

5.6.6.10. Coeficiente de masividad.

El coeficiente de masividad relaciona la altitud media de la cuenca con su superficie, permitiendo interpretar la influencia del relieve en el comportamiento general de la unidad hidrográfica.

La fórmula empleada es:

$$C_m = H_m / A \quad (15)$$

Donde:

C_m = coeficiente de masividad

H_m = altitud media de la cuenca

A = área de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$C_m = 484,75 \text{ m} / 36,29 \text{ km}^2$$

$$C_m = 13,36$$

El coeficiente de masividad obtenido es de 13,36, lo cual refleja la relación entre la altitud media y el área de la cuenca. Este resultado debe interpretarse junto con la pendiente, el rango altitudinal y la configuración del relieve, ya que estos elementos influyen en la generación de escorrentía superficial.

TABLA 13. Tabla resumen de cálculos de parámetros del sistema de drenaje.

Párametros del Sistema de Drenaje		
1	Densidad de Drenaje	4.89
2	Extension Media de Escurrimieto	0.04
3	Frecuencia de Rios	148.06
4	Pendiente Media de Rio Principal	0.11
5	Coeficiente de Torrencialidad	7.63
6	Coeficinete de Masividad	13.36

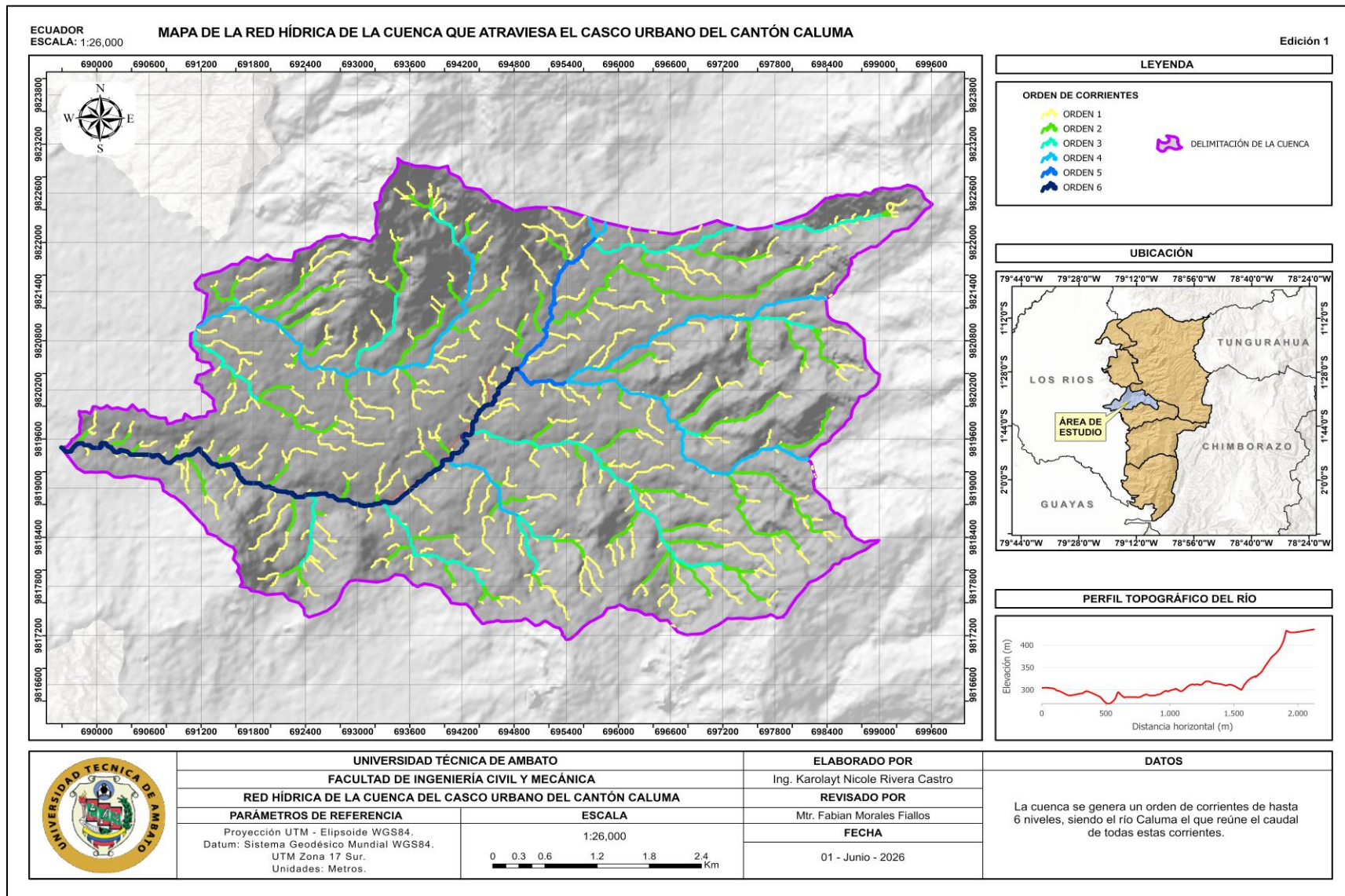
Realizado por: Elaboración propia.

La densidad de drenaje de 4.89 km/km² puede interpretarse como alta y sugiere que una cuenca tiene un relieve disectado, un drenaje amplio y una respuesta rápida a la precipitación. La densidad de drenaje debe considerarse junto con la pendiente, la cobertura vegetal y la permeabilidad, ya que una alta densidad de drenaje puede indicar suelos menos permeables, materiales más vulnerables a la erosión o un mejor control topográfico.

El coeficiente de torrencialidad de 7.63, calculado a partir de los canales de primer orden, muestra un alto grado de drenaje inicial. Este es un punto muy importante porque los canales de bajo orden son los primeros en responder a los eventos de lluvia, lo que, a su vez, conduce a contribuciones rápidas a la red principal. Por otro lado, la pendiente media del río principal de 0.11 m/m indica condiciones de energía hidráulica favorables para el transporte de sedimentos y la erosión en algunos de los canales.

Para la generación de la red hídrica se utilizó la información obtenida previamente a partir del MDT, la dirección de flujo y la acumulación de flujo. Posteriormente, mediante herramientas hidrológicas de ArcGIS, se aplicó la clasificación y vectorización de cauces, obteniéndose una red de drenaje con corrientes de hasta orden 6. Usando un valor de 0.25 se genera la red hídrica mediante el uso de la información anteriormente calculada y a continuación se realiza la delimitación de la misma con la cuenca generada anteriormente mediante el uso de hidropoints y watersheds a través de un algoritmo de stream link. Las herramientas de Orden de Corriente y Enlace de Corriente (Stream Order y Stream Link) en ArcGIS permiten la jerarquización y segmentación de la red hidrográfica a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM). La herramienta de Orden de Corriente asigna un orden numérico a cada segmento de la red de drenaje según el método de jerarquía, mientras que Enlace de Corriente identifica las secciones del canal entre dos confluencias consecutivas, entre una confluencia y el punto de salida de la cuenca, o entre una confluencia y la divisoria de drenaje [100].

Figura 25. Red Hídrica de la Cuenca.



Realizado por: Elaboración propia.

El mapa de la red hídrica evidencia una cuenca con drenaje desarrollado y cauces distribuidos en diferentes niveles jerárquicos. La red alcanza el orden 6, con una longitud total de 177,36 km, y el tramo del río en estudio pertenece al orden principal de la cuenca. Esta condición confirma que el tramo urbano analizado recibe aportes acumulados de las subcuencas y cauces tributarios ubicados aguas arriba.

TABLA 14. Tabla resumen de cálculos de altitud y áreas de la cuenca.

	Cot a más Baja	Cot a más Alta	Área Parcia l (km2) (Si)	Altitud Media de Cada Área Parcial (Hi)	(Si)*(Hi)	Áreas Acumulada s	Áreas que Quedan Sobre las Altitudes	% del Total	% Total que Queda Sobre la Altitud
1	225	300	3.64	262.50	955.50	3.64	32.65	10.03	89.97
2	300	400	11.91	350.00	4168.50	15.55	20.74	32.82	57.15
3	400	500	7.31	450.00	3289.50	22.86	13.43	20.14	37.01
4	500	600	4.80	550.00	2640.00	27.66	8.63	13.23	23.78
5	600	700	3.86	650.00	2509.00	31.52	4.77	10.64	13.14
6	700	800	2.15	750.00	1612.50	33.67	2.62	5.92	7.22
7	800	900	1.28	850.00	1088.00	34.95	1.34	3.53	3.69
8	900	1000	0.82	950.00	779.00	35.77	0.52	2.26	1.43
9	1000	1100	0.47	1050.00	493.50	36.24	0.05	1.30	0.14
10	1100	1144	0.05	1122.00	56.10	36.29	0.00	0.14	0.00
			36.29		17591.60			100	

Realizado por: Elaboración propia.

A partir de la reclasificación altitudinal de la cuenca se elaboró la tabla resumen de cotas, áreas parciales, áreas acumuladas y porcentajes de superficie por intervalo altitudinal. Estos valores permitieron calcular la altitud media de la cuenca y construir la curva hipsométrica e histograma de frecuencias altimétricas. La altitud media se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$H_m = \sum(H_i \cdot S_i) / A \quad (16)$$

Donde:

H_m = altitud media de la cuenca

H_i = altitud media de cada intervalo altitudinal

S_i = área parcial de cada intervalo

A = área total de la cuenca

Aplicando los valores obtenidos:

$$H_m = 17591,60 / 36,29$$

$$H_m = \mathbf{484,75 \text{ m s. n. m.}}$$

5.6.6.11. Curva hipsométrica.

La curva hipsométrica representa la distribución del área drenada en función de la altitud de la cuenca. Esta se construye relacionando, en el eje de las abscisas, el área acumulada o porcentaje de área que queda sobre una determinada altitud, y en el eje de las ordenadas, las cotas o elevaciones correspondientes. Cuando los procesos hidrológicos dependen de la elevación, resulta necesario conocer la distribución del área de una cuenca en función de la altitud mediante curvas área-elevación o curvas hipsométricas, las cuales permiten representar la distribución espacial del relieve y facilitan la interpretación de la influencia de la altitud sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca [46].

Para la construcción de la curva se emplearon los valores de áreas acumuladas y porcentajes obtenidos en la tabla altitudinal. El porcentaje de área parcial y el porcentaje de área que queda sobre una altitud determinada se calcularon mediante las siguientes expresiones:

$$\% \text{ Área parcial} = (S_i / A) \times 100 \quad (17)$$

$$\% \text{ Área sobre la altitud} = (\text{Área que queda sobre la altitud} / A) \times 100$$

Donde:

S_i = área parcial del intervalo altitudinal

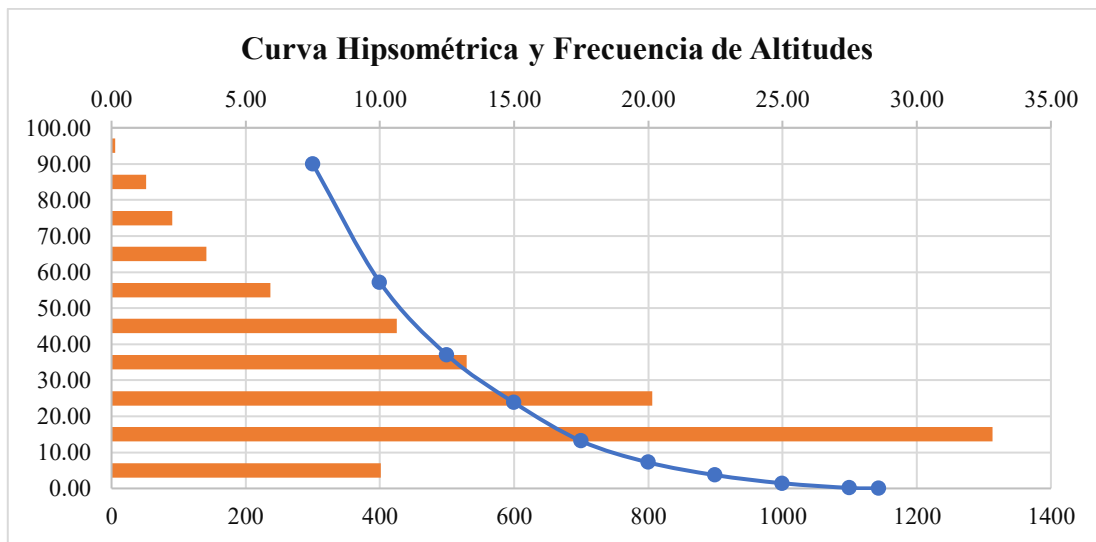
A = área total de la cuenca

De acuerdo con el análisis hipsométrico, la relación entre el área acumulada de una cuenca y su elevación constituye una herramienta fundamental para interpretar la configuración del relieve y el estado geomorfológico del terreno [74]. En la cuenca del río Caluma, la curva hipsométrica muestra que la mayor parte de la superficie se concentra en elevaciones bajas e intermedias, particularmente entre 300 y 500 metros sobre el nivel del mar. Esta área representa aproximadamente el 52.96% del área total de la cuenca.

Asimismo, las regiones por encima de los 700 metros sobre el nivel del mar ocupan una proporción mucho menor y los sectores de mayor elevación están menos extendidos que las zonas bajas e intermedias. Esta distribución altitudinal sugiere un predominio de superficies de relieve medio, condición que influye en la distribución espacial de la escorrentía, la concentración del flujo y la respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos de precipitación. En conjunto, la curva hipsométrica constituye un elemento de apoyo para la interpretación de la evolución geomorfológica de la cuenca y complementa el análisis morfométrico desarrollado en la presente investigación [74].

5.6.6.12. Histograma de frecuencias altimétricas.

El histograma de frecuencias altimétricas muestra el área parcial de la cuenca en diferentes rangos de elevación. En contraste con la curva hipsométrica que muestra el área acumulada, el histograma muestra los intervalos de altitud con la mayor área de la cuenca. La curva hipsométrica se construye clasificando la cuenca en rangos de altitud, calculando las áreas parciales de cada intervalo y determinando el porcentaje de área acumulada que nos da la distribución altitudinal del territorio y la configuración del relieve [53].



Realizado por: Elaboración propia.

La curva hipsométrica y el histograma de frecuencia altimétrica presentan la misma información de altitud, pero lo hacen de manera diferente. La curva se puede utilizar para ver la variación acumulada del área con respecto a la elevación, mientras que el histograma proporciona la altitud más frecuente en la cuenca. Pike y Wilson (1971) muestran que el análisis área-altitud y el integral hipsométrico son herramientas cuantitativas útiles para caracterizar formas de relieve y comparar unidades

geomorfológicas. En este sentido, los resultados obtenidos permiten reconocer que la cuenca presenta predominio de superficies bajas e intermedias, con una distribución altitudinal no uniforme y menor presencia de áreas en cotas altas.

Se realiza la curva hipsométrica mediante los datos anteriormente obtenidos, esta es construida a partir de los intervalos altitudinales de la cuenca; representa la distribución del área drenada en función de la altitud y permite analizar el comportamiento general del relieve. El gráfico muestra que la mayor parte del área se concentra en altitudes bajas e intermedias, especialmente entre 700 y 1100 m sobre el nivel del mar, donde el histograma muestra sus frecuencias más altas. La curva muestra un descenso progresivo desde las áreas altas hacia las partes bajas, lo que significa que la mayor parte de la superficie de la cuenca se encuentra en sectores de menor altitud, mientras que las áreas son menos extensas en elevaciones más altas. Esta forma sugiere que la cuenca está relativamente disectada con zonas medias y bajas (lo cual es posible para un estado geomorfológico de madurez intermedia). Además, el área en ciertas altitudes nos permite identificar zonas donde se crea más escorrentía, infiltración y almacenamiento temporal. Esto último será útil para comprender la dinámica hidrológica de la cuenca y diseñar obras de drenaje, control de erosión, etc.

El histograma de frecuencias de altitudes coincide bien con la curva hipsométrica ya que identifica las altitudes más comunes dentro de la cuenca. Las barras más largas muestran que las altitudes más frecuentes se encuentran principalmente en las partes bajas e intermedias del relieve y las altitudes más altas ocupan menos del área total. Esto es una clara indicación de que la cuenca no tiene un conjunto uniforme de alturas, sino más bien una mayor acumulación de superficie en algunas altitudes, lo cual es importante para evaluar la pendiente general, la respuesta hidrológica y la susceptibilidad a los procesos erosivos.

5.6.7. Análisis Hidrológico – Climatológico.

En cumplimiento del segundo objetivo específico, se analiza el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Caluma mediante el procesamiento de datos de precipitación, caudales y características morfométricas. Este análisis permitió estimar los caudales de crecida y comprender la respuesta hidrológica de la cuenca frente a eventos de lluvia, generando información necesaria para la evaluación hidráulica posterior.

La caracterización climatológica de la cuenca se realizó con datos pluviométricos y meteorológicos obtenidos de estaciones ubicadas en el área afectada por el río Caluma y sus alrededores. Se utilizó información del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) para el diseño y gestión de las estaciones meteorológicas e hidrológicas nacionales.

El visor institucional permite a los usuarios ver la ubicación, tipo de estación, estado operativo y registros de redes automáticas, convencionales, meteorológicas, hidrológicas e hidrometeorológicas [101]. La información fue revisada y limpiada antes del análisis para verificar la consistencia de los registros, la longitud de la serie de datos, los valores faltantes y la representación geográfica de las estaciones seleccionadas.

Para espacializar la distribución de la precipitación y la temperatura, utilizamos técnicas de interpolación espacial basadas en un Sistema de Información Geográfica. Entre los métodos considerados se encuentran el de Ponderación Inversa de la Distancia (IDW) y Kriging, que son ampliamente utilizados para generar superficies continuas a partir de datos puntuales.

El método IDW estima los valores de las celdas mediante un promedio ponderado de las observaciones más cercanas y tiende a influir en los puntos a distancias más cortas. Por otro lado, Kriging es un enfoque geoestadístico que utiliza la estructura de la autocorrelación espacial mediante semivariogramas y estima en función de la variabilidad espacial de la información disponible [102]. La aplicación de estos métodos permitió la generación de mapas de isoyetas e isotermas utilizados en la descripción climática de la cuenca del río Caluma.

5.6.7.1. Precipitación.

La precipitación constituye una de las principales entradas de agua al sistema hidrológico y representa el punto de partida para el análisis de procesos como la escorrentía, la infiltración, el almacenamiento y la generación de caudales de crecida. Su cuantificación constituye uno de los aspectos fundamentales de los estudios hidrológicos, ya que permite evaluar la respuesta de una cuenca frente a los eventos de lluvia y analizar la relación existente entre la precipitación y el escurrimiento superficial [46].

La precipitación puede presentarse de muchas formas, es decir, lluvia, llovizna, nieve y granizo, dependiendo de las condiciones atmosféricas en las que se observa la condensación del vapor de agua. Es el conjunto de partículas de agua en estado líquido o sólido que se forman en la atmósfera y llegan a la superficie terrestre. La cantidad de precipitación en un punto dado a menudo se expresa en mm, que es la altura de agua que se deposita en una superficie horizontal durante un tiempo determinado. Este parámetro es una de las principales variables utilizadas para caracterizar el suministro de agua en una cuenca y proporciona información para el análisis hidrológico, la estimación de caudales y la modelación de procesos de escorrentía.

Las lluvias en el área de estudio del cantón Caluma muestran un patrón de comportamiento estacional con períodos de alta precipitación y menor lluvia. Esto es

importante para los estudios hidrológicos ya que las lluvias intensas pueden aumentar la escorrentía superficial e impactar el caudal del río en la parte urbana de la ciudad.

5.6.7.1.1. Modelo de precipitación.

El modelado espacial de la precipitación se realizó mediante el uso de información pluviométrica de estaciones cercanas, regresión lineal entre altitud y precipitación, interpolación IDW, interpolación Kriging y generación de isoyetas. Para el área de estudio se consideró la estación climatológica automática M0129 Caluma, ubicada en la zona 5, y la estación M0132 Balzapamba, ambas pertenecientes a la provincia de Bolívar.

Se han obtenido del INAMHI los datos más actuales de dichas estaciones:

TABLA 15. Datos de estaciones climatológicas automáticas M0129 y M0132.

Estacion	Ubicación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
M0129	CALUMA	1964	654.8	354.2	803.2	349.2	26	28.6	7.7	6.4	2.2	15.7	21.2	86.2
M0129	CALUMA	1965	495.7	525.3	778.6	573.3	406.4	159.3	25.1	8.9	14.7	36.8	16.3	205.8
M0129	CALUMA	1966	428.6	696.2	543.2	296.5	83.4	10.9	3.4	11.6	25.2	32.1	46.5	106.2
M0129	CALUMA	1967	608.4	463.7	505.7	146	48.4	20.2	3.7	4.1	11.2	10.5	1.9	37.6
M0129	CALUMA	1968	341.7	182.2	343.7	198.5	17.4	16.8	2.7	6.4	12.8	14.1	15.4	70.5
M0129	CALUMA	1969	304.7	334.9	532.7	504.9	396.3	97.3	25.6	21.2	11.3	9.6	13.2	118.8
M0129	CALUMA	1970	526.9	286.7	216.8	424.3	446	49.1	14.8	1.7	5.7	6.2	27.4	67.5
M0129	CALUMA	1971	265.6	652.5	923.7	316.7	60.9	91.9	1.8	1.7	16.9	64.5	28.4	253
M0129	CALUMA	1972	692.1	568.6	899.7	417.7	143.7	225.2	44.8	50	40.4	39	31.5	463.5
M0129	CALUMA	1973	647.9	806.1	842.5	416.8	320.4	67.9	8.4	8	25	15.7	28.5	54.7
M0129	CALUMA	1974	202.5	404.8	635.1	286.7	211.2	27.3	4.8	0.2	17.4	9.7	53.4	298.1
M0129	CALUMA	1975	432.9	719.3	662.7	376.2	90	77.3	21.1	6.9	3.9	24.5	13.2	75.1
M0129	CALUMA	1976	379.5	943.6	1109.1	691.1	247.7	73	17.5	19.8	21.5	4.2	29.3	123.2
M0129	CALUMA	1977	519.2	699.8	779.6	322	26.7	102.5	21.5	6.5	56.5	6.1	18.9	124.7
M0129	CALUMA	1978	420.8	466.4	524.3	436.4	203.2	22	5.9	20.2	18.9	26.9	33.9	121.4
M0129	CALUMA	1979	446.8	490	728.3	423.5	64.8		14	2.4	35.6	21.2	4.1	19.8
M0129	CALUMA	1980	130.1	497.7	341.6	807.5	240	21.3	3	11.3	14.1	55.9	51.7	106.3
M0129	CALUMA	1981	293.9	805.4	570.3	394.1	98.7	10.8	38.3	7	12.3	11.4	12	188.3
M0129	CALUMA	1982	683.9	533.2	284.3	282.5	200.4	3	0.5	0.4	57.4	221.1	417.6	848.5
M0129	CALUMA	1983	850.9	587	920.5	1240.1	963	393.1	547.4	172.4	232.3	136	184.3	353.6
M0129	CALUMA	1984	175.1	747.4	963.1	490.3	18.7	95.7	43.9	23.3	72.5	30.1	156.8	150.7

M0129	CALUMA	1985	940	353.5	692.4	265.1	146	55.4	22.3	13.5	19.9	0	27.9	0
M0129	CALUMA	1986	993.6		487.4	648.4	82.7	21.4	24.5	32.6	18.8	39.7	56.7	192.3
M0129	CALUMA	1987	679.3	793.9	112	683.7	478.6	22.7	25.6	17	4.8	33.7	19.7	85.3
M0129	CALUMA	1988	1091.4	765.8	217.9	626.9	206.3	29.9	33	15.5	19	35	39.6	126.6
M0129	CALUMA	1989	944.7	1015.4	1435.9	615.5	180.8	29.9	12.2	11.5	9.5	71	51.6	149.7
M0129	CALUMA	1990	242	457.9	262.3	282.5	118.8	82	5.6	0	2.7	23.7	9.5	251.5
M0129	CALUMA	1991	250.1	527.3	551.2	166.2	91.6	0	0	0	0	9.1		339.4
M0129	CALUMA	1992	873.1	678.5	990.2	567.3	523	90.7	31.9	6.9	4.2	4.9	33.1	38.1
M0129	CALUMA	1993	488.1	1025.2	586.6	455.6	272.7	21	76.4	10.4	7.2	6.9	11.2	336.4
M0129	CALUMA	1994	555	492	451.4	501.3	128.9	25.7	0	0	0	0	8.6	303.1
M0129	CALUMA	1995	518.9	413.6	362.1	303.1	54.2	7.4	51.1	22.3	5.2	25.4	68.4	48.3
M0129	CALUMA	1996	333.2	567.9	579.6									
M0129	CALUMA	1997												723.3
M0129	CALUMA	1998	605.8	526.9	750.3		556	158.3						
M0129	CALUMA	1999					348.8							
M0129	CALUMA	2006	308.9	785.5	673.3	182.4	87.2	15	3.4	9.1		5.5	27.2	147.1
M0129	CALUMA	2007	213.6	441.4		321	143.7	68.2	15.9	9.4	4	12.6	36.8	79.8
M0129	CALUMA	2008	457	580.4	586.3	312.4	162.9	42.6	16.3	42.6	21.4	37.4	15.6	
M0129	CALUMA	2009	499.7	390.7	331.9	200.8	66.1	41.3	2.2	10.8	2.5	17.7	33.5	
M0129	CALUMA	2010	401.3	500	365.9	342.3	103.6	38.4	24.9	7.5	24.1	12	21.4	267.5
M0129	CALUMA	2011	343.2		160.8	429.6	18.2	78.4	76.9	3.7	9.9			270.4
M0129	CALUMA	2012	557.9		730.1	523.2	282.9							
M0129	CALUMA	2013	231.8	543.2	441.1	196.2	114.4	30.2	7.5	4	8.2	19.4	5.7	77.3
M0129	CALUMA	2014	573.9	443	341	539.2	351.4	37.6	15.3	22.6	22.4	91.8	12.6	105.7
M0129	CALUMA	2015	400	533.2	513.1	350.7	389	148.2						
M0132	BALZAPAMBA	1960	322	254	392	155	46	0	0	18	0	10	6	50
M0132	BALZAPAMBA	1961	230	245	143	222	25	30	3	0	1	15	19	60
M0132	BALZAPAMBA	1962	339	357	233	112	48	28	0	1	0	2	42	40
M0132	BALZAPAMBA	1963	324	187	330	95	95	10	2	0	0.9	17.6	12	99.7
M0132	BALZAPAMBA	1964	262.6	181.2	230.1	254.1	13.2	21.2	6	10.7	14.8	27.4	25.8	59.9
M0132	BALZAPAMBA	1965	245.3	255.8	348.4	367.8	337.7	47.7	4.5	4.9	26.2	34.8	30.2	200.3
M0132	BALZAPAMBA	1966	286	233.8	406.4	91.9	51	6.3	2	3.4	2.8	31.8	16	56.5
M0132	BALZAPAMBA	1967	276.4	295.1	148.4	57.5	60.4	10.9	1.8	3.2	9.9	18	3.9	49.4
M0132	BALZAPAMBA	1968	185.5	180.8	143.7	106.6	13.2	11.3	7.3	3.1	39.6	35.9	9.2	82
M0132	BALZAPAMBA	1969	120.9	107.8	282.6	378.2	108	41.5	16.3	9.4	15.7	14.9	31.2	106.1
M0132	BALZAPAMBA	1970		204.7	105.2	194.9	249.7	24.3	7.5	1.7	11.8	15.7	35.7	40.7

M0132	BALZAPAMBA	1971	128.4	289.9	456.6	147	37.8	27.2	1.4	6.1	40.1	32.3	13.5	140.7
M0132	BALZAPAMBA	1972	217.6	291.3	497.4	302.3	103.6	116.1	10.3	37.5	9.1	8.2	38	267.3
M0132	BALZAPAMBA	1973	367.6					19.3	8.5	11.6	45.5	17.3	13	41.9
M0132	BALZAPAMBA	1974	113.6	284.5	163.1	139.2	106.6	18.8	4.2	5.2	95.2	30.4	60	172.6
M0132	BALZAPAMBA	1975	218.4	378.6	308.7	260.3	59.6	61.1	17.9	9.8	1.9	23		83.2
M0132	BALZAPAMBA	1976	455.7	401.4	427.8	290.3	122.7	45	10.9	20.4	15.2	13.2	76.1	59
M0132	BALZAPAMBA	1977	271.7	297.1	418.8	172.6	27.9	38.5	10.4	6.3	51.9	13.2	4.9	70.7
M0132	BALZAPAMBA	1978	198.3	300.2	201.6	258.8	80.5	15.7	12.9		31.4	21.6	26.8	98
M0132	BALZAPAMBA	1979	145.5	209.6	236.9	225	52	7.9	1.3	12	24.8	15.9	4.4	53.5
M0132	BALZAPAMBA	1980	126.3	388.6	194	427	148	17.7	2.8	8.3	10.5	35.1	50.5	42.3
M0132	BALZAPAMBA	1981	122.9	299.6	268	192.5	18.5	9.2	34.4	7.9	7.5	15.2	13.1	118.2
M0132	BALZAPAMBA	1982	192.1	157.6	121.7	209.4	36.3	10.6	7.5	5.3	34.1	97.8	287.9	478.2
M0132	BALZAPAMBA	1983	507.1	480.2	490.1	526.3		142.5	181	52		63.1	89.5	152.8
M0132	BALZAPAMBA	1984	101.7	406.4	462.6	370.4	18.6	22.8	5.1	4.2	33.5	33.1	41.5	117.5
M0132	BALZAPAMBA	1985	155.6	113.6	243.2	124.4	54.3	19	2.1	13.1	22.7	12.5	8.1	151
M0132	BALZAPAMBA	1986	355.6	194.1	222.3	309.1	40.8	5.2	7.8	5.4	15.2	29.9	33.8	115.7
M0132	BALZAPAMBA	1987	276.6	267.7	498	304.1	154.7	6.9	7.1	16.2		21.5	13.8	51.7
M0132	BALZAPAMBA	1988	255.5	397.8	78.5	261.9	147.2	18.9	6.6	9	22.7	25	28.7	67.9
M0132	BALZAPAMBA	1989	331.6	402	568.1	263.9	64.5	22.6	7	8.2	19.5	89.7	29.2	74.2
M0132	BALZAPAMBA	1990	84.1	296.6	164.2	213.1	71.3	18.9	7.3	2.3	3.6	25.9	28.8	111.3
M0132	BALZAPAMBA	1991	165.1	349.7	237		42.1	21.2	21.2	7.1	6			
M0132	BALZAPAMBA	1993	181.5	471.5	335.7	364.4	110.9	16.4	12.6	13.4	17.6	14.2	25.7	123.8
M0132	BALZAPAMBA	1994	320.7	229.9	262.5	255.4	137.3	12.1	2.6	0	1.8	0	0	0
M0132	BALZAPAMBA	1996	185.6	434.7	173.8	140.4	42.2	7.1	6	7.5	8.3	11.2	9.7	92.8
M0132	BALZAPAMBA	1997	215.3	200.6	364.6	332.9	141.4	44.3	76	47.9	161.5	122.5	448.5	413.2
M0132	BALZAPAMBA	1998		316	424.1	443.6	378.7	130.2						

Realizado por: INAMHI.

Mediante los datos obtenidos del INAMHI se realizan los cálculos respectivos para obtener la precipitación promedio de cada estación:

TABLA 16 Datos de estaciones utilizadas para el modelo de precipitación.

Estación	Nombre	x	y	Altitud (msnm)	Provincia	Precipitación (mm)
M0129	Caluma	689651	9820493	350	BOLIVAR	2534.71
M0132	Balzapamba	703701	9803770	920	BOLIVAR	1398.69

Realizado por: Elaboración propia con base en información del INAMHI.

Con estos datos se elaboró un modelo de precipitación mediante regresión lineal entre la altitud y la precipitación. Para ello, se generó un gráfico de dispersión y se obtuvo la ecuación de la línea de tendencia, con el propósito de representar la relación entre ambas variables.

La ecuación general empleada fue:

$$P = aH + b \quad (18)$$

Donde:

P = precipitación estimada

H = altitud

a = pendiente de la recta

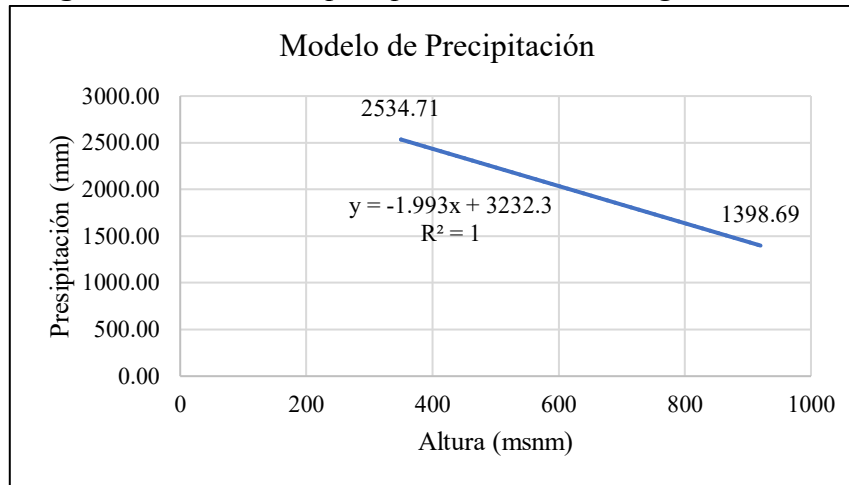
b = intercepto

Para el presente caso, la ecuación obtenida fue:

$$P = -1,993H + 3232,3$$

El valor negativo de la pendiente indica que, de acuerdo con los datos utilizados, la precipitación disminuye conforme aumenta la altitud entre las estaciones consideradas. Sin embargo, debido a que el modelo se construyó con solo dos estaciones, el valor de $R^2 = 1$ debe interpretarse con cautela, ya que este resultado responde al ajuste exacto de una recta entre dos puntos y no necesariamente representa una validación estadística robusta del comportamiento regional de la precipitación.

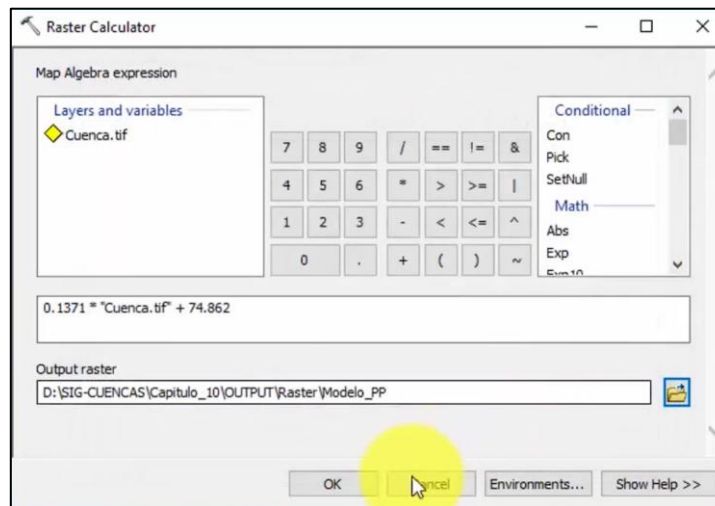
Figura 26. Modelo de precipitación mediante regresión lineal.



Realizado por: Elaboración propia.

La ecuación obtenida se utiliza en la calculadora ráster de ArcGIS para obtener a partir del MDT de la cuenca el modelo de precipitación.

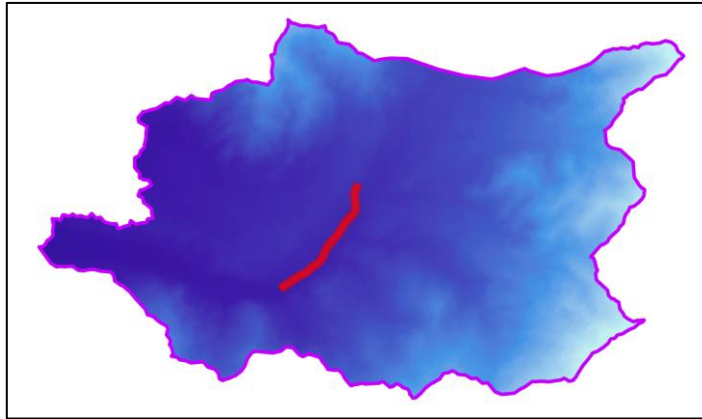
Figura 27. Aplicación de la calculadora ráster para el modelo de Precipitación.



Realizado por: Elaboración propia.

Una vez generado el ráster de precipitación, se realizaron los procesos de interpolación espacial y representación cartográfica necesarios para la elaboración del mapa de isoyetas. La interpolación espacial permite estimar valores en ubicaciones donde no existen mediciones directas a partir de la información registrada en estaciones de observación distribuidas sobre el territorio [102].

Figura 28. Superficie interpolada de precipitación de la cuenca.



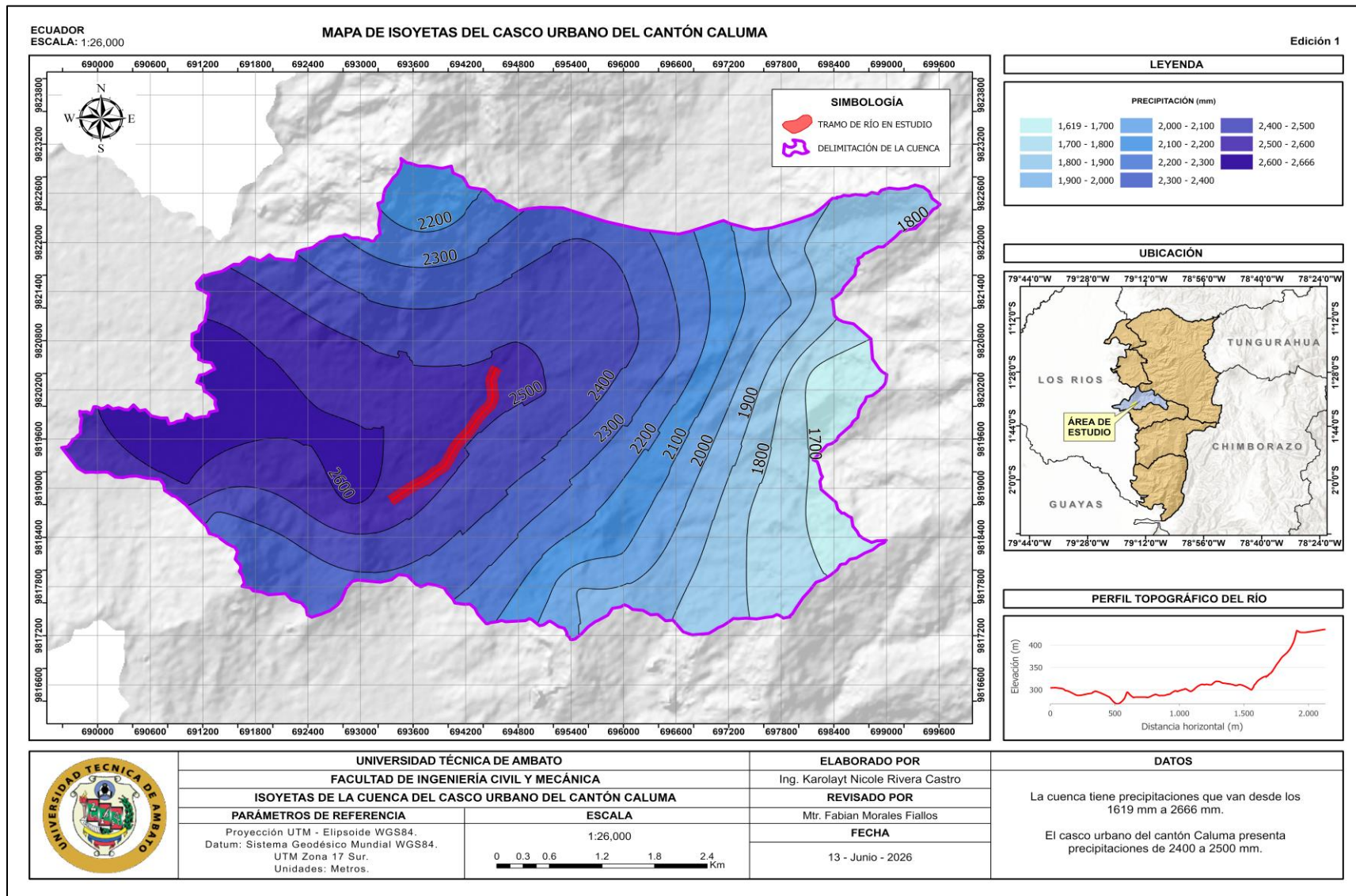
Realizado por: Elaboración propia.

A partir de la ecuación de interpolación obtenida y del procesamiento espacial realizado en el Sistema de Información Geográfica (SIG), se generó una superficie continua de precipitación para toda la cuenca del río Caluma. Esta superficie permitió representar la variación espacial de la lluvia y constituyó la base para la elaboración de la cartografía temática correspondiente.

Posteriormente, se generaron las isoyetas con intervalos de 100 mm, las cuales representan líneas que unen puntos de igual precipitación y facilitan la interpretación de la distribución espacial de la lluvia dentro del área de estudio. El método de las isoyetas constituye uno de los procedimientos más utilizados para estimar la precipitación media sobre una cuenca, debido a que considera la variación espacial de la precipitación y la influencia de las condiciones topográficas sobre su distribución [45].

La cartografía obtenida permitió identificar los gradientes espaciales de precipitación presentes en la cuenca del río Caluma, proporcionando información fundamental para el análisis hidrológico y para la estimación de los procesos de escorrentía considerados en la modelación desarrollada en la presente investigación.

Figura 29. Mapa de isoyetas del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

El mapa de isoyetas muestra que la cuenca presenta precipitaciones aproximadas entre 1619 mm y 2666 mm. En el sector correspondiente al casco urbano del cantón Caluma, la precipitación se ubica principalmente entre 2400 mm y 2500 mm, lo que evidencia una condición pluviométrica importante dentro del área de análisis. Esta distribución espacial permite identificar los sectores con mayor aporte de lluvia hacia la red de drenaje y constituye un insumo fundamental para los cálculos hidrológicos posteriores.

5.6.7.2. Temperatura.

La temperatura es una variable meteorológica que expresa el estado térmico del aire en un momento y lugar determinados. Esta permite conocer el grado de calor o frío sensible que presenta la atmósfera y constituye un parámetro importante dentro de los estudios hidrológicos, debido a su relación con procesos como evaporación, evapotranspiración, humedad atmosférica y comportamiento climático de una cuenca.

La temperatura depende principalmente de la radiación solar; sin embargo, también varía en función de factores geográficos y atmosféricos como la altitud, latitud, nubosidad, circulación del aire, cobertura del suelo y proximidad al mar. En zonas con relieve variable, la altitud cumple un papel importante, ya que generalmente la temperatura disminuye conforme aumenta la elevación. La temperatura del aire constituye una de las principales variables meteorológicas que intervienen en los procesos de evapotranspiración, junto con la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento, influyendo directamente en la demanda atmosférica de agua y en el balance hídrico de una cuenca [79].

5.6.7.2.1. Modelo de temperatura.

El modelo de temperatura se elaboró considerando la relación entre altitud y temperatura media anual. Para ello, se utilizó el Modelo Digital del Terreno como base espacial y se aplicó un gradiente térmico vertical con los datos obtenidos del INAMHI. Para el área de estudio se consideró la estación climatológica automática M0129 Caluma, ubicada en la zona 5, perteneciente a la provincia de Bolívar. Se han obtenido del INAMHI los datos más actuales de dicha estación:

TABLA 17. Datos de la estación climatológica automática M0129.

Estacion	Ubicación	Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
M0129	CALUMA	1965	23.4	23.8	24	23.8	23.8	23.6	22.4	22	22.6	22.5	22	23.3
M0129	CALUMA	1966	24.1	26.2	24	24.2	23.5	22	21.4	22.2	22.3	22	22.5	23.1
M0129	CALUMA	1967	23.3	23.8	23.7	24.4	23.8	21.6	21.4	21.7	21.9	22.1	21.9	22.6
M0129	CALUMA	1968	23.2	23.4	23.5	24.1	22.2	21.5	21.7	22.1	22.7	22.1	22.5	24.2
M0129	CALUMA	1969	23.9	24.3	24.8	25	24.6	23.8	22.2	21.9	22.7	22.5	22.6	23.8
M0129	CALUMA	1970	23.7	23.6	24.3	24.2	23.2	22.6	21.5	21.5	21.8	22.3	22.1	23.3
M0129	CALUMA	1971	22.9	22.8	23.6	23.9	22.4	21.9	21.1	21.2	21.8	21.6	21.7	23.1
M0129	CALUMA	1972	23.3	23.6	24.3	24.6	24	23.7	23.4	23	22.7	22.7	22.8	24.4
M0129	CALUMA	1973	24.3	24.6	24.6	24.6	23.7	22.5	21.4	21.7	21.7	22.1	22.2	22.2
M0129	CALUMA	1974	23	23.2	23.8	24.2	23.6	22	21.1	21.7	21.6	21.6	22.9	22.7
M0129	CALUMA	1975	23.1	23.1	23.9	23.8	22.9	22.3	20.8	21.1	21.4	22	21.2	
M0129	CALUMA	1976	22.7	23	23.9	23.9	23.9	23.2	22.6	22.4	22.2	21.8	22.8	23.9
M0129	CALUMA	1977	23.6	23.9	24.7	24.1	24	22.6	22.1	22	22.8	22.3	22.7	24.4
M0129	CALUMA	1978	23.6	24.5	24.3	23.9	23.5	22.4	22.3	21.9	22.8	22.5	23.4	23.6
M0129	CALUMA	1979	23.7	24.5	24.6	24.5	24.1		22.1	22.6	22.3	23.2	23	24.1
M0129	CALUMA	1980	24.8	24.2	24.8	25.1	24.5	23	22.1	22.4	22.7	22.6	22.6	23.5
M0129	CALUMA	1981	23.9	23.7	25.1	24.6	22.9	22.2	21.9	21.8	22.7	22.4	22.9	24.2
M0129	CALUMA	1982	23.9	24.4	24.8	24.5	23.8	22.8	22.4	22.6	23.9	23.5	24.7	25
M0129	CALUMA	1983	25.5		26.1	25.7	25.9	25.4	24.9	24.5	23.5	23.2	23.5	23.4
M0129	CALUMA	1984	24.7	24.5	24.6	24.6	24.5	23.1	22.2	22.6	22.3		23	24.1
M0129	CALUMA	1985	24.6	24.5	24.8	24.7	24.1	23.3	21.9	21.9	22.9	23	23.7	24
M0129	CALUMA	1986	23.6		24.6	24.3	23.8	22.1	22.5	22.4	22.9	22.9	23.2	23.5
M0129	CALUMA	1987	24.5		25.7	25.9	24.8	24.1	23.4	23.4	23.4	23.6	24.7	24.4
M0129	CALUMA	1988		24.6	25.1	24.8	24.7	22.9	22.8	22.7	23	22.8	23.1	23.8
M0129	CALUMA	1989	23.9	24.3	24.6	24.6	23.7	22.8	22.2	22.1	22.7	22.9	23.4	
M0129	CALUMA	1991	24.3	23.3	24.9			22.8	22.3	22.4	22.6			
M0129	CALUMA	1992	24.1	24.1	25	25.4	25.5	24.1	22.9	22.9	22.6	22.9	23.2	23.7
M0129	CALUMA	1993	24.1	24.1	24.8	25.1	24.9	23.7	23.1	22.4	22.6	22.8	22.8	24.1
M0129	CALUMA	1994	23.7	23.8	24.2	24.4	24.3	22.6	22.2	21.7			22.9	24.3

M0129	CALUMA	1995	24.2	24.4	25.1	24.7	24.1	23.7	23	22.9	23.5	23.2	23.1	24.7
M0129	CALUMA	1996	24.5	24.3	24.8									
M0129	CALUMA	1998	25.8	25.7	25.8									
M0129	CALUMA	1999					24.5							
M0129	CALUMA	2006	24	24.1	24.5	24.5	23.6	22.3	22	22.7		23.1	22.6	24
M0129	CALUMA	2007	24.2	24.5		24.4	23.4	22.4	22.1	21.4	21.9	21.3	22.1	22.7
M0129	CALUMA	2008	22.4	23.5	24.1	24.6	23.5	22.4	22.2	22	22.4	22.2	22.4	
M0129	CALUMA	2009	23.4	23.5	24.2	24.6	24	22.9	22.7	22.4	22.9	23.2	23.5	
M0129	CALUMA	2010	24.3	24.6	24.9	25.1	24.4	22.7	22.4	22.1	22.5	22.6	21.7	22.5
M0129	CALUMA	2011	23.3		24.5	24.4	24	23.2	22.6	21.9	22.7			22.5
M0129	CALUMA	2012	23.3		24.8	24.9	24.4							
M0129	CALUMA	2013	23.8	24.2	24.9	24.5	23.3	22.4	21.5	22.3	23.1	23	22.5	24
M0129	CALUMA	2014	23.7	23.7		24.9	24.1	23.8	23.1	22.5	22.5	22.6	23.1	24.1
M0129	CALUMA	2015	23.8	24.5	24.6	25.1	25	24.3						

Realizado por: INAMHI.

Mediante los datos obtenidos del INAMHI se realizan los cálculos respectivos para obtener la precipitación promedio de la estación:

TABLA 18 Datos de la estación utilizada para el modelo de temperatura.

Estación	Nombre	x	y	Altitud (msnm)	Provincia	Temperatura Media (C)
M0129	Caluma	689651	9820493	350	BOLIVAR	23.48

Realizado por: Elaboración propia con base en información del INAMHI.

Con los datos de la estación climatológica M0129 Caluma, ubicada a 350 m s. n. m., con una temperatura media anual de 23,48 °C. En ArcGIS la expresión general utilizada es:

$$T = ((DEM - Zref) / 100) \cdot G + Tref \quad (19)$$

Donde:

T = temperatura estimada para cada celda del ráster

DEM = elevación de cada celda del Modelo Digital del Terreno

Zref = altitud de referencia de la estación utilizada

G = gradiente térmico vertical

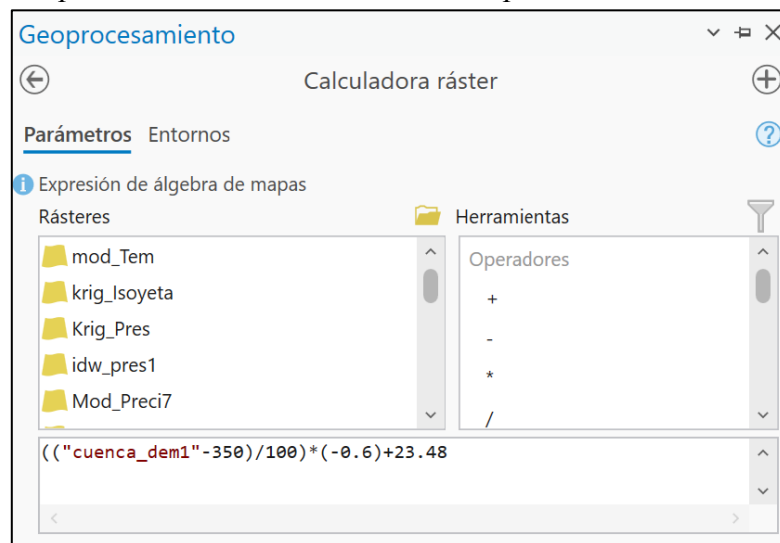
Tref = temperatura media anual de la estación de referencia

Para el presente caso se utilizó la siguiente expresión en la calculadora ráster de ArcGIS:

$$T = ((DEM - 350) / 100) \cdot (-0,6) + 23,48$$

Donde 350 m s. n. m. corresponde a la altitud de la estación M0129 Caluma, 23,48 °C corresponde a su temperatura media anual y -0,6 °C/100 m representa el gradiente térmico adoptado. Este valor indica que, por cada 100 m de incremento altitudinal, la temperatura disminuye aproximadamente 0,6 °C. Este criterio es coherente con el comportamiento general de la atmósfera, donde la temperatura tiende a reducirse con la altura. A partir de estos datos se generó un ráster continuo de temperatura, utilizando el MDT como superficie de elevación. El procedimiento consistió en ingresar la expresión altitudinal en la calculadora ráster, de manera que cada celda del modelo adopte un valor de temperatura estimado según su elevación. Posteriormente, la superficie resultante fue reclasificada para representar rangos térmicos y generar el mapa de isotermas.

Figura 30. Aplicación de la calculadora ráster para el modelo de temperatura.



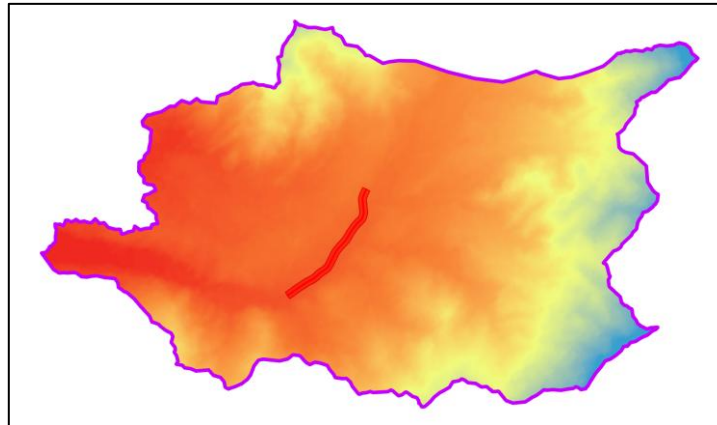
Realizado por: Elaboración propia.

Una vez obtenido el ráster de temperatura, se aplicaron procesos de interpolación y representación espacial para generar las isotermas. Los métodos de interpolación espacial permiten estimar valores en ubicaciones donde no existen mediciones directas

a partir de la información registrada en puntos de observación distribuidos sobre el territorio [102]. Entre los métodos más utilizados para la generación de superficies continuas se encuentran Inverse Distance Weighted (IDW) y Kriging.

El método Kriging incorpora la estructura de autocorrelación espacial de los datos mediante modelos geoestadísticos basados en semivariogramas, lo que permite obtener estimaciones que consideran la variabilidad espacial de la variable analizada [102].

Figura 31. Superficie ráster del modelo de temperatura.



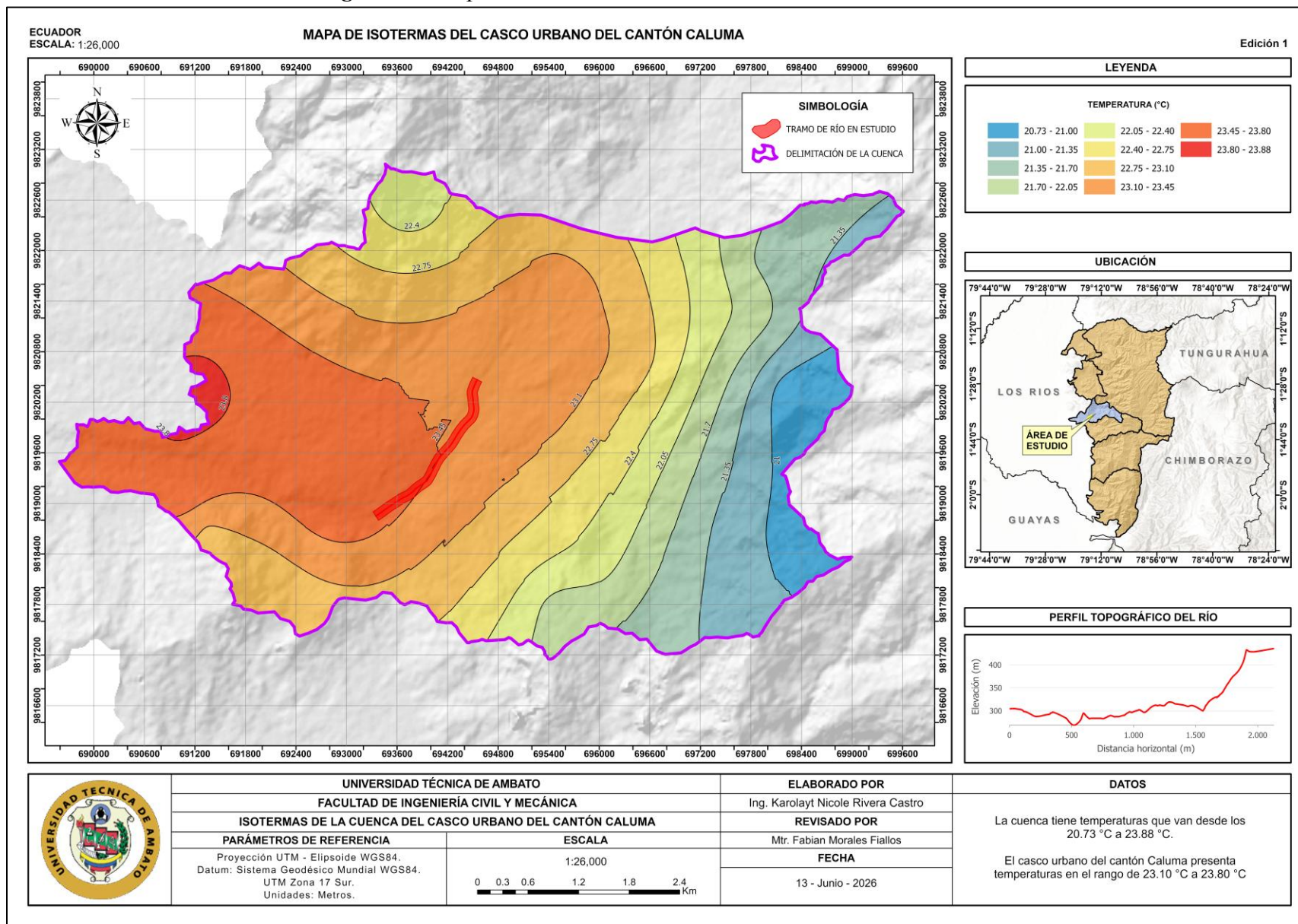
Realizado por: Elaboración propia.

Posteriormente, se elaboraron las isotermas con intervalos de 0.35°C , las cuales permiten representar la distribución espacial de la temperatura dentro del área de estudio.

El mapa de isotermas muestra que la cuenca presenta temperaturas aproximadas entre $20,73^{\circ}\text{C}$ y $23,88^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas más bajas se localizan hacia las zonas de mayor altitud, principalmente en el sector oriental de la cuenca, mientras que las temperaturas más altas se presentan en las zonas bajas y cercanas al casco urbano. En las áreas urbanas del cantón Caluma, la temperatura está predominantemente entre 23.10°C y 23.80°C , lo que corresponde con su baja elevación en la cuenca.

Este modelo puede usarse para representar la distribución espacial de la temperatura como una función del terreno y es una fuente adicional de información para el análisis hidrometeorológico de la cuenca. Además, puede utilizarse para relacionar las condiciones térmicas con otros procesos hidrológicos, por ejemplo, la evapotranspiración, la humedad del suelo y las variaciones climáticas locales.

Figura 32. Mapa de isotermas del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.7.3. Balance hídrico.

La evaluación de los recursos hídricos de una cuenca requiere una estimación adecuada del balance hidrológico, es decir, comprender la forma en que el agua recibida por precipitación se distribuye entre evapotranspiración, escorrentía superficial, infiltración y almacenamiento. El balance hídrico se fundamenta en el principio de conservación de masa, mediante el cual el agua que ingresa a un sistema debe ser equivalente al agua que sale, considerando también las variaciones del almacenamiento. El balance hídrico permite analizar las entradas, salidas y variaciones del almacenamiento de agua dentro de una cuenca hidrográfica. Su aplicación constituye una herramienta fundamental para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico y comprender la interacción entre los principales componentes del ciclo hidrológico. No obstante, su estimación puede presentar dificultades debido a la variabilidad espacial y temporal de variables como la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración y los cambios de almacenamiento dentro de la cuenca [46].

En general, parte del agua que cae sobre una cuenca regresa a la atmósfera a través de la evaporación directa y la transpiración de la vegetación; otra parte escurre por la superficie hasta entrar en la red de drenaje; y una fracción se infiltra en el suelo, lo que puede abastecer el almacenamiento subterráneo. En este estudio, el balance hídrico se calculó utilizando herramientas de análisis espacial en ArcGIS, usando el modelo de precipitación, el modelo de temperatura y la superficie de evapotranspiración real como principales insumos.

La expresión general del balance hídrico se puede representar de la siguiente manera:

$$P - ETR = Esc \quad (20)$$

Donde:

P = precipitación anual

ETR = evapotranspiración real

Esc = escorrentía o excedente hídrico estimado

5.6.7.3.1. Modelo de evapotranspiración y escorrentía.

El modelo de evapotranspiración y escorrentía se desarrolló a partir de superficies ráster generadas previamente para precipitación y temperatura. Mediante la calculadora ráster de ArcGIS se aplicaron expresiones matemáticas para estimar la evapotranspiración potencial, la evapotranspiración real y, finalmente, la escorrentía expresada en milímetros. La herramienta Raster Calculator permite crear expresiones de álgebra de mapas para generar nuevos rústers mediante operaciones matemáticas y

lógicas entre capas espaciales. Esta funcionalidad facilita el procesamiento y análisis de información geográfica, permitiendo integrar variables raster para obtener nuevos productos cartográficos utilizados en la modelación y evaluación espacial [102].

Este procedimiento permite representar espacialmente la distribución del agua dentro de la cuenca, identificando zonas donde predominan mayores pérdidas por evapotranspiración y sectores donde se genera mayor escorrentía superficial.

5.6.7.3.2. Cálculo de la evapotranspiración potencial.

El concepto de evapotranspiración potencial fue desarrollado para representar la cantidad máxima de agua que podría perder una superficie cubierta de vegetación activa, bajo condiciones en las que existe humedad suficiente en el suelo. Thornthwaite (1948) introdujo este concepto dentro de los estudios climáticos e hidrológicos, relacionándolo con la disponibilidad energética y las condiciones atmosféricas.

En este estudio se generó una superficie de evapotranspiración potencial o parámetro térmico de evapotranspiración mediante herramientas de análisis espacial de ArcGIS. Para ello, se utilizó como insumo principal el modelo de temperatura previamente obtenido y se aplicó en la calculadora ráster la expresión empleada en el método de Turc:

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (21)$$

Donde:

L = parámetro térmico de evapotranspiración

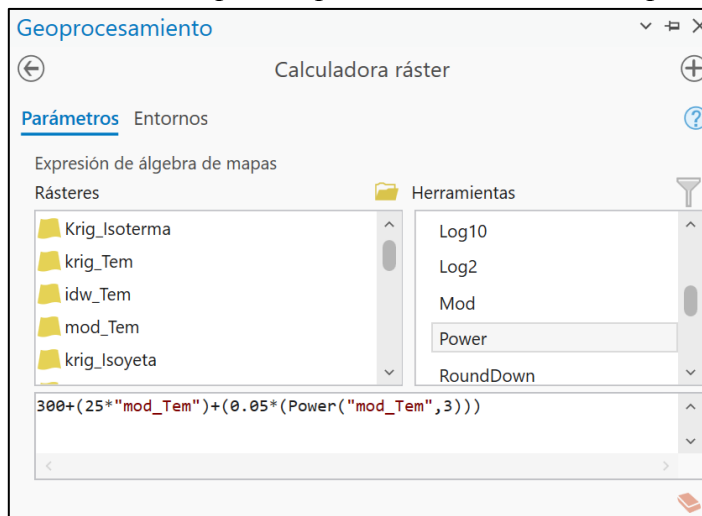
T = temperatura media anual en °C

En ArcGIS, la expresión aplicada fue:

$$300 + (25 * \text{"mod_Tem"}) + (0.05 * \text{Power}(\text{"mod_Tem"}, 3))$$

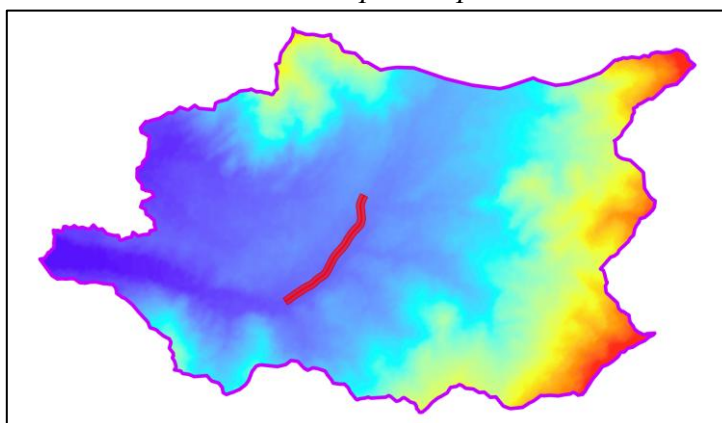
Este proceso permitió generar una superficie ráster que representa la variación espacial del parámetro térmico asociado con la evapotranspiración. La superficie resultante muestra cómo las áreas con temperaturas más altas tienen valores más altos, mientras que aquellas a mayor altitud y menor temperatura tienen valores más bajos. Este ráster se utiliza para calcular la evapotranspiración real.

Figura 33. Cálculos ráster para el parámetro térmico de evapotranspiración.



Realizado por: Elaboración propia.

Figura 34. Superficie de evapotranspiración potencial o parámetro térmico de evapotranspiración.



Realizado por: Elaboración propia.

Culminado este proceso, se obtuvo la superficie de evapotranspiración potencial, entendida como una aproximación espacial de la capacidad atmosférica para extraer agua desde la superficie mediante evaporación y transpiración vegetal.

5.6.7.3.3. Cálculo de la evapotranspiración real.

La evapotranspiración real representa la cantidad efectiva de agua que retorna a la atmósfera, considerando las condiciones reales de disponibilidad hídrica en el suelo. A diferencia de la evapotranspiración potencial, esta depende no solo de la demanda atmosférica, sino también de la precipitación disponible y de la humedad que puede

retener el suelo. Cuando el suelo se seca, la evapotranspiración real disminuye por debajo de la potencial. Para estimar la evapotranspiración real se utilizó el método de Turc, el cual relaciona la precipitación anual con el parámetro térmico calculado a partir de la temperatura media anual. La fórmula empleada fue:

$$ETR = P / \sqrt{(0,9 + (P^2 / L^2))}^3 \quad (22)$$

Donde:

ETR = evapotranspiración real anual

P = precipitación anual

L = parámetro térmico de evapotranspiración

En la calculadora ráster de ArcGIS se aplicó la siguiente expresión:

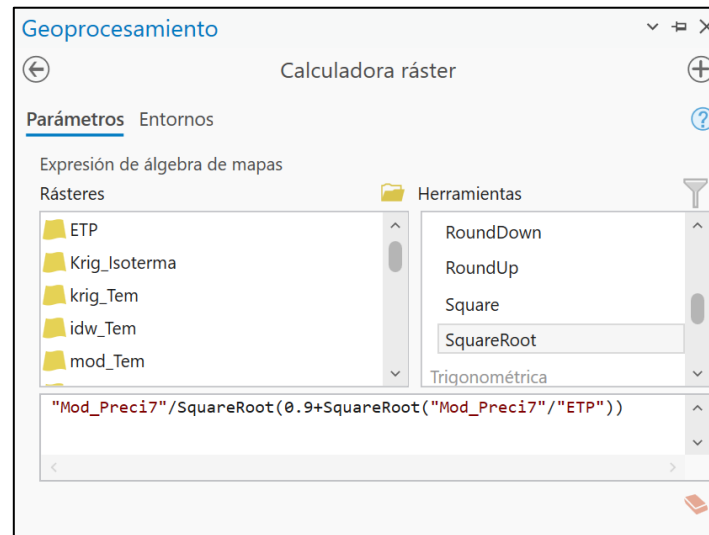
"Mod_Preci7" / SquareRoot(0.9 + SquareRoot("Mod_Preci7" / "ETP"))

No obstante, para mantener coherencia con la fórmula de Turc, la expresión debe verificarse cuidadosamente, debido a que el método utiliza la relación P^2/L^2 dentro de la raíz. La expresión recomendada sería:

"Mod_Preci7" / SquareRoot(0.9 + Power("Mod_Preci7", 2) / Power("ETP", 2))

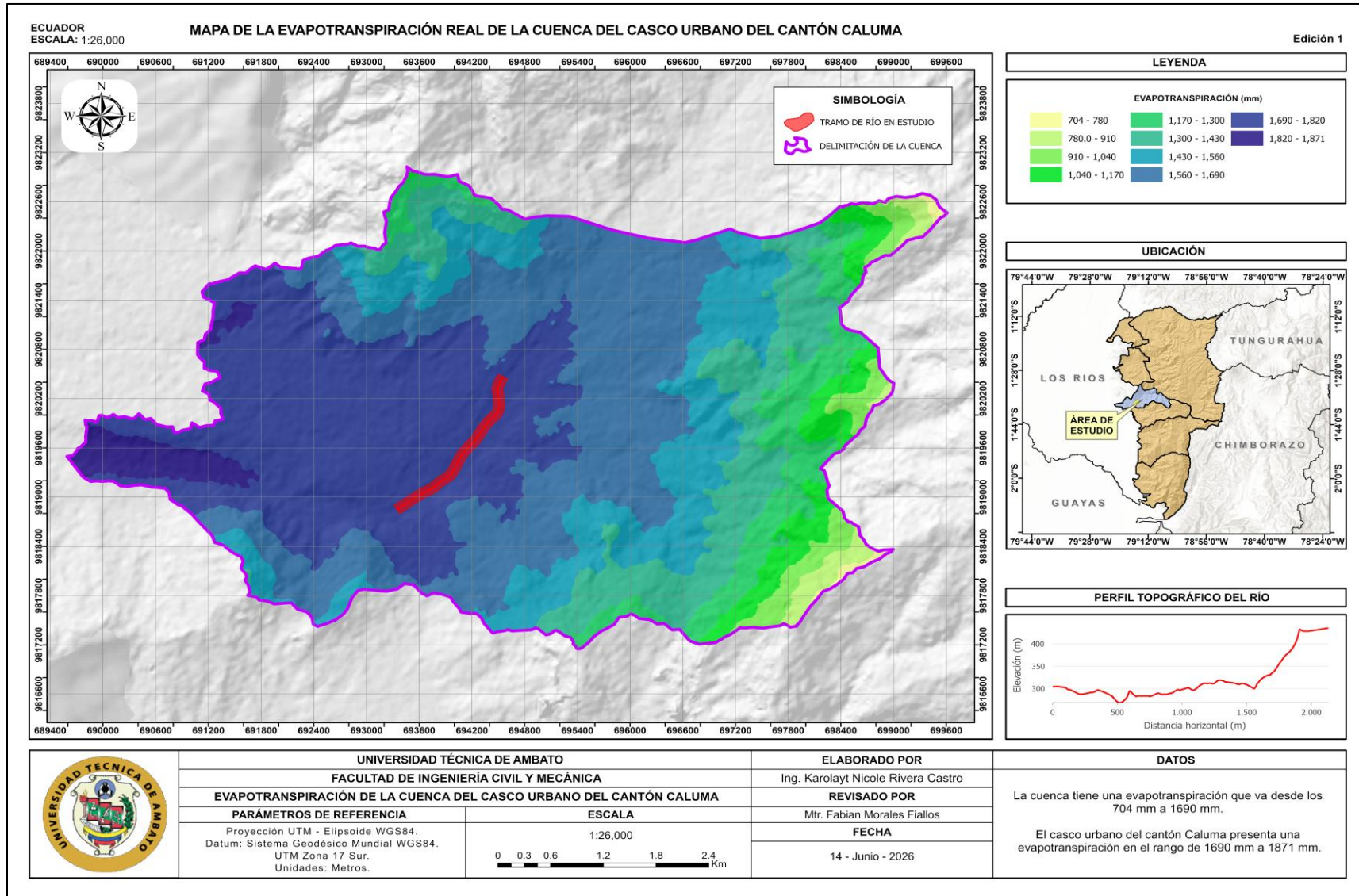
Con este procedimiento se obtuvo la superficie de evapotranspiración real de la cuenca. El mapa resultante indica valores aproximados entre **704 mm y 1871 mm**. En el casco urbano del cantón Caluma, la evapotranspiración real se ubica principalmente entre **1690 mm y 1871 mm**, lo que evidencia una pérdida importante de agua hacia la atmósfera, asociada a las condiciones de temperatura, precipitación y disponibilidad hídrica.

Figura 35. Aplicación de la calculadora ráster para el cálculo de la evapotranspiración real.



Realizado por: Elaboración propia.

Figura 36. Mapa de evapotranspiración real de la cuenca del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.7.3.4. Cálculo de la escorrentía en mm.

Una vez obtenida la evapotranspiración real y el modelo de precipitación, se procedió a determinar la escorrentía o excedente hídrico en milímetros. Para ello, se aplicó el balance hídrico simplificado, restando la evapotranspiración real al modelo de precipitación. Esta operación permite estimar la cantidad de agua que queda disponible para escurrir superficialmente o incorporarse al sistema de drenaje.

La fórmula empleada fue:

$$\text{Esc} = P - \text{ETR} \quad (23)$$

Donde:

Esc = escorrentía o excedente hídrico en mm

P = precipitación anual en mm

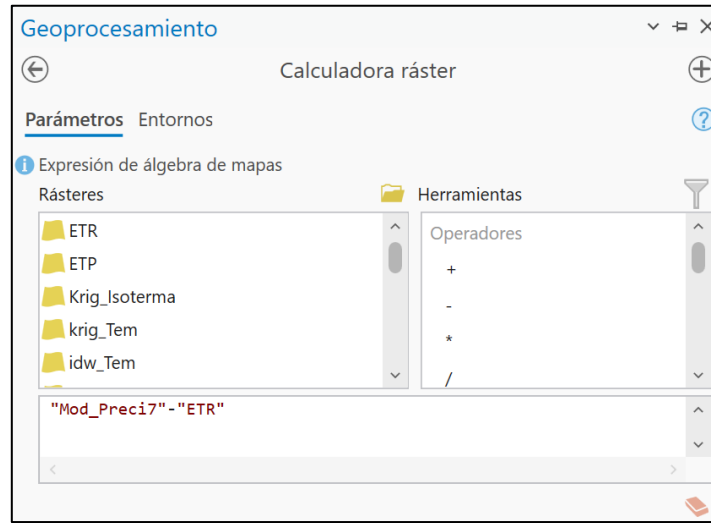
ETR = evapotranspiración real en mm

En la calculadora ráster de ArcGIS se aplicó la siguiente expresión:

"Mod_Preci7" - "ETR"

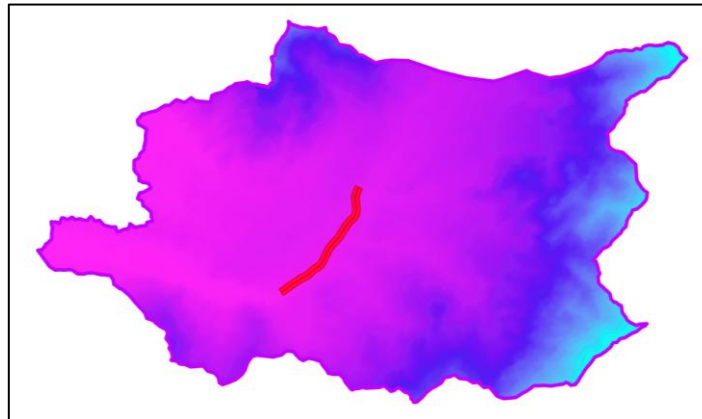
Con esto se obtuvo la superficie de escorrentía de la cuenca, representando espacialmente las zonas con mayor y menor excedente hídrico. El mapa generado muestra que el área de estudio presenta valores de escorrentía variables, con mayores valores en los sectores donde la precipitación supera ampliamente las pérdidas por evapotranspiración.

Figura 37. Aplicación de la calculadora ráster para el cálculo de escorrentía en mm.



Realizado por: Elaboración propia.

Figura 38. Superficie ráster de escorrentía estimada en la cuenca.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.7.3.5. Conversión de la escorrentía a m³.

Para transformar la escorrentía expresada en milímetros a volumen de agua en metros cúbicos, se consideró el tamaño del píxel del MDT. Este procedimiento permite calcular el volumen de agua correspondiente a cada celda del ráster, tomando en cuenta la profundidad de escorrentía y el área de cada píxel.

La expresión general utilizada fue:

$$V = (Esc / 1000) \cdot Ap \quad (24)$$

Donde:

V = volumen de escorrentía por celda en m^3

Esc = escorrentía en mm

A_p = área del píxel en m^2

Considerando que el tamaño del píxel empleado fue de $4\text{ m} \times 4\text{ m}$, el área de cada celda corresponde a:

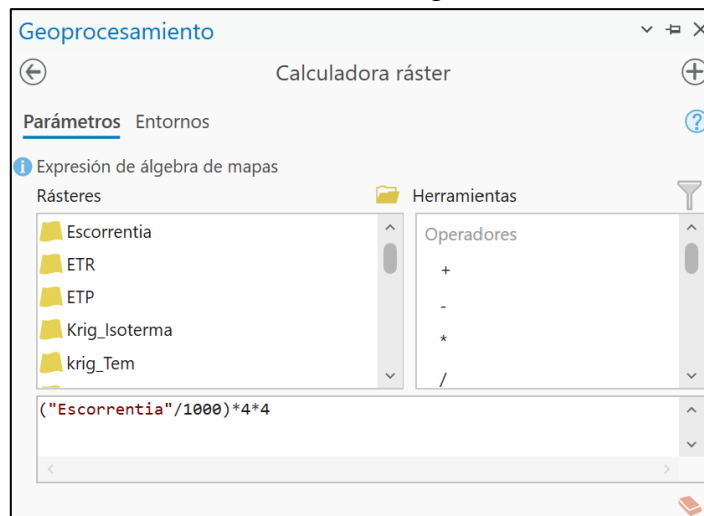
$$A_p = 4\text{ m} \times 4\text{ m} = 16\text{ m}^2$$

Por lo tanto, la expresión aplicada en la calculadora ráster fue:

$$("Escorrentia" / 1000) * 4 * 4$$

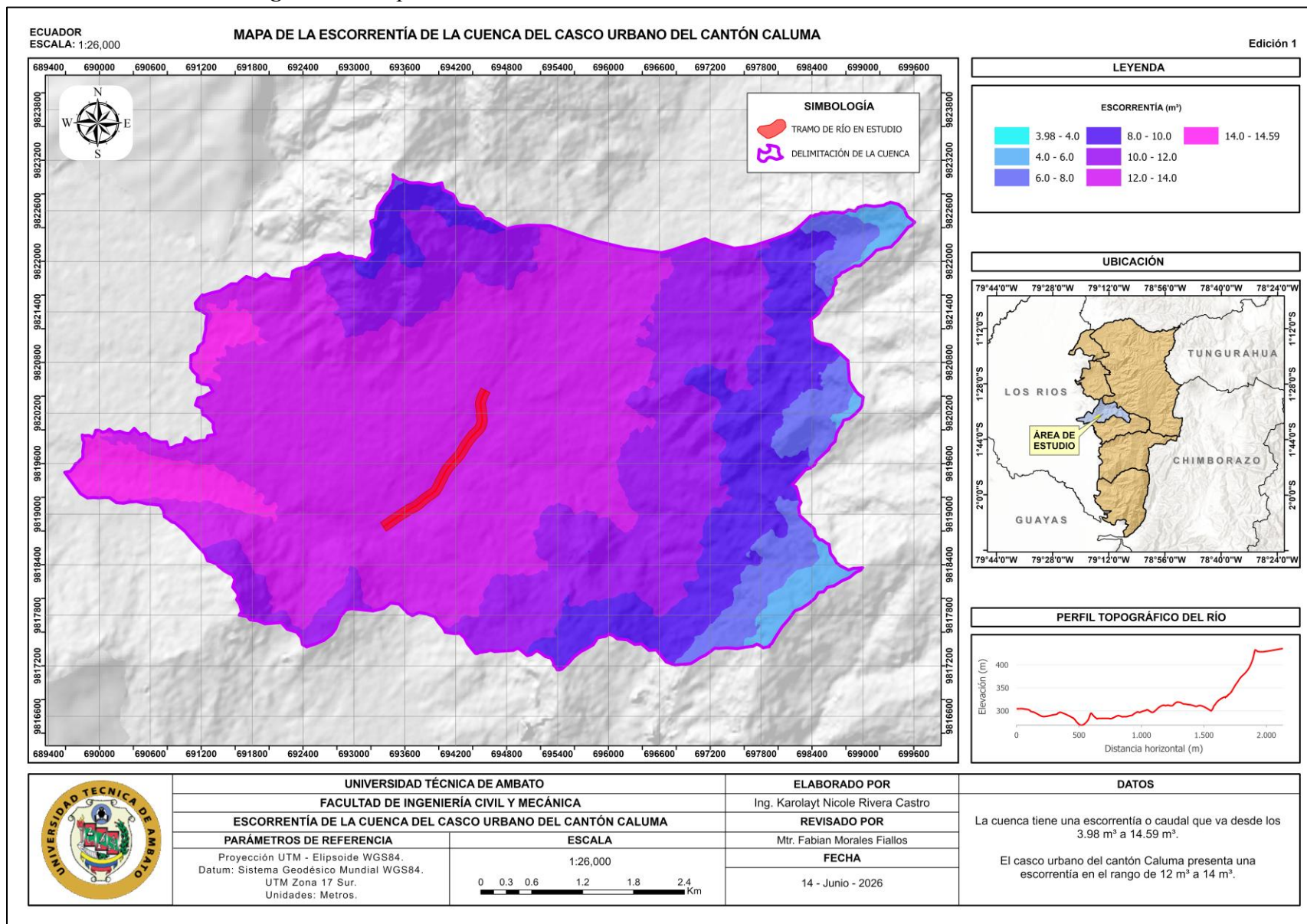
Con este procedimiento se obtuvo la escorrentía en metros cúbicos por celda. Los valores resultantes varían aproximadamente entre $3,99\text{ m}^3$ y $14,59\text{ m}^3$, lo que representa el volumen estimado de escorrentía generado en cada píxel de acuerdo con la profundidad de escorrentía calculada previamente.

Figura 39. Aplicación de la calculadora ráster para conversión de escorrentía a m^3 .



Realizado por: Elaboración propia.

Figura 40. Mapa de escorrentia de la cuenca del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.7.3.6. Cálculo del caudal o volumen total de escorrentía.

Finalmente, se calcularon las estadísticas zonales para determinar el volumen total de escorrentía generado dentro de la cuenca. Para ello, se utilizó como zona de análisis el polígono de la cuenca y como ráster de valor la superficie de escorrentía convertida a metros cúbicos. Este procedimiento permitió obtener el área total, valor mínimo, valor máximo, media, desviación estándar y sumatoria de escorrentía.

La herramienta Zonal Statistics as Table permite resumir los valores de un ráster dentro de las zonas definidas por otra capa espacial, generando estadísticas descriptivas como la suma, media, mínimo, máximo, desviación estándar y otras medidas de tendencia central y dispersión [102].

En la presente investigación, la estadística de mayor interés corresponde a la sumatoria (Sum), ya que representa el volumen total estimado de agua generado dentro de la cuenca a partir del ráster de escorrentía. Este resultado constituye un insumo fundamental para la cuantificación del recurso hídrico disponible y para el análisis hidrológico desarrollado en el área de estudio.

Rowid	ENTITY	ZONE-CODE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	MEDIAN	PCT90
1	LWPPolyline	1	2268968	36303488	3.98611	14.593088	10.606978	11.538993	2.119124	26181606.018437	12.174811	13.712309

Los resultados obtenidos indican una escorrentía mínima de 3,99 m³, una máxima de 14,59 m³, una media de 11,54 m³. Un volumen total aproximado de:

$$V_{\text{total}} = 26\ 181\ 606,02\ \text{m}^3$$

Este valor representa el volumen total estimado de agua que se genera como escorrentía dentro de la cuenca mensualmente, bajo las condiciones de precipitación y evapotranspiración consideradas. Dicho resultado constituye un insumo importante para el análisis hidrológico posterior.

Este volumen se convierte en caudal normal-medio, mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (25)$$

Donde:

Q = caudal en m³/s

V = volumen de escorrentía en m³

t = tiempo en segundos

$$Q = \frac{26181606.02 \text{ m}^3}{2592000 \text{ s}}$$

$$Q = 10.10 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sin embargo, también se necesita el caudal máximo, mismo que se calcula empleando el Método Racional.

La expresión matemática usada es:

$$Q = 0.278 * C * I * A \quad (26)$$

Donde:

Q = Caudal de crecida (m³/s)

C = Coeficiente de escorrentía

I = Intensidad de la lluvia

A = Área de la cuenca (km²)

$$T_r = \frac{C_t * (L * L_c)^{0.35}}{5.5} \quad (27)$$

Donde:

Tr = Tiempo de duración normal de la lluvia

L = Longitud del cauce principal, Km

Lc = Distancia desde el centro de gravedad de la cuenca hasta el sitio de interés

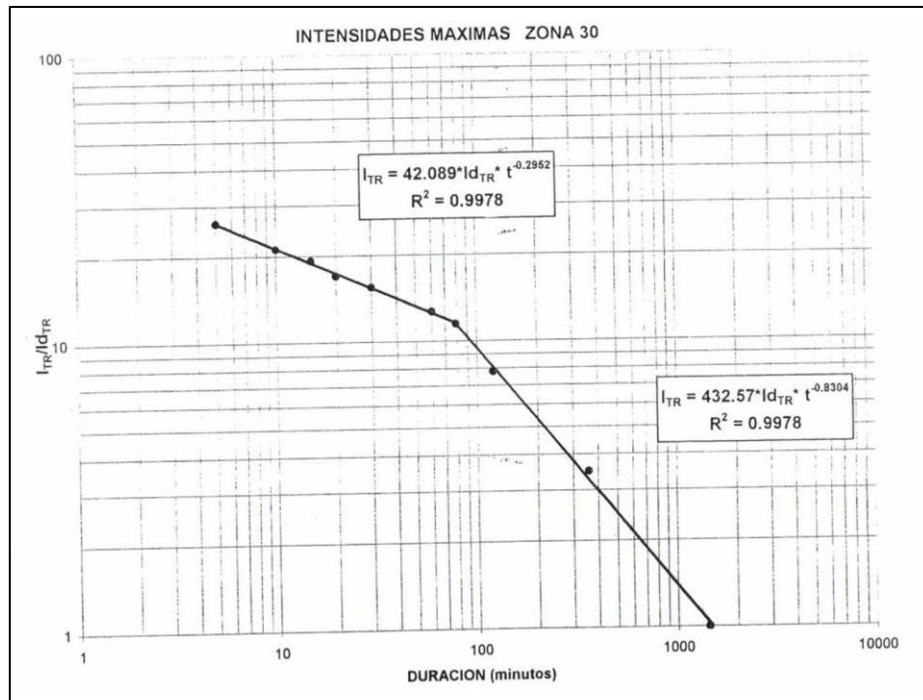
Ct = Varía entre 1,35 a 1,65; para pendientes fuertes 1,35 y para pendientes suaves 1,65

$$T_r = \frac{1.65 * (8 * 5.53)^{0.35}}{5.5}$$

$$T_r = 1.13 \text{ h} = \mathbf{67.81 \text{ min}}$$

De acuerdo al INAMHI, la ecuación representativa de estaciones pluviográficas para el cálculo de intensidades máximas corresponde a la zona 30, con una duración 5 min a 79 min:

Figura 41. Curvas IDF para la zona 30.



Realizado por: Inamhi (1999).

$$I_{Tr} = 42.089 \cdot t^{-0.2952} \cdot I_{dTr} \quad (28)$$

Donde:

I_{Tr} = Intensidad de lluvia

t = tiempo de duración de la intensidad (min)

I_{dTr} = Intensidad máxima en 24 horas en un periodo de retorno de 25 años.

$$I_{Tr} = 42.089 \cdot t^{-0.2952} \cdot I_{dTr}$$

$$I_{Tr} = 42.089 \cdot 67.81^{-0.2952} \cdot 0.43$$

$$I_{Tr} = 5.21$$

Para el cálculo del valor de C, se acudió al análisis de los datos del suelo y la vegetación y, los criterios del Manual de Drenaje del MTOP expresados en la siguiente tabla. En el siguiente cuadro se expone un resumen de los coeficientes de escurrimiento más comunes:

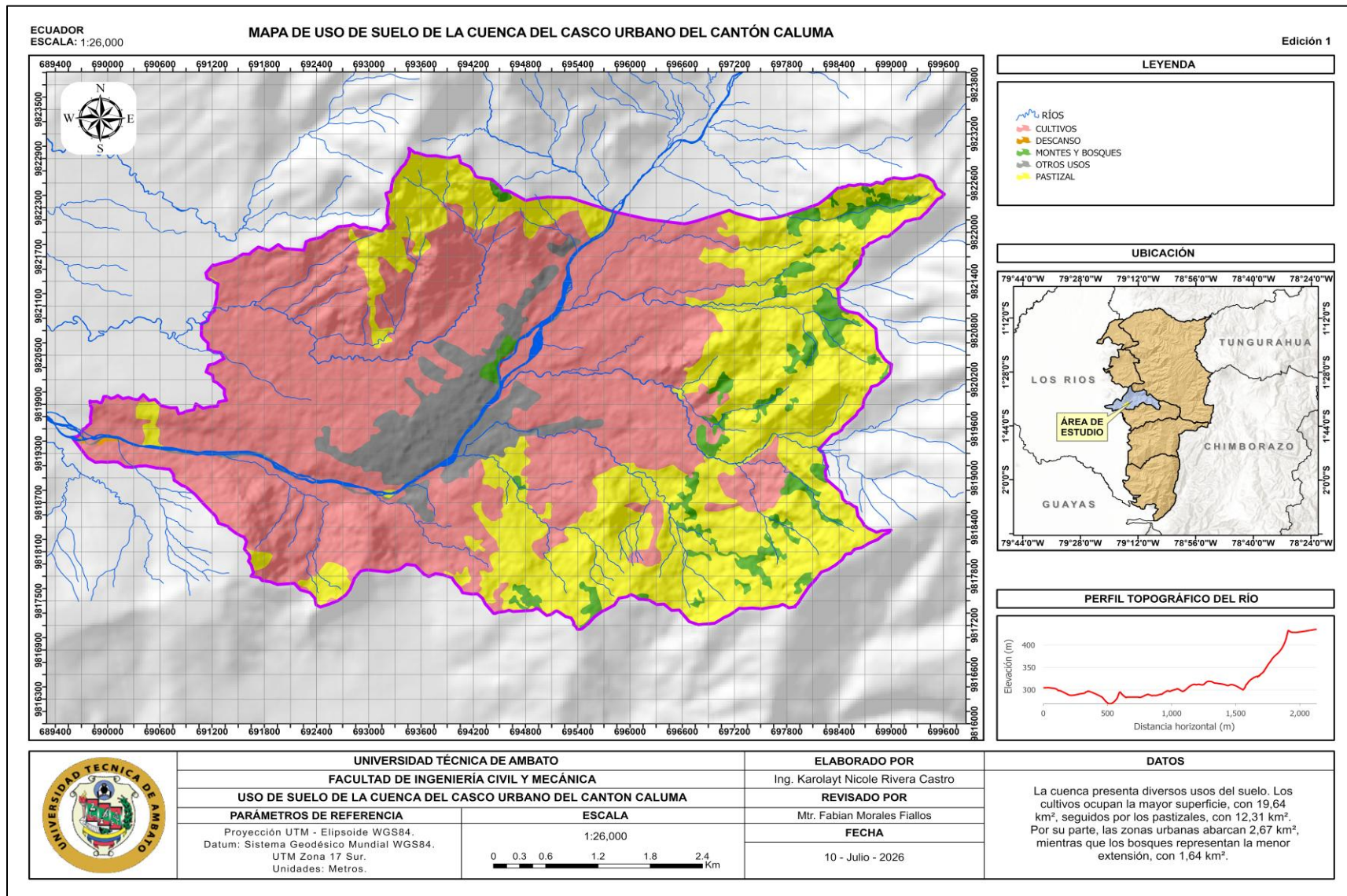
TABLA 19. Rangos para la determinación del coeficiente de escorrentía.

Cobertura Vegetal	Tipo de Suelo	Pendiente Del Terreno				
		Pronunciada	Alta	Media	Suave	Desprec.
		> 50 %	20 %	5 %	1 %	< 1 %
Sin Vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pastos, Vegetacion Ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierba, Grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosques, Densa Vegetación	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Realizado por: MTOP (2013).

El valor del coeficiente de escurrimiento empleado corresponde a un promedio ponderado de los valores individuales a las diferentes combinaciones del complejo suelo (permeabilidad) – vegetación (densidad de la cobertura).

Figura 42. Mapa de uso de suelo de la cuenca del casco urbano.



Realizado por: Elaboración propia a partir de los datos del MAATE (2022).

Siendo una zona de características permeables, suelos alofánicos, donde la cuenca presenta pendientes de planas a medias y vegetación predominante de pradera permeable, se escoge un valor del coeficiente de escurrimiento promedio, igual a:

$C = 0.68$, coeficiente para el proyecto.

El caudal máximo se calcula por el método racional:

$$Q = 0.278 * C * I * A$$

$$Q = 0.278 * 0.68 * 5.21 * 36.29$$

$$Q = 35.74 \text{ m}^3/\text{s}$$

5.6.8. Análisis hidrológico y espacial para el tramo del río en estudio.

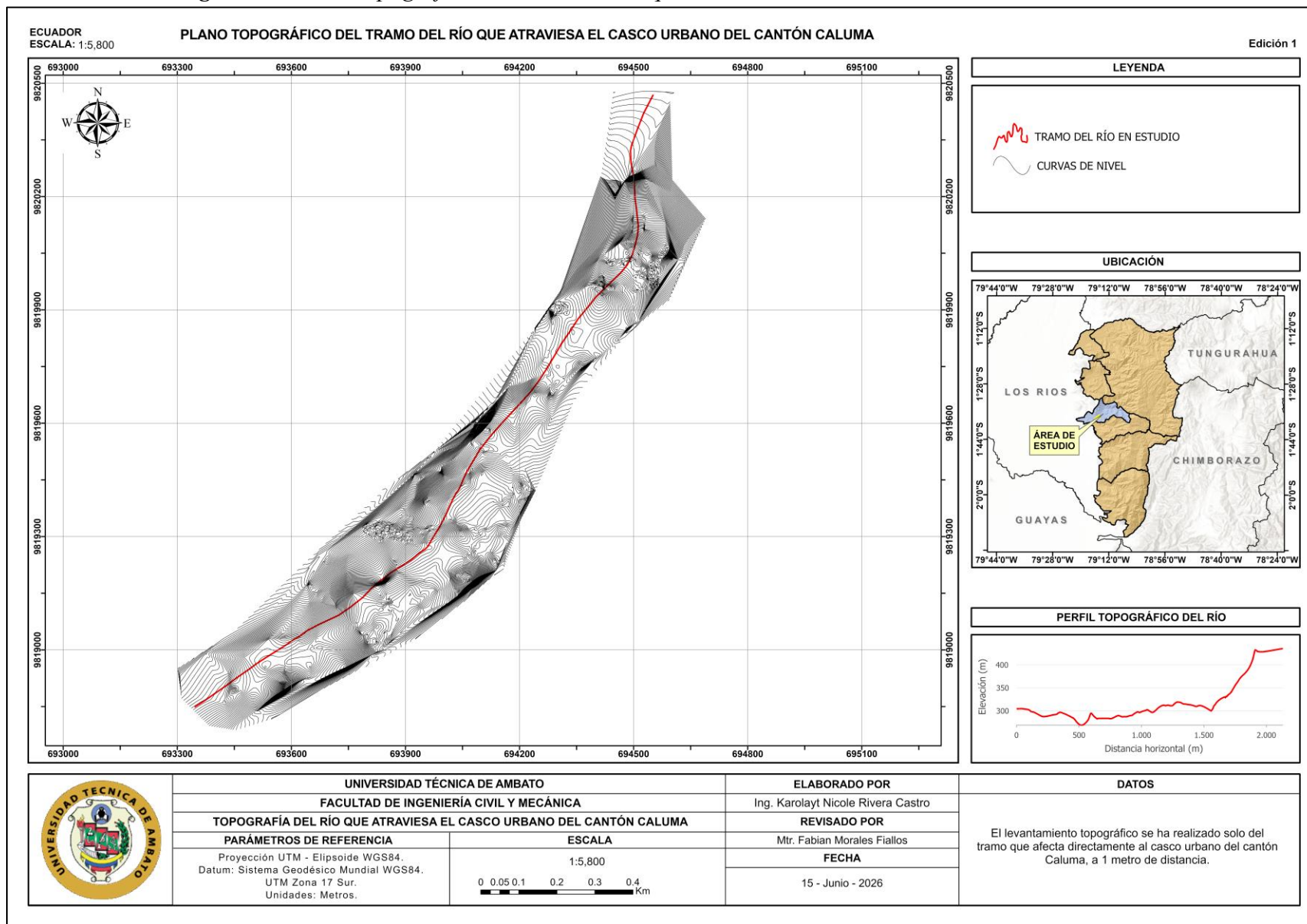
La entrada principal fue la topografía que se levantó en el campo utilizando un dron y equipo RTK. Esta información permitió una representación detallada del lecho del río, las orillas, las terrazas cercanas, las diferencias de nivel y la configuración del relieve inmediato del río. La calidad de la información topográfica es crucial en este tipo de análisis porque el modelo hidráulico depende directamente de la geometría del terreno, las secciones transversales, la pendiente del canal y la forma del valle del río.

Para determinar el área de la cuenca que tiene influencia directa sobre el tramo del río que atraviesa el casco urbano del cantón Caluma, se realizó un análisis espacial a partir de la red hídrica, los puntos de cruce y las unidades de drenaje previamente delimitadas. Este procedimiento permitió identificar qué parte de la cuenca descarga directamente hacia el tramo urbano analizado. Luego del análisis de cruces entre la red hídrica y las unidades generadas mediante la herramienta *Watershed*, se determinó que el área de aporte con efecto directo sobre el tramo del río en estudio es:

$$A = 23,07 \text{ km}^2$$

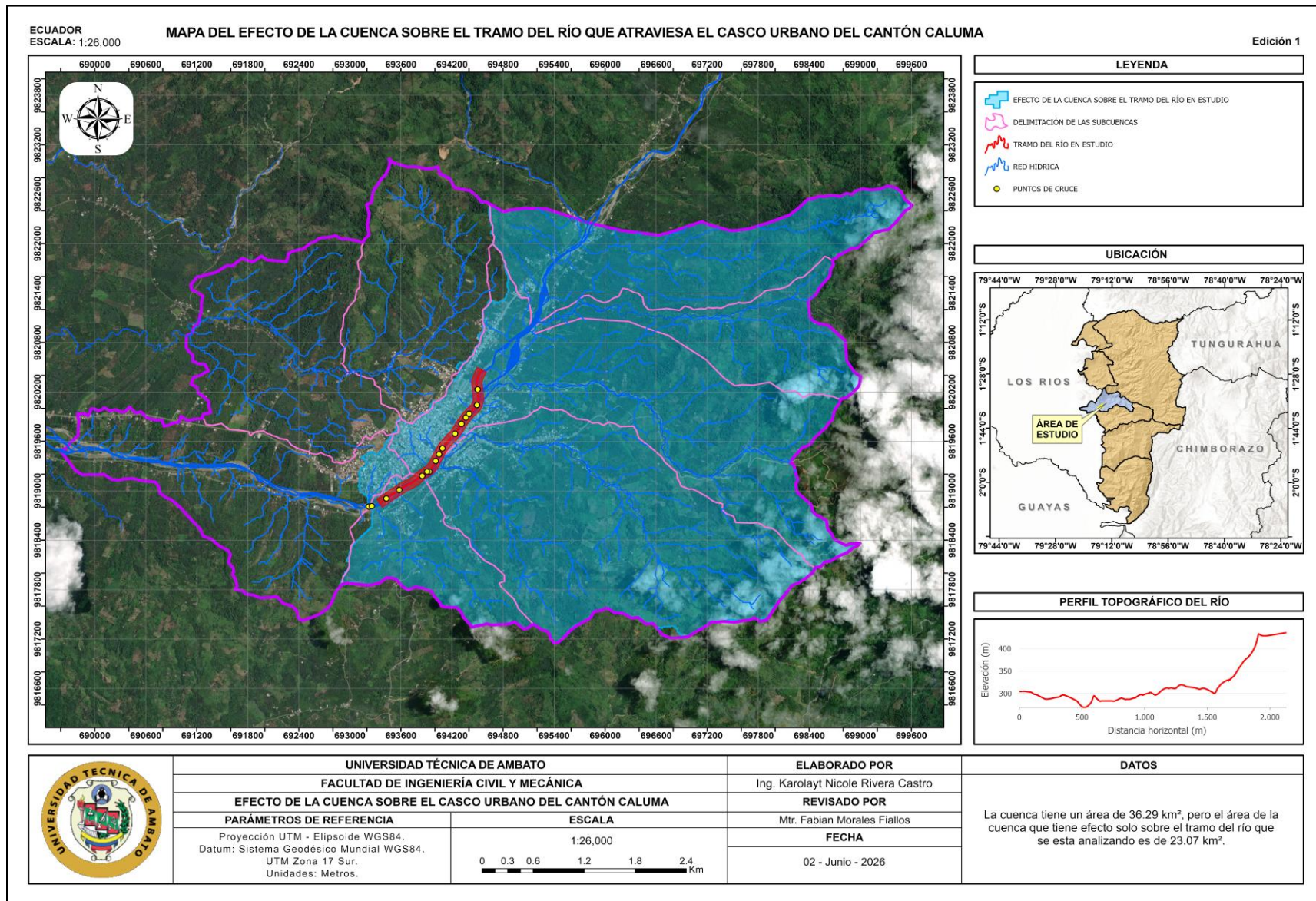
Esta cifra es importante porque permite sectorizar el análisis hidrológico e hidráulico. Aunque la cuenca total posee un área de 36,29 km², no toda esa superficie descarga de manera directa sobre el tramo urbano considerado. Por ello, para el análisis del tramo específico del río Caluma se toma como referencia el área de influencia directa de 23,07 km², evitando aplicar de forma general los resultados de toda la cuenca a un sector que recibe aportes diferenciados.

Figura 43. Plano topográfico del tramo del río que atraviesa el casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

Figura 44. Efecto de la Cuenca Sobre el Casco Urbano del Cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia

El mapa permite observar que el tramo del río en estudio se encuentra dentro de una zona receptora de escorrentía proveniente de diferentes sectores de la cuenca. Los puntos de cruce identificados indican lugares donde la red hídrica interactúa con el río principal o con el área urbana, por lo que constituyen sectores relevantes para el análisis hidráulico posterior. Esta información permite reconocer la relación entre la cuenca aportante, el cauce principal y las zonas urbanas potencialmente expuestas a crecidas.

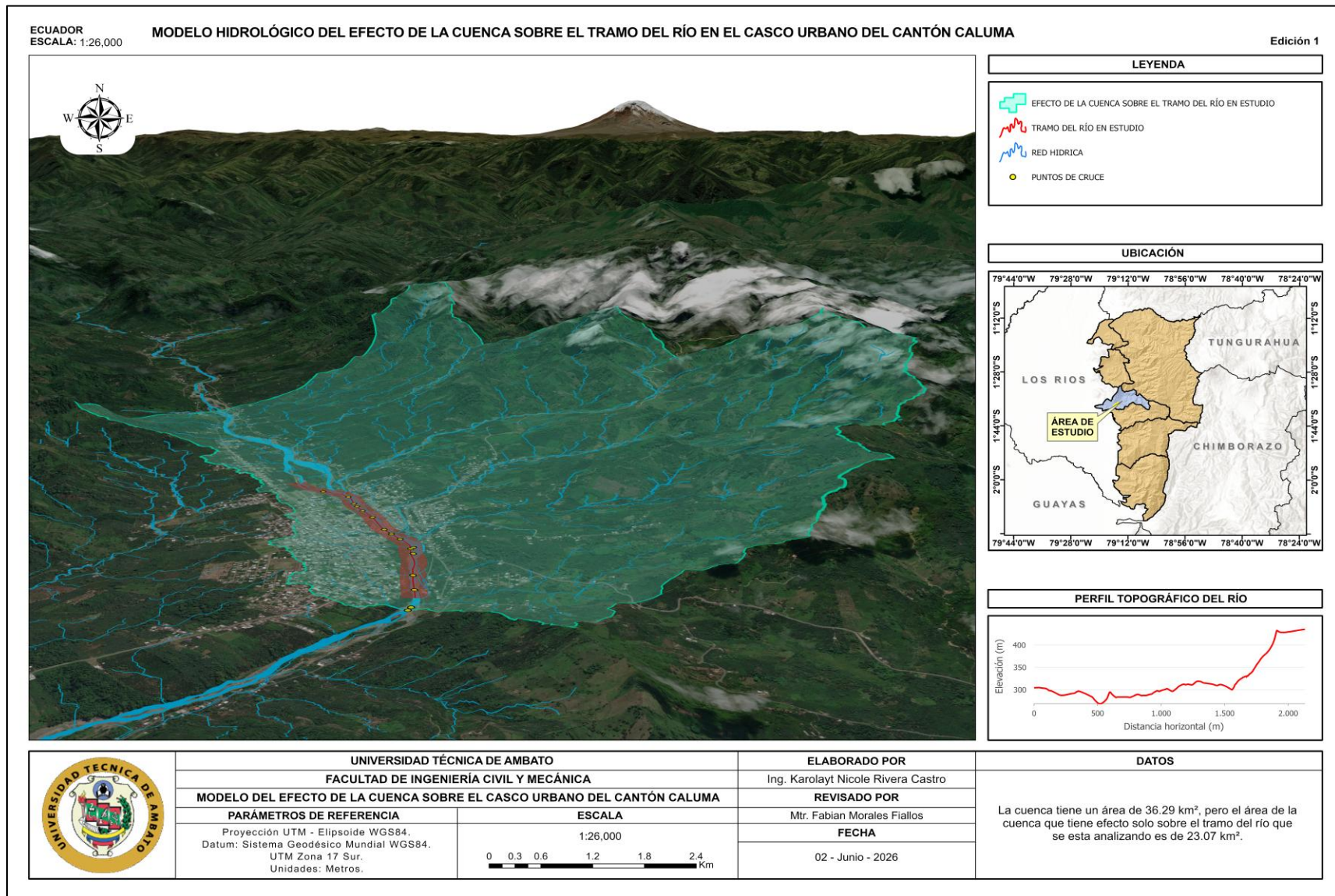
5.6.8.1. Modelo hidrológico.

El modelo hidrológico en vista isométrica de la sección del río en el área urbana del cantón Caluma permite una interpretación en 3D de la interacción entre el terreno, la red hídrica y el canal principal que cruza el área de estudio. El modelo muestra que la cuenca contribuyente cubre una amplia área de pendientes y zonas montañosas desde donde se genera escorrentía superficial que desciende gradualmente hacia el río. La red hídrica muestra múltiples drenajes secundarios y terciarios que convergen hacia el canal principal. Esto significa que la sección analizada recibe aportes de diferentes sectores de la cuenca.

La sección del río bajo estudio se encuentra en una zona baja del sistema hidrográfico y entra directamente en el área urbana, por lo que se ve afectada por los flujos generados aguas arriba. La cuenca total abarca 36.29 km², y la parte aguas arriba de la cuenca tiene 23.07 km² de influencia directa sobre la sección del río analizada. Esto indica que gran parte de la cuenca contribuye al área urbana, lo que hace que los flujos se concentren durante eventos de precipitación intensa.

Asimismo, el perfil topográfico del río, así como a diferentes alturas a lo largo de la sección, también está inclinado con pendientes moderadas y la elevación aumenta hacia el final del perfil. Esta configuración del terreno afecta la velocidad del flujo y la capacidad de transporte de sedimentos, así como la velocidad del flujo y la cantidad de escorrentía hacia el canal principal. En resumen, el modelo hidrológico muestra que la sección del río en el área urbana del cantón Caluma se ve afectada directamente por el agua de la cuenca.

Figura 45. Modelo hidrológico del Efecto de la Cuenca Sobre el Casco Urbano.



Realizado por: Elaboración propia.

Para la gestión de riesgos, el modelo muestra que las áreas ribereñas deben considerarse una prioridad para las acciones de mantenimiento, control de erosión, protección de márgenes y regulación del uso del suelo. De manera similar, los sectores donde la red de agua se encuentra con áreas urbanas o infraestructura deben ser inspeccionados para encontrar la capacidad hidráulica, obstrucciones y condiciones de estabilidad de márgenes.

Finalmente, este modelo constituye una base técnica para el modelamiento hidráulico del río Caluma, ya que permite relacionar el área de aporte, la topografía del cauce, la red de drenaje y la ubicación del casco urbano. La información generada servirá como insumo para definir la geometría del modelo hidráulico, seleccionar secciones de análisis, incorporar caudales de entrada y evaluar el comportamiento del flujo en el tramo urbano.

5.6.9. Integración de resultados para la evaluación hidráulica y zonificación cartográfica preventiva.

En cumplimiento de los objetivos tercero y cuarto, evaluamos el comportamiento hidráulico del río Caluma en la sección de la ciudad del cantón Caluma, y los resultados hidrológicos e hidráulicos se integran en un Sistema de Información Geográfica. Se tienen en cuenta la topografía del canal, la rugosidad, el flujo de entrada, la malla computacional y las condiciones de contorno utilizando datos oficiales, así como la modelización del flujo hidráulico. Posteriormente, los resultados obtenidos fueron procesados cartográficamente para generar una base espacial que permitió delimitar las zonas susceptibles a inundación, crecidas y procesos de socavación en el casco urbano del cantón Caluma.

5.6.9.1. Susceptibilidad a inundaciones.

Para la evaluación de la susceptibilidad a inundaciones se trabajó con la metodología propuesta por la Secretaría de Gestión de Riesgos, la cual plantea la elaboración de cartografía de amenaza mediante el análisis multicriterio de factores físicos, hidrológicos y territoriales. La metodología empleada considera que la amenaza por inundación puede estimarse mediante la integración de mapas temáticos previamente reclasificados y ponderados, incorporando variables como la saturación del suelo, la permeabilidad, las zonas de acumulación, el uso y cobertura vegetal, y la precipitación [104].

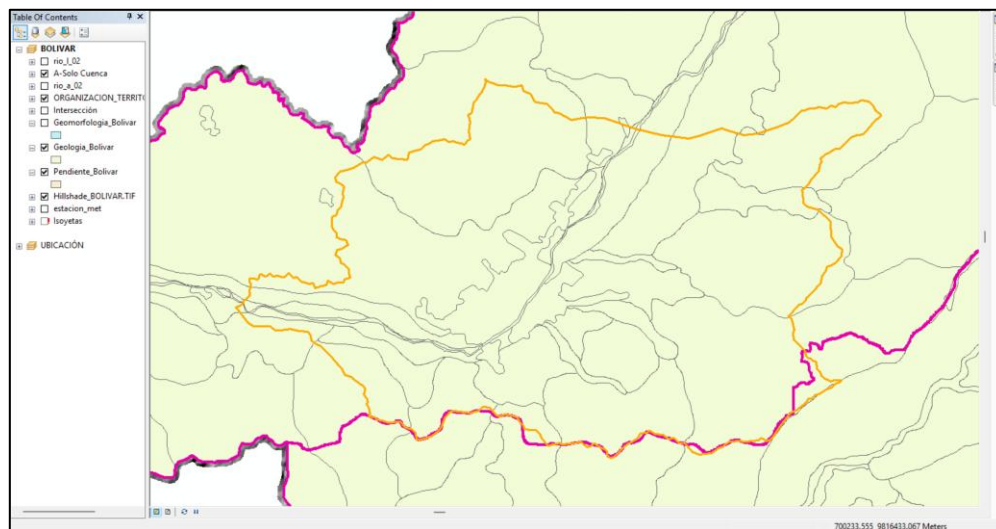
Una vez obtenidos los mapas correspondientes a cada uno de estos factores, estos son integrados mediante análisis espacial para generar un índice de amenaza o susceptibilidad. Posteriormente, el resultado es reclasificado en categorías de

susceptibilidad, tales como muy baja, baja, media y alta, facilitando la identificación y delimitación de las zonas con mayor probabilidad de inundación dentro del área de estudio [104].

En el presente estudio, la unidad de análisis corresponde a la cuenca hidrográfica que aporta al tramo del río Caluma que atraviesa el casco urbano del cantón Caluma. Para ello, se consideraron factores condicionantes y desencadenantes. Los factores condicionantes corresponden a las características físicas del terreno que favorecen o limitan la ocurrencia de inundaciones, tales como pendiente, geomorfología, relieve y geología. Por otra parte, el factor desencadenante corresponde principalmente a la precipitación, debido a que las lluvias intensas incrementan la generación de escorrentía superficial y pueden producir anegamientos o desbordamientos en zonas bajas.

Las capas de información utilizadas fueron obtenidas de fuentes oficiales y bases cartográficas disponibles, tales como SIGTIERRAS, MATE, MAG y cartografía temática nacional. Posteriormente, estas capas fueron procesadas en ArcGIS con el objetivo de recortarlas al área de la cuenca, reclasificarlas y asignarles valores de ponderación según su influencia en la generación de zonas susceptibles a inundación.

Figura 46. Capas temáticas utilizadas para el análisis de susceptibilidad a inundaciones.



Realizado por: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó una intersección espacial con el objetivo de unir las capas correspondientes a los factores condicionantes en un solo archivo tipo *shapefile*. Este procedimiento permitió integrar en una misma tabla de atributos los valores ponderados de pendiente, geomorfología, relieve y geología. La metodología establece que los

factores que intervienen en la evaluación de la amenaza por inundación deben representarse mediante mapas temáticos previamente reclasificados, a los cuales se asigna un peso de acuerdo con su importancia relativa dentro del análisis de susceptibilidad. Posteriormente, estos factores son integrados mediante técnicas de análisis espacial para obtener un índice de amenaza que permita identificar y clasificar las zonas con diferente nivel de susceptibilidad frente a inundaciones [104].

Después de crear la capa de intersección, añadimos una nueva columna en la tabla de atributos llamada VFC, que representa el valor del factor de condicionamiento. Este valor se calculó utilizando la herramienta Calculadora de Campos, que se usó para la matriz de ponderación definida para los factores físicos del terreno. La expresión utilizada fue:

$$VFC = [POND_PEN] * 0,693 + [POND_GEOMO] * 0,358 + [PON_RELIEV] * 0,188 + [POND_GEOLO] * 0,095$$

Donde:

VFC = valor del factor condicionante

POND_PEN = ponderación de pendiente

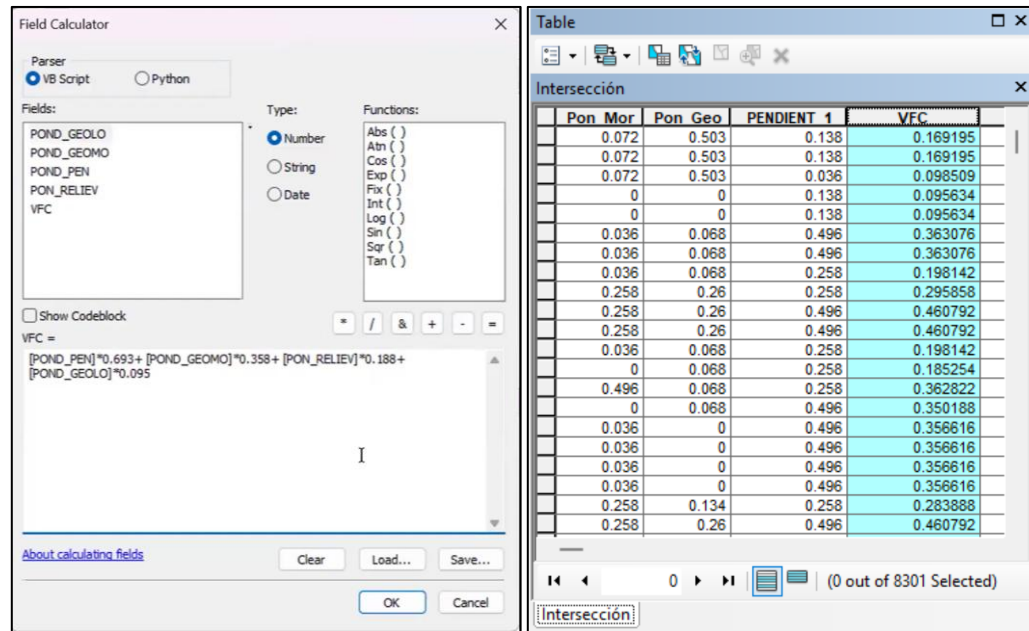
POND_GEOMO = ponderación de geomorfología

PON_RELIEV = ponderación de relieve

POND_GEOLO = ponderación de geología

Cuando se realizó el cálculo, la tabla de atributos tuvo en cuenta los valores del factor de condicionamiento para cada unidad espacial formada por la intersección. Esto representa el efecto combinado de las circunstancias físicas del terreno en la susceptibilidad a inundaciones.

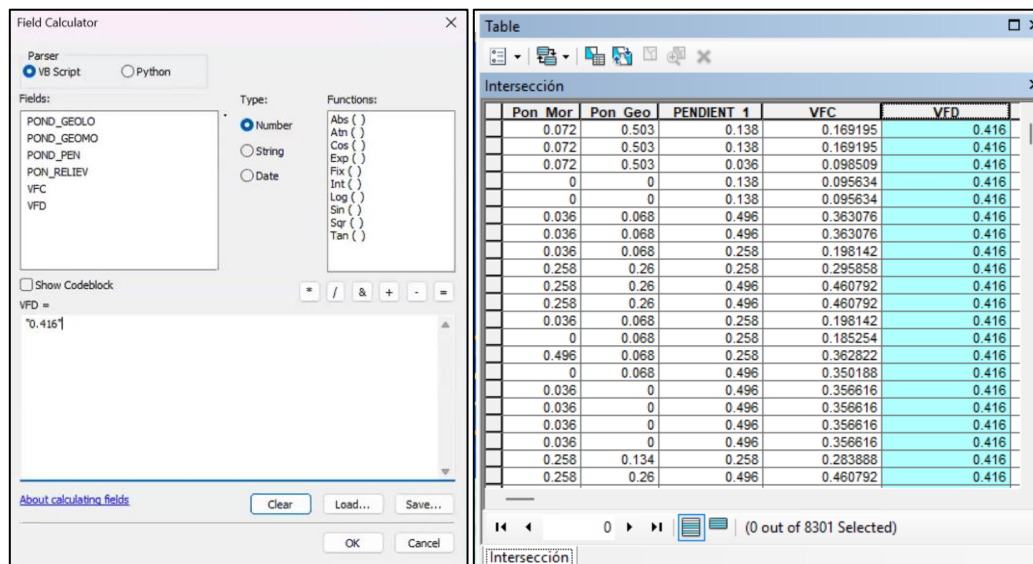
Figura 47. Cálculo del valor del factor condicionante mediante Field Calculator..



Realizado por: Elaboración propia.

Posteriormente, se creó una nueva columna denominada VFD, correspondiente al valor del factor desencadenante. En este caso, se consideró la precipitación como el principal elemento detonante de los procesos de inundación. El valor asignado fue de 0,416, de acuerdo con la ponderación establecida para la capa de precipitación dentro del modelo aplicado.

Figura 48. Asignación del valor del factor desencadenante mediante Field Calculator.



Realizado por: Elaboración propia.

A continuación, se generó una columna adicional denominada SUSCEPTIBI, orientada al cálculo final de la susceptibilidad. Para ello, se integraron los valores del factor condicionante y del factor desencadenante mediante una combinación ponderada. La expresión utilizada fue:

$$\text{SUSCEPTIBI} = [\text{VFC}] * 0,80 + [\text{VFD}] * 0,20$$

Donde:

SUSCEPTIBI = valor final de susceptibilidad a inundación

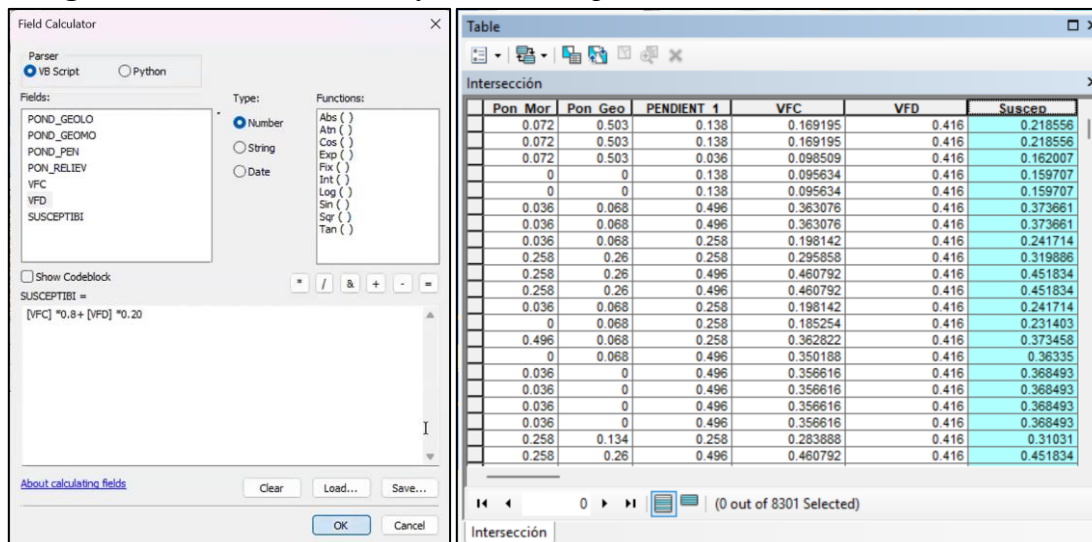
VFC = valor del factor condicionante

VFD = valor del factor desencadenante

Esta combinación permite representar la influencia predominante de las condiciones físicas del terreno, complementadas por el efecto desencadenante de la precipitación.

La metodología establece que los pesos o factores de ponderación asignados a cada variable pueden definirse con base en la experiencia técnica del equipo evaluador, las condiciones particulares del área de estudio o los resultados obtenidos en investigaciones desarrolladas en zonas con características similares. Para ello, se consideran principalmente factores como la litología, la pendiente, el relieve y el clima, cuya influencia determina el grado de susceptibilidad frente a procesos de inundación [104].

Figura 49. Cálculo del valor final de susceptibilidad mediante Field Calculator.



Realizado por: Elaboración propia.

Una vez obtenido el valor de susceptibilidad, se procedió a clasificar los resultados en niveles de amenaza. Para ello, se realizó una selección por atributos y posteriormente se asignó la categoría correspondiente en la columna Riesgo o Nivel de susceptibilidad, utilizando los rangos establecidos para el modelo.

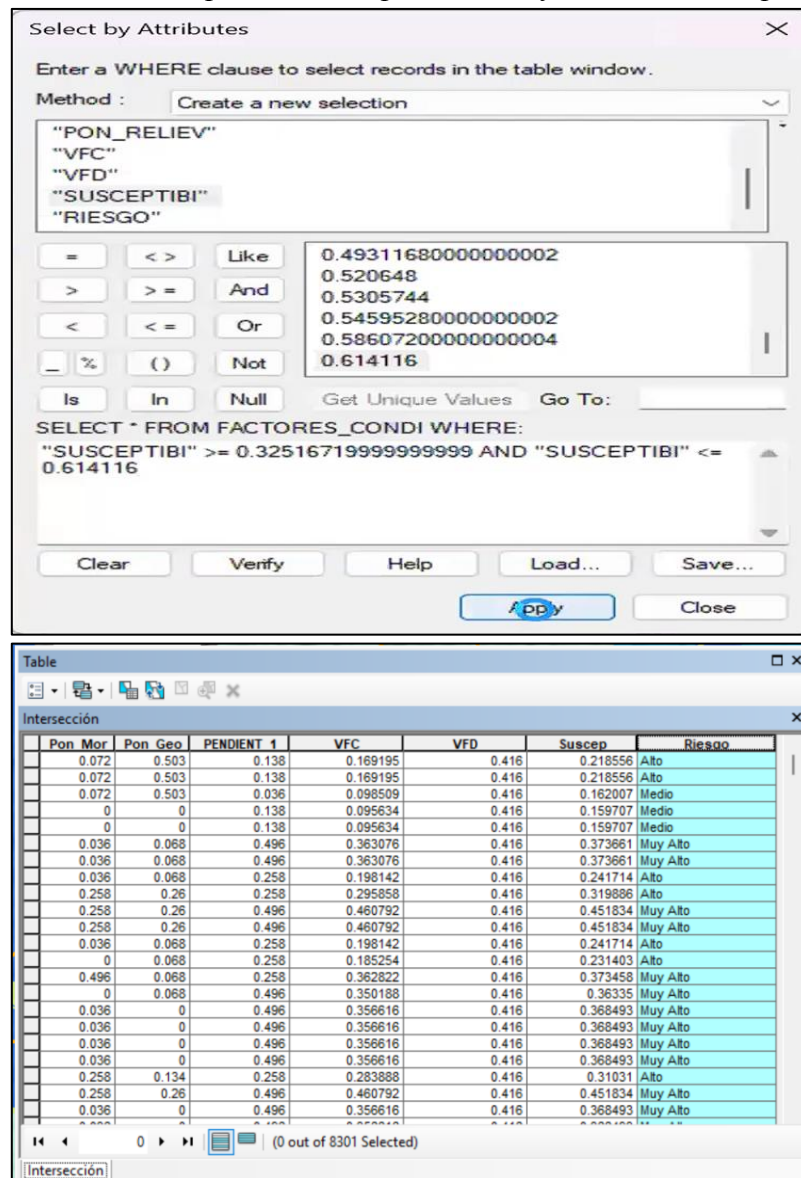
TABLA 20. Rangos de clasificación de susceptibilidad a inundaciones.

Rango inferior	Condición	Valor de susceptibilidad	Condición	Rango superior	Nivel
0,327	≤	Susceptibilidad	≤	0,582	Muy alto
0,199	≤	Susceptibilidad	≤	0,327	Alto
0,129	≤	Susceptibilidad	≤	0,199	Medio
0,091	≤	Susceptibilidad	≤	0,129	Bajo

Realizado por: Elaboración propia.

Para la clasificación final se utilizó la herramienta Select by Attributes, seleccionando los registros que se encontraban dentro de cada rango de susceptibilidad. Posteriormente, mediante Field Calculator, se asignó el nivel correspondiente: bajo, medio, alto o muy alto. Este procedimiento permitió transformar los valores numéricos del modelo en categorías cartográficas de interpretación directa.

Figura 50. Selección por atributos para la clasificación de susceptibilidad.



Realizado por: Elaboración propia.

Con este procedimiento se obtuvo el mapa de susceptibilidad a inundaciones de la cuenca del casco urbano del cantón Caluma. El mapa es representativo espacialmente de áreas con diferentes niveles de riesgo, y permite la identificación de sectores donde hay una mayor probabilidad de inundación o una inundación debido al aumento de las aguas en el entorno físico y la precipitación. Los mapas de susceptibilidad a inundaciones deben ser confirmados mediante trabajo de campo o comparados con registros históricos de eventos anteriores para verificar la consistencia de los resultados obtenidos y, si es necesario, ajustar el peso de los diferentes factores. Este procedimiento permite mejorar la confiabilidad de la zonificación, considerando que la

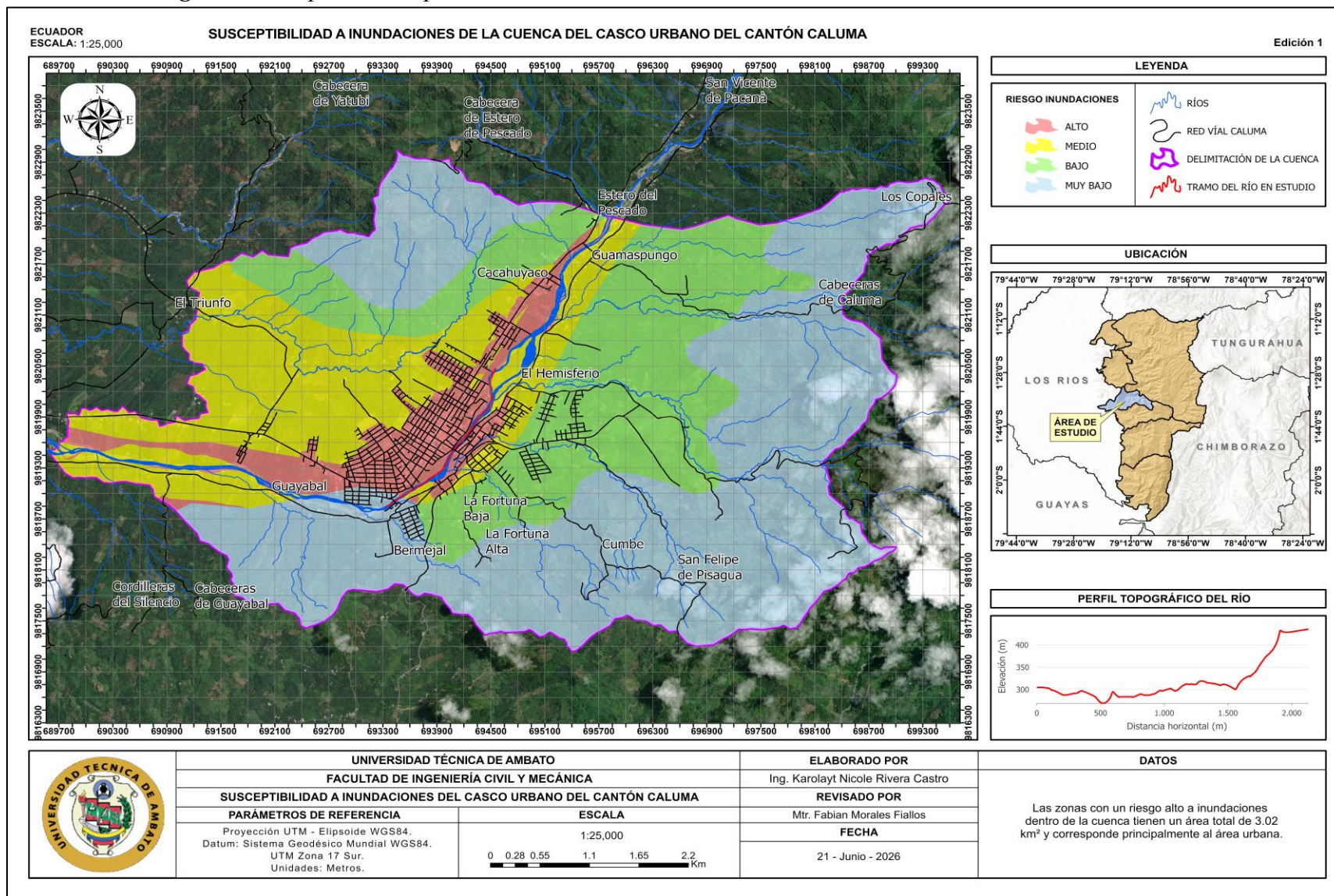
influencia relativa de cada variable puede variar de acuerdo con las características físicas y ambientales del área de estudio [104].

Del mapa se puede concluir que una gran parte del área urbana en el cantón Caluma está ubicada en zonas con alta susceptibilidad a inundaciones, especialmente las regiones bajas y las zonas fluviales. Dado que el río atraviesa el área urbana y recibe escorrentía de las regiones altas y medias de la cuenca, los resultados muestran la siguiente distribución de las áreas por nivel de susceptibilidad:

- Las zonas con alta susceptibilidad a inundaciones en la cuenca tienen un ancho de 3.02 km².
- Las zonas con susceptibilidad media a inundaciones tienen un área aproximada de 7.36 km².
- Las zonas con baja susceptibilidad a inundaciones tienen un área de aproximadamente 8.69 km².
- Las zonas con muy baja susceptibilidad a inundaciones tienen un ancho de aproximadamente 17.21 km².

Hemos encontrado que, aunque la mayor parte de la cuenca se encuentra en niveles bajos y muy bajos, las zonas de alta susceptibilidad están principalmente ubicadas en el área urbana y en las franjas alrededor del cauce del río Caluma, y el 81% del área urbana es susceptible a inundaciones. El hecho anterior es útil para la planificación territorial y para el análisis hidráulico para priorizar las áreas donde se espera más impacto durante lluvias extensas o inundaciones fluviales.

Figura 51. Mapa de susceptibilidad a inundaciones de la cuenca del casco urbano del cantón Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

5.6.9.2. Crecidas de río y susceptibilidad a socavamientos.

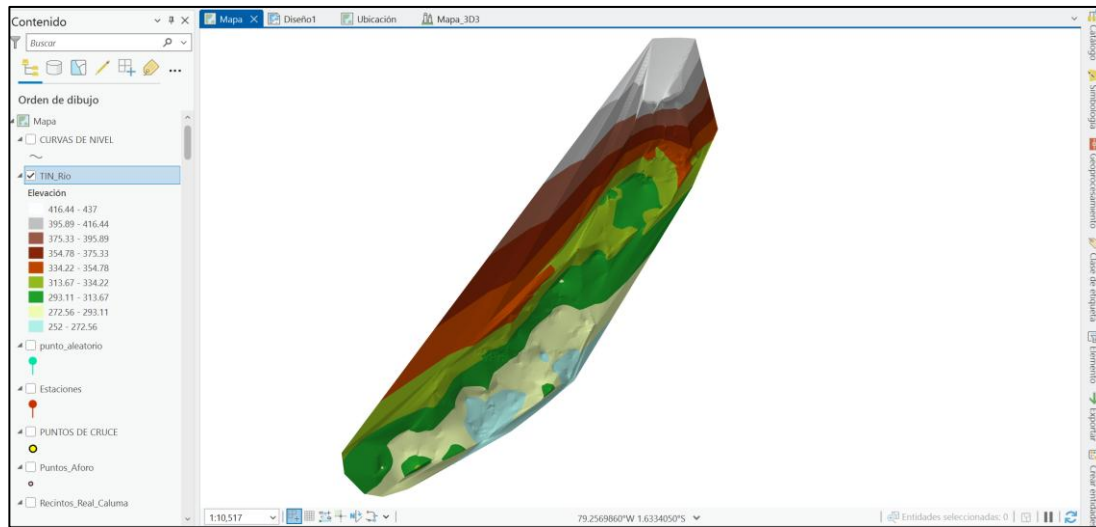
Con el modelamiento hidráulico se busca evaluar el comportamiento del flujo del río Caluma en el tramo correspondiente al casco urbano del cantón Caluma. Este análisis permite representar las condiciones hidráulicas del cauce, identificar sectores donde el flujo puede concentrarse, reconocer zonas de posible desbordamiento y relacionar la dinámica del río con la topografía local del área urbana.

Para comenzar a procesar la información topográfica, los datos deben estar en forma vectorial (Shapefile) con las coordenadas geográficas y los valores de elevación. Luego, utilizando la función 3D Analyst en ArcGIS, esta información se convierte en una Red Irregular Triangulada (TIN) que describe la superficie del terreno como una representación continua (líneas de contorno, puntos topográficos y líneas de ruptura). La incorporación de estos elementos permite preservar adecuadamente las variaciones del relieve, la geometría del cauce y los cambios abruptos de pendiente [105].

La generación del modelo TIN representa una etapa fundamental en la preparación de la información topográfica para la modelación hidráulica, ya que permite describir con mayor precisión la morfología del cauce, las márgenes, los taludes y las áreas adyacentes al río. Posteriormente, esta superficie se convierte a formato ráster, el cual constituye el modelo digital del terreno empleado como base para la simulación hidráulica en HEC-RAS 2D.

Una vez obtenido el modelo ráster, este es incorporado al entorno RAS Mapper, donde se define la proyección cartográfica del proyecto y se crea el terreno mediante la opción Terrain → Create a New RAS Terrain, utilizando como insumo el archivo generado durante el procesamiento en el Sistema de Información Geográfica. Esta secuencia de trabajo curvas de nivel, generación del TIN, conversión a ráster y creación del terreno constituye el procedimiento recomendado para la preparación de la información topográfica utilizada en la modelación bidimensional con HEC-RAS 2D [105].

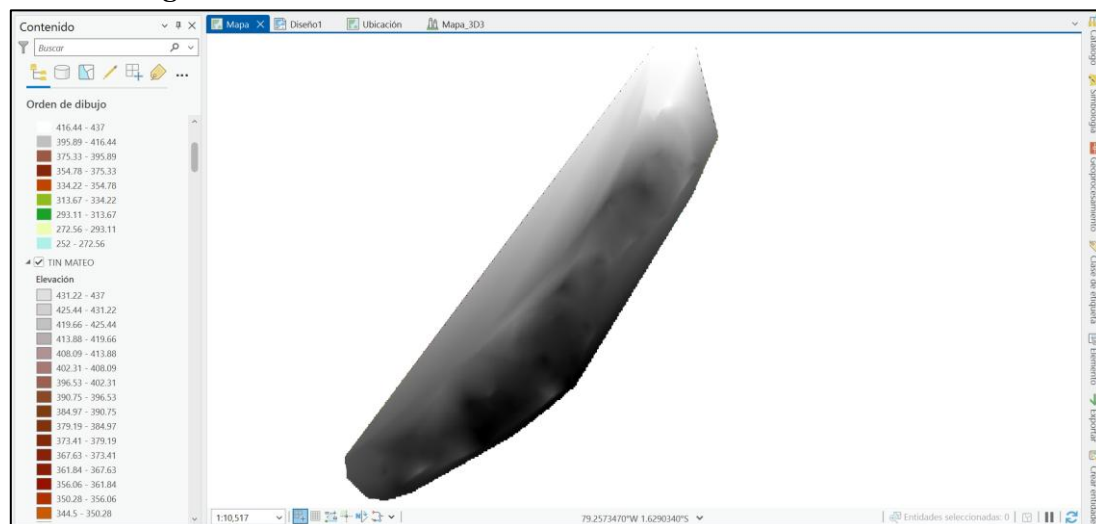
Figura 52. Conversión de información topográfica a superficie TIN.



Realizado por: Elaboración propia.

Posteriormente, se realiza la conversión de TIN a ráster mediante las herramientas de 3D Analyst, obteniendo así una superficie continua del terreno. Este ráster constituye la base topográfica del modelo hidráulico, debido a que sobre él se definirá el dominio de cálculo, las zonas de flujo y la geometría hidráulica del tramo analizado. En este caso, el levantamiento topográfico mediante dron y RTK permite disponer de una superficie de mayor detalle para representar el cauce urbano del río Caluma.

Figura 53. Conversión de TIN a ráster del tramo del río Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

Posteriormente, se creó una cobertura poligonal que delimita el cauce principal, la margen izquierda y la margen derecha del río. Esta cobertura constituye un insumo fundamental para la asignación de los coeficientes de rugosidad de Manning, debido a que las características hidráulicas del flujo difieren entre el cauce y las áreas laterales de inundación. En RAS Mapper, este procedimiento se realiza mediante la creación de una Land Cover Layer, en la cual se asignan valores de rugosidad a cada tipo de cobertura superficial representada en el modelo hidráulico [105].

El coeficiente de Manning representa la resistencia que ofrece el cauce o la superficie al movimiento del flujo y constituye uno de los parámetros más importantes en la modelación hidráulica de canales abiertos. Su selección depende de factores como la vegetación, la irregularidad del lecho, la presencia de rocas y obstrucciones, las variaciones de la sección transversal y las condiciones del régimen de flujo. En cauces naturales, los valores de rugosidad se determinan generalmente mediante observaciones de campo y tablas técnicas de referencia. En términos generales, el coeficiente de Manning puede variar desde aproximadamente 0,025 para cauces limpios y rectos hasta valores superiores a 0,070 en tramos con abundante vegetación, elevada irregularidad o presencia de pozas y obstrucciones [106].

TABLA 21. Valores de coeficiente de Manning utilizados para el cauce y márgenes.

<i>Superficie</i>	<i>Condiciones de las paredes</i>			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
Tubería hierro forjado negro comercial	0.012	0.013	0.014	0.015
Tubería hierro forjado galvanizado comercial	0.013	0.014	0.015	0.017
Tubería de latón o vidrio	0.009	0.010	0.011	0.013
Tubería acero remachado en espiral	0.013	0.015*	0.017*	—
Tubería de barro vitrificado	0.010	0.013*	0.015	0.017
Tubos comunes de barro para drenaje	0.011	0.012*	0.014*	0.017
Tabique vidriado	0.011	0.012	0.013	0.015
Tabique con mortero de cemento; con albañiles de tabique	0.012	0.013	0.015*	0.017
Superficies de cemento pulido	0.010	0.011	0.012	0.013
Superficies aplanadas con mortero de cemento	0.011	0.012	0.013*	0.015
Tuberías de concreto	0.012	0.013	0.015*	0.016

<i>Superficie</i>	<i>Condiciones de las paredes</i>			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
Tuberías de duela	0.010	0.011	0.012	0.013
<i>Acueductos de tablón:</i>				
Labrado	0.010	0.012*	0.013	0.014
Sin labrar	0.011	0.013*	0.014	0.015
Con astillas	0.012	0.015*	0.016	—
Canales revestidos con concreto	0.012	0.014*	0.016*	0.018
Superficie de mampostería con cemento	0.017	0.020	0.025	0.030
Superficie de mampostería en seco	0.025	0.030	0.033	0.035
Acueductos semicirculares metálicos, lisos	0.011	0.012	0.013	0.015
Acueductos semicirculares metálicos corrugados	0.0225	0.025	0.0275	0.030
<i>Canales y zanjas:</i>				
En tierra, alineados y uniformes	0.017	0.020	0.0225	0.025
En roca, lisos y uniformes	0.025	0.030	0.033*	0.035
En roca, con salientes y sinuosos	0.033	0.040	0.045	0.050
Sinuosos y de segundo orden	0.0225	0.025*	0.0275	0.030
Degradados en tierra	0.025	0.0275*	0.030	0.033
Con lecho pedregoso y bordos de tierra enhiervados	0.025	0.030	0.035*	0.040
Plantilla de tierra, taludes ásperos	0.028	0.030*	0.033*	0.035
<i>Corrientes naturales:</i>				
(1) Limpios, bordos rectos, llenos, sin hendeduras ni charcos profundos.	0.025	0.0275	0.030	0.033
(2) Igual al (1) pero, con algo de hierba y piedra.	0.030	0.033	0.035	0.040
(3) Sinuoso, algunos charcos y escollos, limpio	0.033	0.035	0.040	0.045

<i>Superficie</i>	<i>Condiciones de las paredes</i>			
	Perfectas	Buenas	Medianas	Malas
(4) Igual al (3), de poco tirante, con pendiente y sección menos eficiente.	0.040	0.045	0.050	0.055
(5) Igual al (3), algo de hierba y piedras.	0.035	0.040	0.045	0.050
(6) Igual al (4), secciones pedregosas.	0.045	0.050	0.055	0.060
(7) Ríos con tramos lentos, cauce enhiervado o con charcos profundos.	0.050	0.060	0.070	0.080
(8) Playas muy enhiervadas.	0.075	0.100	0.125	0.150

Realizado por: Villón Bejar, Máximo. (1995). Hidráulica de Canales.

Considerando que el río fluye en dirección norte-sur, la margen izquierda se identificó como el costado izquierdo del cauce al observar en sentido aguas abajo, mientras que la margen derecha corresponde al costado derecho. Para el cauce principal se adoptó un coeficiente de Manning de $n = 0,055$, debido a que se observa un lecho natural irregular, con presencia de material granular y secciones pedregosas. Para la margen izquierda, se eligió el valor de $n = 0.065$ ya que está más urbanizada, se han construido carreteras y también se ha modificado la superficie. Para la margen derecha, se eligió el valor de $n = 0.070$ debido a la presencia de vegetación, la irregularidad de la superficie y las regiones laterales naturales. Esta diferencia nos permite tener una interpretación más realista de la resistencia hidráulica del canal y ambas márgenes durante la inundación.

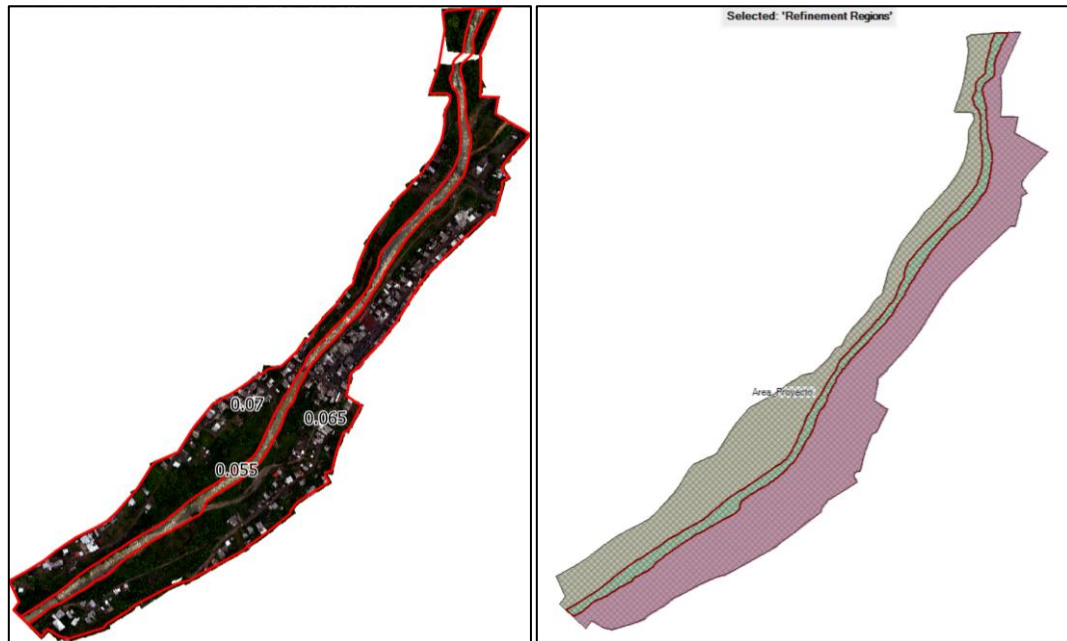
Después de completar el modelo digital del terreno, se construyó la geometría hidráulica bidimensional utilizando HEC-RAS, un software para modelar el comportamiento del flujo en la sección de estudio. Para este propósito, primero se definió el dominio de cálculo correspondiente al sector analizado, luego se generó una malla computacional con celdas de $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ para representar las características geomorfológicas e hidráulicas del canal.

La geometría del modelo bidimensional se desarrolló desde el entorno RAS Mapper, donde es posible definir el dominio de simulación y editar la malla computacional de acuerdo con las condiciones topográficas, la complejidad del terreno y el nivel de detalle requerido para el análisis hidráulico [105]. La selección del tamaño de la malla permitió obtener un equilibrio entre la precisión de la simulación y la eficiencia computacional durante el procesamiento de los diferentes escenarios de flujo considerados en la presente investigación.

Primero, refinamos la malla computacional a una resolución de $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ en las áreas de mayor interés hidráulico, principalmente en el canal principal y las zonas cercanas a las orillas del río. Esto mejorará la resolución espacial del modelo en las áreas donde se necesita una solución más precisa, como puentes, cambios en la dirección del canal, estrechamientos, zonas de desbordamiento y otros sectores con alta complejidad hidráulica.

El refinamiento de la malla puede realizarse mediante la herramienta Edit Refinement Region Properties de RAS Mapper, definiendo regiones específicas donde se requiere una mayor densidad de elementos computacionales. Una vez establecidas estas zonas, es necesario actualizar la malla mediante las opciones Enforce Refinement Regions o Force Recompute of All Meshes, garantizando que el nuevo tamaño de celda sea incorporado al modelo hidráulico [105]. La aplicación de este procedimiento permitió mejorar la representación del flujo en los sectores críticos de la cuenca del río Caluma y aumentar la precisión de las simulaciones bidimensionales desarrolladas en la presente investigación.

Figura 54. Malla computacional y refinamiento de zonas de interés.



Realizado por: Elaboración propia.

A continuación, se realizó el procesamiento de la geometría y se verificó la información generada, especialmente la relación entre la cobertura del terreno y los coeficientes de Manning asignados. Esta verificación es necesaria para comprobar que el cauce, la margen izquierda y la margen derecha tengan correctamente asociados sus valores de

rugosidad. Además, permite revisar que la malla computacional no presente errores, vacíos o inconsistencias que puedan afectar la simulación.

5.6.9.2.1. Simulación con flujo no permanente.

Para la simulación hidráulica se empleó un régimen de flujo no permanente, debido a que el comportamiento de las crecidas presenta variaciones temporales tanto en el caudal como en el nivel del agua. Este tipo de simulación permite representar la evolución del evento hidrológico a lo largo del tiempo, reproduciendo de manera más realista la propagación de la onda de crecida dentro del cauce.

Para la definición de las condiciones de contorno, se incorporó un hidrograma de caudales como condición de frontera aguas arriba y se estableció la condición hidráulica correspondiente en el límite aguas abajo del modelo. En HEC-RAS 2D, la simulación en flujo no permanente requiere la definición de estas condiciones de entrada y salida para garantizar la adecuada representación del comportamiento hidráulico del sistema durante el período de análisis [105].

Para el hidrograma se utiliza el caudal medio y el caudal máximo anteriormente calculado.

TABLA 22. Hidrograma de Caudales.

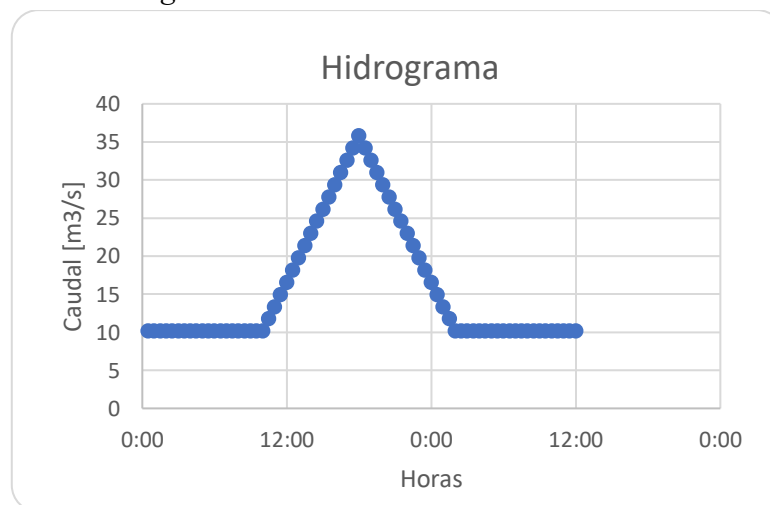
HIDROGRAMA					
Tiempo	Caudal [m3/s]	Tiempo	Caudal [m3/s]	Tiempo	Caudal [m3/s]
00:00	10.10	12:30	18.113	01:00	13.31
00:30	10.10	13:00	19.715	01:30	11.70
01:00	10.10	13:30	21.318	02:00	10.10
01:30	10.10	14:00	22.92	02:30	10.10
02:00	10.10	14:30	24.523	03:00	10.10
02:30	10.10	15:00	26.125	03:30	10.10
03:00	10.10	15:30	27.728	04:00	10.10
03:30	10.10	16:00	29.33	04:30	10.10
04:00	10.10	16:30	30.933	05:00	10.10
04:30	10.10	17:00	32.535	05:30	10.10
05:00	10.10	17:30	34.138	06:00	10.10

05:30	10.10	18:00	35.74	06:30	10.10
06:00	10.10	18:30	34.138	07:00	10.10
06:30	10.10	19:00	32.535	07:30	10.10
07:00	10.10	19:30	30.933	08:00	10.10
07:30	10.10	20:00	29.33	08:30	10.10
08:00	10.10	20:30	27.728	09:00	10.10
08:30	10.10	21:00	26.125	09:30	10.10
09:00	10.10	21:30	24.523	10:00	10.10
09:30	10.10	22:00	22.92	10:30	10.10
10:00	10.10	22:30	21.318	11:00	10.10
10:30	11.70	23:00	19.715	11:30	10.10
11:00	13.31	23:30	18.113	12:00	10.10
11:30	14.91	00:00	16.51		
12:00	16.51	00:30	14.908		

Realizado por: Elaboración propia.

La configuración de estas condiciones permitió ejecutar la modelación bidimensional del tramo urbano del río Caluma y obtener la distribución espacial de variables hidráulicas como la profundidad, velocidad y extensión de la inundación durante los escenarios de crecida considerados en la presente investigación.

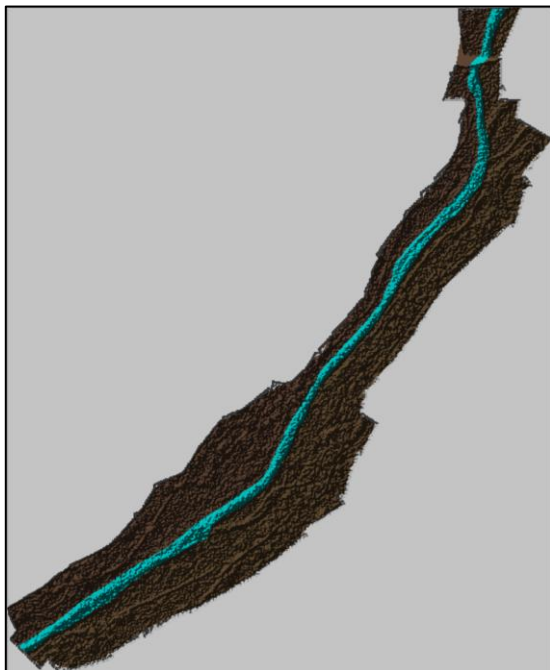
Figura 55. Hidrograma de caudal utilizado como condición de entrada.



Realizado por: Elaboración propia.

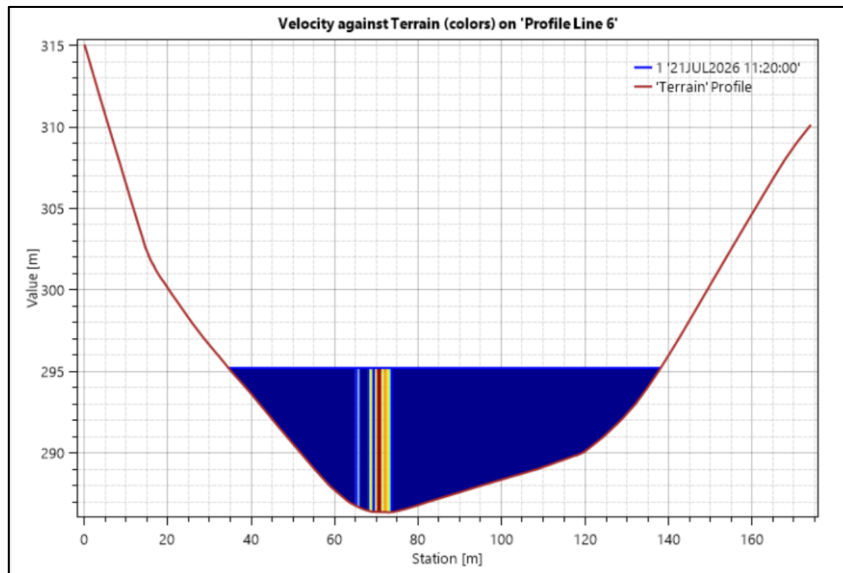
Con el hidrograma de caudal se ejecutó el modelamiento del flujo del río. El modelo permitió representar la distribución espacial del agua dentro del tramo analizado, observando la trayectoria principal del flujo, las zonas donde el agua ocupa el cauce y los sectores donde puede extenderse hacia las márgenes. Posteriormente, se obtuvo un perfil hidráulico del río, en el cual se observa la relación entre el terreno y el nivel alcanzado por el flujo durante la simulación.

Figura 56. Simulación hidráulica del flujo del río Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

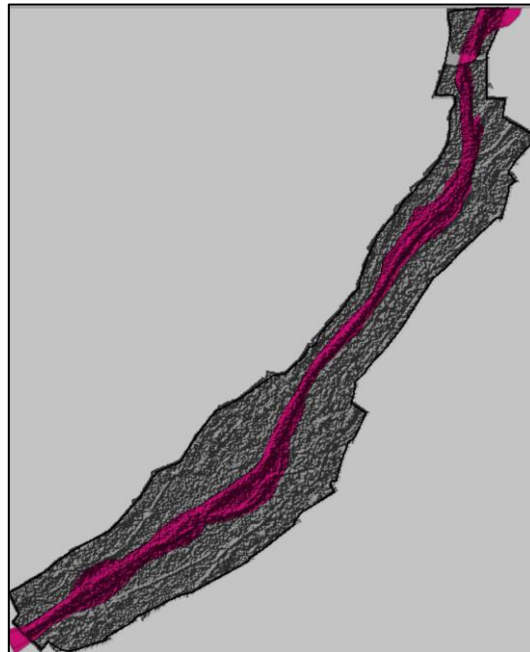
Figura 57. Perfil hidráulico del río Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

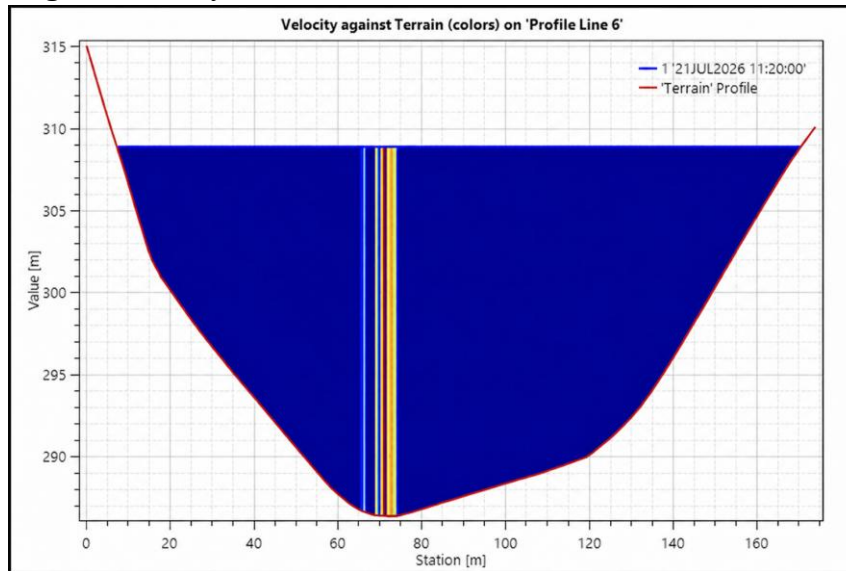
Al elevar los caudales dentro del modelo hidráulico se puede identificar el comportamiento del río ante crecidas sin superar los límites del río.

Figura 58. Simulación hidráulica de crecidas del río Caluma.



Realizado por: Elaboración propia.

Figura 59. Perfil hidráulico del río Caluma con caudal máximo.



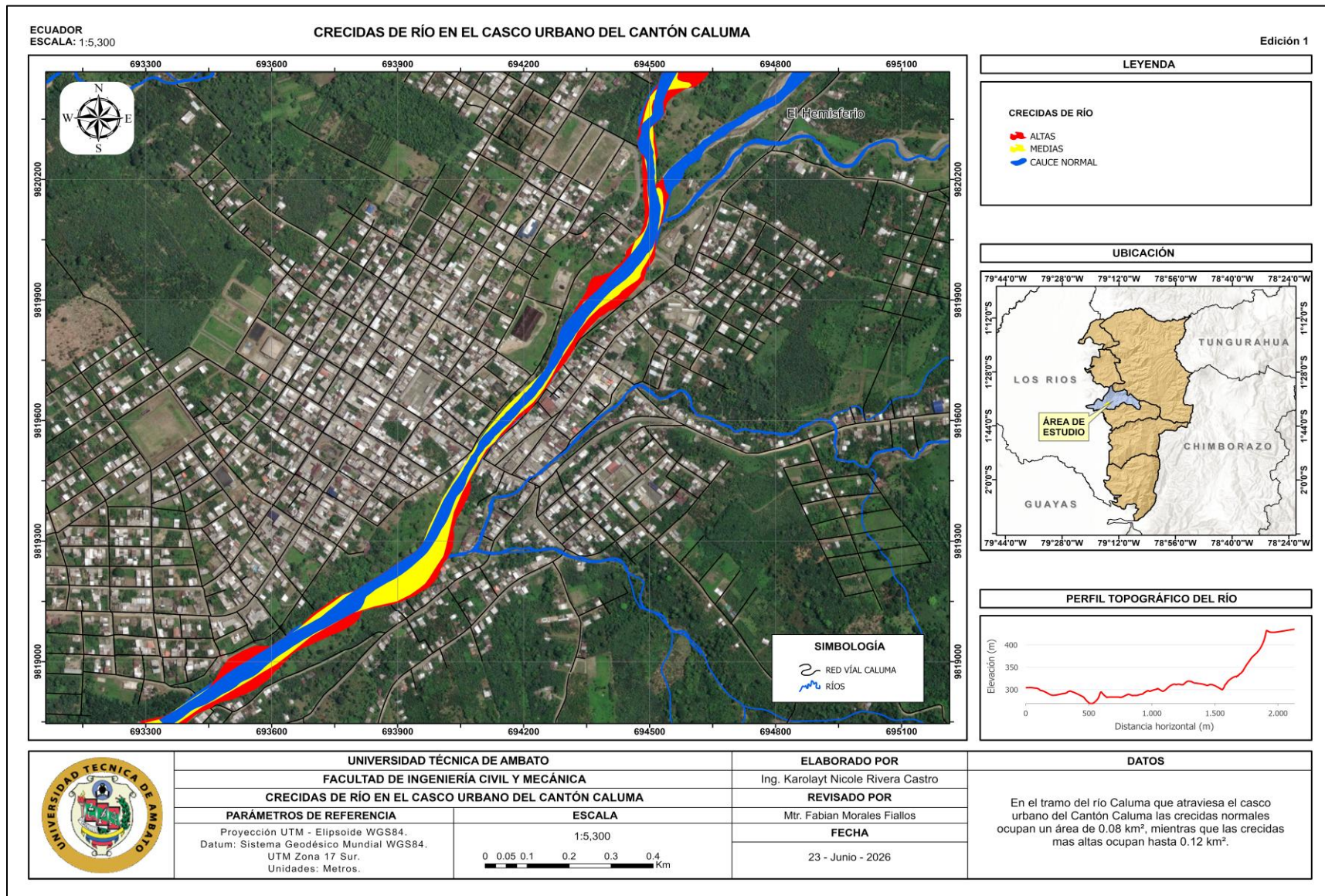
Realizado por: Elaboración propia.

Los resultados fueron exportados hacia ArcGIS para representar espacialmente las crecidas del río Caluma en el tramo que atraviesa el casco urbano. En el mapa se diferencian el cauce normal, las crecidas medias y las crecidas altas, permitiendo observar cómo el flujo ocupa progresivamente las zonas laterales del cauce conforme aumenta el caudal.

Observamos que las inundaciones normales ocupan aproximadamente 0.08 km² y las inundaciones altas ocupan alrededor de 0.12 km². Esto significa que en situaciones de mayor caudal, el río puede expandir su zona de ocupación hidráulica, afectando principalmente las orillas, las áreas cercanas a los puentes y los sectores cercanos a la zona urbana.

El Mapa permite reconocer los sectores donde el flujo puede tener un mayor impacto durante los eventos de inundación

Figura 60. Mapa de crecidas del río Caluma en el casco urbano.

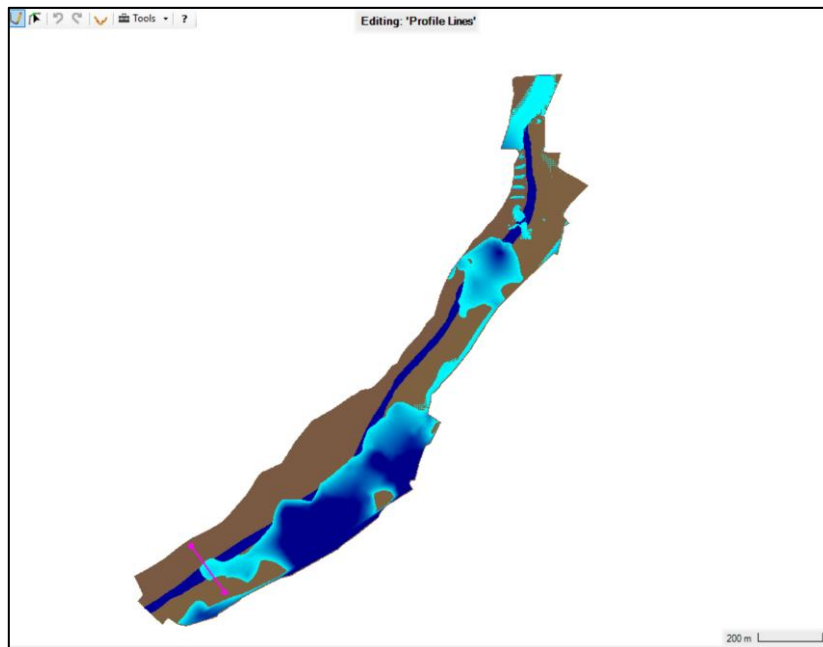


Realizado por: Elaboración propia.

En general, al elevar los caudales dentro del modelo hidráulico se pueden identificar tanto las máximas crecidas del río como zonas susceptibles a inundación. Sin embargo, en este caso se aplicó un procedimiento adicional orientado a determinar zonas susceptibles a socavamiento, resaltando los sectores donde el flujo puede generar mayor afectación sobre el lecho, las márgenes y las estructuras cercanas. La socavación está asociada con la capacidad erosiva del flujo, la velocidad, la profundidad hidráulica, la rugosidad del cauce, la pendiente y la resistencia del material del lecho.

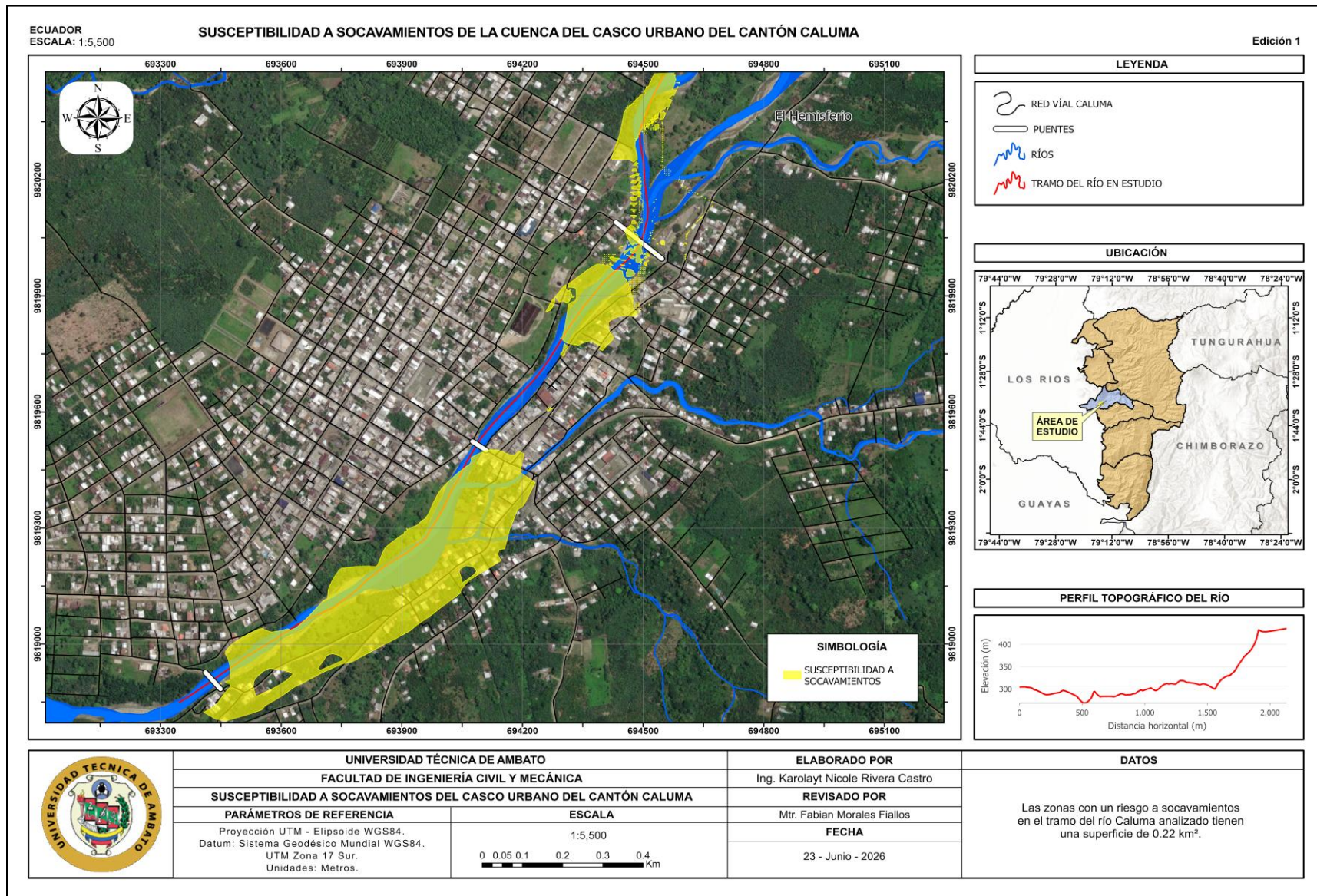
Utilizando el software HEC-RAS, se llevó a cabo la modelización del flujo de agua en áreas vulnerables a la socavación, teniendo en cuenta los parámetros topográficos, geométricos e hidráulicos ya obtenidos. Estas áreas eran más susceptibles a los procesos erosivos, particularmente aquellas donde el flujo se concentra, cambia de dirección o interactúa con estructuras como puentes. Los resultados fueron exportados a ArcGIS para crear el mapa de susceptibilidad a la socavación..

Figura 61. Resultado hidráulico para identificar zonas susceptibles a socavamiento.



Realizado por: Elaboración propia.

Figura 62. Mapa de susceptibilidad a socavamientos.



Realizado por: Elaboración propia.

A partir del mapa obtenido, se puede determinar que las zonas susceptibles a socavamiento en el tramo analizado del río Caluma presentan un área aproximada de 0,22 km² y la longitud de río con susceptibilidad a socavación esta entre 1.18 a 1.46 km. Estas zonas se concentran principalmente en el entorno inmediato del cauce, afectando tanto al área urbana como a las estructuras de cruce. En la sección analizada vemos tres puentes principales. El puente en el norte está más expuesto, mientras que los puentes en la parte media y sur muestran un impacto relativo menor.

Los resultados muestran que la susceptibilidad a la erosión no está distribuida uniformemente a lo largo de la sección, sino que se concentra en ciertas áreas donde la geometría del canal, la velocidad del flujo y la presencia de estructuras pueden cambiar el comportamiento hidráulico. Por lo tanto, estas áreas deben considerarse prioritarias para inspecciones de campo, mantenimiento de bancos, control de erosión, limpieza de canales y evaluación detallada de la estabilidad de los puentes.

5.6.9.3. Justificación del procedimiento hidrológico empleado.

El análisis hidrológico se realizó mediante un procedimiento espacial en ambiente SIG, considerando precipitación, temperatura, evapotranspiración, escorrentía y balance hídrico. Este método fue seleccionado porque el objetivo del estudio no se limita a obtener un hidrograma en un punto de salida, sino a representar espacialmente el comportamiento hídrico de la cuenca y relacionarlo con las zonas susceptibles a inundación y socavación del río Caluma.

Aunque HEC-HMS es una herramienta especializada para modelar procesos de precipitación-escorrentía, su aplicación requiere definir subcuencas, métodos de pérdidas, transformación, tránsito hidrológico y, preferentemente, datos observados de caudal para calibrar o verificar el modelo [110]. En el presente estudio no se utilizó HEC-HMS debido a la limitada disponibilidad de registros hidrométricos continuos en el tramo analizado. Por ello, se empleó un balance hidrológico distribuido mediante herramientas SIG, el cual permitió integrar información climática, topográfica y cartográfica para estimar la escorrentía y el caudal de la cuenca. Este procedimiento es adecuado para el alcance del estudio, ya que genera insumos espaciales compatibles con el análisis de susceptibilidad y con el posterior modelamiento hidráulico en HEC-RAS [106], [107].

Los resultados obtenidos deben interpretarse como una aproximación técnica del comportamiento hidrológico de la cuenca. En futuros estudios, el análisis podría complementarse con HEC-HMS si se dispone de registros de caudal, eventos históricos calibrables y mayor información hidrometeorológica.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

6.1.1. Conclusión relacionada con el objetivo general.

La integración del análisis hidrológico, la modelación hidráulica y las herramientas de Sistemas de Información Geográfica permitió generar una base cartográfica preventiva para la delimitación de zonas susceptibles a crecidas, inundación y socavación en el tramo urbano del río Caluma. Este producto identifica espacialmente los sectores prioritarios para la planificación territorial, el monitoreo de márgenes y la gestión preventiva del riesgo en el cantón Caluma.

6.1.2. Conclusiones relacionadas con el objetivo específico 1: caracterizar las condiciones físicas y ambientales de la cuenca.

- La cuenca del río Caluma tiene un área total de 36.29 km², un perímetro de 33.00 km, una longitud de cuenca de 9.00 km y una longitud del río principal de 8.00 km. Estos son los parámetros que permiten describir físicamente el área de contribución y muestran que el comportamiento de la ciudad está determinado por las condiciones hidrológicas en la cuenca
- La caracterización fisiográfica y morfométrica reveló que la cuenca tiene una forma moderadamente alargada e irregular con un factor de forma de 0.45 y un índice de compacidad de 1.53. También tiene un canal principal de orden 6, una longitud total de drenaje de 177.36 km y una densidad de drenaje de 4.89 km/km², lo que sugiere que la escorrentía se mueve lentamente hacia el río principal.
- El casco urbano de Caluma se localiza principalmente entre los 300 y 400 m s. n. m., mientras que la cuenca alcanza cotas de hasta 1 144 m s. n. m. Esta configuración altitudinal evidencia que el tramo urbano recibe aportes provenientes de zonas medias y altas de la cuenca durante eventos de precipitación.

6.1.3. Conclusiones relacionadas con el objetivo específico 2: analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca.

- El análisis climatológico determinó precipitaciones aproximadas entre 1 619 mm y 2 666 mm en la cuenca, con valores predominantes entre 2 400 mm y 2 500 mm en el casco urbano de Caluma. Esta condición pluviométrica constituye un factor relevante en la generación de escorrentía y en el incremento de los caudales del río durante periodos lluviosos.
- El balance hídrico permitió estimar valores de evapotranspiración real entre 704 mm y 1 871 mm, así como un volumen total aproximado de escorrentía de 26 181 606,02 m³. A partir de este análisis se obtuvo un caudal medio de 10,10 m³/s y,

mediante el método racional, un caudal máximo estimado de 35,74 m³/s, empleado como insumo para la simulación hidráulica de crecidas.

6.1.4. Conclusiones relacionadas con el objetivo específico 3: evaluar el comportamiento hidráulico del río Caluma.

- El análisis multicriterio de susceptibilidad a inundación determinó que 3,02 km² de la cuenca presentan susceptibilidad alta, 7,36 km² susceptibilidad media, 8,69 km² susceptibilidad baja y 17,21 km² susceptibilidad muy baja. Aunque la categoría alta ocupa una superficie menor respecto al área total de la cuenca, se concentra principalmente en las zonas bajas y próximas al cauce que atraviesa el casco urbano de Caluma; en este sector, aproximadamente el 81 % del área urbana presenta susceptibilidad alta a inundaciones.
- La modelización hidráulica ha mostrado que las inundaciones normales son de aproximadamente 0.08 km², mientras que las inundaciones altas son de alrededor de 0.12 km² en el área urbana. Esto indica que el aumento del flujo expande la ocupación hidráulica del río hacia las orillas y las áreas bajas y aguas arriba del canal.
- El levantamiento hidráulico y espacial ha destacado un área de 0.22 km² susceptible a la erosión, principalmente a lo largo de las riberas, regiones cercanas a puentes y áreas donde la geometría del canal favorece el aumento de la energía del flujo y la erosión lateral. La sección con mayor susceptibilidad tiene una longitud de 1.18 - 1.46 km.

6.1.5. Conclusiones relacionadas con el objetivo específico 4: integrar los resultados en una base cartográfica.

- La integración de información topográfica, hidrológica, hidráulica, geológica y geomorfológica de los Sistemas de Información Geográfica permitió la creación de mapas de inundación, susceptibilidad a inundaciones y susceptibilidad a socavaciones. Esta base cartográfica también ayuda a delinear áreas prioritarias para acciones de monitoreo, control de ocupación del suelo y protección de márgenes.
- Las encuestas apoyaron la interpretación territorial de los resultados. El 79.0% de los encuestados informó haber experimentado inundaciones, el 82.3% calificó la intensidad de las inundaciones en categorías altas y el 54.8% indicó la presencia de socavaciones. La intensidad de la inundación se correlacionó estadísticamente con la presencia de socavaciones y la percepción del riesgo, con valores phi de 0.294 y 0.308, respectivamente. Estos resultados son un contraste territorial con la zonificación, sin atribuir causalidad únicamente a la percepción de los encuestados.

6.2.Recomendaciones.

1. Se recomienda utilizar la base cartográfica generada como insumo técnico para la planificación territorial, gestión del riesgo y control del uso del suelo en el casco urbano del cantón Caluma, especialmente en las áreas cercanas al río Caluma.
2. Se aconseja el monitoreo de las áreas ribereñas que son más vulnerables a inundaciones, anegamientos y erosión porque están más expuestas al flujo y a la erosión de márgenes.
3. Se recomienda realizar inspecciones técnicas periódicas en puentes, márgenes intervenidas y las áreas cercanas al cauce del río, especialmente aquellas en las que el análisis hidráulico muestra mayor ocupación de flujo y posibles efectos de erosión.
4. El estudio debe complementarse con un análisis geotécnico del material del lecho y de los márgenes, la estabilidad de taludes y el transporte de sedimentos, y se deben delinear las condiciones que favorecen la erosión lateral y el socavamiento local.
5. Se recomienda actualizar periódicamente la información topográfica del cauce del río y sus márgenes mediante levantamientos con drones, RTK u otras tecnologías de precisión, principalmente después de eventos de lluvias intensas o inundaciones significativas.
6. Se recomienda mejorar la información hidrometeorológica en términos de precipitaciones, observaciones de flujo y eventos extremos para minimizar la incertidumbre con respecto a futuros análisis hidrológicos e hidráulicos.
7. Cualquier intervención física en el cauce del río, incluyendo obras de protección, canalización, estabilización de márgenes o limpieza mecánica, debe estar respaldada por estudios técnicos específicos y no acciones aisladas que puedan afectar el comportamiento hidráulico del río.
8. Se recomienda incluir mapas de susceptibilidad y zonas de riesgo en los instrumentos de planificación territorial del cantón Caluma para regular nuevas construcciones, rellenos, ocupación de márgenes y actividades que reduzcan la capacidad hidráulica del cauce del río.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. H. Gleick, "Water resources," in *Encyclopedia of Climate and Weather*, S. H. Schneider, Ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1996, pp. 817–823.
- [2] U.S. Geological Survey, *Where Is Earth's Water?* Reston, VA, USA: USGS, 2019.
- [3] D. R. Maidment, *Handbook of Hydrology*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1993.
- [4] W. Brutsaert, *Hydrology: An Introduction*. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2005.
- [5] K. Subramanya, *Engineering Hydrology*, 5th ed. New Delhi, India: McGraw-Hill Education, 2020.
- [6] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland, 2023.
- [7] World Meteorological Organization, *State of the Global Climate 2024*. Geneva, Switzerland: WMO, 2025.
- [8] United Nations, *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris, France: UNESCO, 2024.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland, 2023.
- [10] World Meteorological Organization, *State of the Global Climate 2024*. Geneva, Switzerland: WMO, 2025.
- [11] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2023*. Geneva, Switzerland, 2023.
- [12] Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, *Informe de Situación por la Temporada Lluviosa – Provincia Bolívar, marzo de 2022*. Quito, Ecuador, 2022.
- [13] United Nations, *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris, France: UNESCO, 2024.
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *The State of Water Resources for Food and Agriculture 2024*. Rome, Italy: FAO, 2024.
- [15] P. D. Bates, G. Schumann, and J. W. Hall, "Advances in flood inundation modelling," *Nature Reviews Earth & Environment*, vol. 5, no. 2, pp. 95–112, 2024.

- [16] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, *Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment*. Geneva, Switzerland, 2023.
- [17] Organisation for Economic Co-operation and Development, *Global Outlook on Financing for Sustainable Development 2025*. Paris, France: OECD Publishing, 2025.
- [18] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Voluntary Guidelines for Sustainable Soil and Water Management*. Rome, Italy: FAO, 2024.
- [19] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, *Guía para la Elaboración y Actualización de los Planes de Uso y Gestión del Suelo (PUGS)*. Quito, Ecuador, 2023.
- [20] Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, *Lineamientos para la Incorporación de la Gestión del Riesgo en la Planificación Territorial*. Quito, Ecuador, 2023.
- [21] J. Pinos and P. Timbe, "Flood hazard assessment using GIS-based hydraulic modeling in Andean watersheds of Ecuador," *Water*, vol. 15, no. 8, Art. no. 1568, 2023.
- [22] U.S. Army Corps of Engineers, *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, Version 6.5. Davis, CA, USA: Hydrologic Engineering Center, 2024.
- [23] M. N. Gomes Jr., A. S. Nóbrega, M. T. M. B. Campos, *et al.*, "Spatio-Temporal Performance of 2D Local Inertial Hydrodynamic Models for Urban Drainage and Dam-Break Applications," *Journal of Hydrology*, vol. 635, Art. no. 131120, 2024. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.131120.
- [24] M. N. Gomes Jr., A. S. Nóbrega, M. T. M. B. Campos, *et al.*, "HydroPol2D—Distributed Hydrodynamic and Water Quality Model: Challenges and Opportunities in Poorly-Gauged Catchments," *Environmental Modelling & Software*, vol. 170, Art. no. 105861, 2023. doi: 10.1016/j.envsoft.2023.105861.
- [25] T. H. Nguyen, H. L. Lee, J. S. Kim, *et al.*, "Reducing Uncertainties of a Chained Hydrologic-Hydraulic Model to Improve Flood Forecasting Using Multi-source Earth Observation Data," *Journal of Hydrology*, vol. 625, Art. no. 130160, 2023. doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.130160.
- [26] U.S. Army Corps of Engineers, *HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual*, Version 6.5. Davis, CA, USA: Hydrologic Engineering Center, 2024.
- [27] Y. Zhang, X. Liu, H. Wang, and Z. Chen, "High-resolution two-dimensional hydraulic modeling for urban flood hazard assessment," *Journal of Hydrology*, vol. 627, Art. no. 130458, 2024.
- [28] J. Pinos and P. Timbe, "Flood hazard assessment using GIS-based hydraulic modeling in Andean watersheds of Ecuador," *Water*, vol. 15, no. 8, Art. no. 1568, 2023.

- [29] A. Martínez-Graña, J. L. Goy, and C. Zazo, "Flood hazard mapping using GIS and hydraulic modelling for territorial planning," *Natural Hazards*, vol. 119, no. 1, pp. 325-347, 2023.
- [30] M. Costabile, C. Costanzo, and F. Macchione, "Flood mapping using remote sensing, GIS and hydraulic modeling: Recent advances and future perspectives," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 2, Art. no. 487, 2023.
- [31] D. Fernández, J. Delgado, and M. Sánchez, "Integrated GIS and hydraulic modelling for erosion and flood susceptibility assessment in tropical river basins," *Water Resources Management*, vol. 38, no. 4, pp. 1547-1565, 2024.
- [32] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, *Anuario Hidrometeorológico del Ecuador 2024*. Quito, Ecuador: INAMHI, 2025.
- [33] Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias, *Agenda de Reducción de Riesgos 2024-2030*. Quito, Ecuador, 2024.
- [34] R. Ettema, B. Melville, and I. Muste, "Scale effects in bridge scour and riverbank erosion: Current advances and research needs," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 150, no. 3, 2024.
- [35] P. F. Lagasse, L. W. Zevenbergen, J. D. Schall, and P. E. Clopper, *Bridge Scour and Stream Instability Countermeasures: Experience, Selection and Design Guidance*, 4th ed. Washington, DC, USA: Federal Highway Administration, 2024.
- [36] United Nations Office for Disaster Risk Reduction, *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2025*. Geneva, Switzerland, 2025.
- [37] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris, France: UNESCO, 2024.
- [38] U.S. Geological Survey, *Where Is Earth's Water?* Reston, VA, USA: USGS, 2019.
- [39] P. H. Gleick, "Water resources," in *Encyclopedia of Climate and Weather*, S. H. Schneider, Ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1996, pp. 817-823.
- [40] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *The State of Water Resources for Food and Agriculture 2024*. Rome, Italy: FAO, 2024.
- [41] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland, 2023.
- [42] World Meteorological Organization, *State of the Global Climate 2024*. Geneva, Switzerland: WMO, 2025.

- [43] United Nations, *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York, NY, USA: United Nations, 2015.
- [44] United Nations Environment Programme, *Global Environment Outlook 7*. Nairobi, Kenya: UNEP, 2025.
- [45] F. J. Aparicio Mijares, *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Ciudad de México, México: Limusa, 1992.
- [46] R. K. Linsley, M. A. Kohler, and J. L. H. Paulhus, *Hydrology for Engineers*, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1977.
- [47] World Meteorological Organization, *State of the Global Climate 2024*. Geneva, Switzerland: WMO, 2025.
- [48] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023.
- [49] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, *The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. Paris, France: UNESCO, 2024.
- [50] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *The State of Water Resources for Food and Agriculture 2024*. Rome, Italy: FAO, 2024.
- [51] Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Network of Basin Organizations, *Handbook for Integrated Water Resources Management in Basins*. Rome, Italy: FAO, 2023.
- [52] H. J. de Vente, J. Poesen, G. Verstraeten, and G. Govers, "Morphometric analysis of river basins and its application to watershed management: A review," *Earth-Science Reviews*, vol. 241, Art. no. 104399, 2024.
- [53] S. K. Fienen, D. M. Reeves, and R. M. Hunt, "Surface water–groundwater interactions in watershed hydrology: Advances, challenges and future directions," *Hydrological Processes*, vol. 38, no. 2, Art. no. e15120, 2024.
- [54] J. Hermenejildo, *Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas*. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina, 2015.
- [55] Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, *Cuencas Hidrológicas y Gestión Integrada del Recurso Hídrico*. Jiutepec, Morelos, México: IMTA, 2019.

- [56] Z. Tarboton, "Advances in watershed delineation and terrain analysis using digital elevation models and geographic information systems," *Environmental Modelling & Software*, vol. 176, Art. no. 106012, 2024.
- [57] Esri, *ArcGIS Pro Documentation: Hydrology Toolset*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute, 2024.
- [58] A. Méndez, J. C. Marquínez, M. Menéndez, and J. A. Díaz, "Análisis morfométrico de cuencas hidrográficas aplicado a la evaluación de la respuesta hidrológica," *Ingeniería del Agua*, vol. 14, no. 4, pp. 297–310, 2007.
- [59] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, *Guía Metodológica para la Delimitación y Caracterización de Cuencas Hidrográficas*. Cali, Colombia: CVC, 2018.
- [60] M. A. Romero Díaz, J. López Bermúdez, and F. Alonso Sarría, "Análisis morfométrico de cuencas hidrográficas como herramienta para la evaluación hidrológica," *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, no. 69, pp. 27–54, 2015.
- [61] P. K. Rai, K. Mohan, S. Mishra, A. Ahmad, and V. N. Mishra, "A GIS-based approach in drainage morphometric analysis of Kanhar River Basin, India," *Applied Water Science*, vol. 7, no. 1, pp. 217–232, 2017, doi: 10.1007/s13201-014-0238-y.
- [62] M. Lama, *Análisis morfométrico de cuencas hidrográficas mediante Sistemas de Información Geográfica*. 2021.
- [63] A. Melsse, *et al.*, "Morphometric characterization of watersheds using GIS and digital elevation models," *Journal of Hydrology*, 2025.
- [64] R. Maddamsetty, *et al.*, "Morphometric analysis of watershed characteristics using GIS and remote sensing techniques," *Environmental Earth Sciences*, 2023.
- [65] Corporación Autónoma Regional del Tolima, *Guía Técnica para la Delimitación y Caracterización de Cuencas Hidrográficas*. Ibagué, Colombia: CORTOLIMA, 2018.
- [66] J. Cabrera, *et al.*, "Morphometric characterization of watersheds using GIS techniques for hydrological assessment," *Sustainability*, vol. 14, 2022.
- [65] Corporación Autónoma Regional del Tolima, *Guía Técnica para la Delimitación y Caracterización de Cuencas Hidrográficas*. Ibagué, Colombia: CORTOLIMA, 2018.
- [66] J. Cabrera, *et al.*, "Morphometric characterization of watersheds using GIS techniques for hydrological assessment," *Sustainability*, vol. 14, 2022.
- [67] R. E. Horton, "Drainage-Basin Characteristics," *Transactions, American Geophysical Union*, vol. 13, pp. 350–361, 1932.

- [68] M. Villón Bejar, *Hidrología*. 2.^a ed. Lima, Perú: Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2002.
- [69] D. Valencia Pérez, *Caracterización morfométrica de cuencas hidrográficas mediante herramientas SIG*. 2023.
- [70] C. Sassolas-Serrayet, F. Birgand, P. G. M. Zollinger, *et al.*, "Watershed morphometric descriptors and their hydrological significance: A review," *Journal of Hydrology*, vol. 567, pp. 1–15, 2018.
- [71] B. P. Singh and S. K. Verma, "Geomorphometric characterization of watersheds using digital elevation models and GIS techniques for hydrological assessment," *Journal of Hydrology*, vol. 629, Art. no. 130828, 2024.
- [72] A. N. Strahler, "Hypsometric (Area-Altitude) Analysis of Erosional Topography," *Geological Society of America Bulletin*, vol. 63, no. 11, pp. 1117–1142, 1952.
- [73] R. J. Pike and S. E. Wilson, "Elevation–Relief Ratio, Hypsometric Integral, and Geomorphic Area–Altitude Analysis," *Geological Society of America Bulletin*, vol. 82, no. 4, pp. 1079–1084, 1971.
- [74] Universitat Politècnica de València, *Morfometría de Cuencas Hidrográficas: Rectángulo Equivalente y Parámetros Geométricos*. Valencia, España: Universitat Politècnica de València, s.f.
- [75] A. N. Strahler, "Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology," *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 38, no. 6, pp. 913–920, 1957.
- [76] World Meteorological Organization (WMO), *International Meteorological Vocabulary*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization.
- [77] J. Salguero Pérez, *Hidrología Aplicada*. 2021.
- [78] National Weather Service, *JetStream—Types of Precipitation*. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Silver Spring, MD, USA. Disponible en: https://www.weather.gov/jetstream/precipitation_types.
- [79] *Encyclopaedia Britannica*, "Orographic precipitation." Encyclopaedia Britannica, Inc. Disponible en: <https://www.britannica.com/science/orographic-precipitation>
- [80] Esri, *ArcGIS Pro Glossary: Isohyet*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/>

- [81] American Meteorological Society, *Glossary of Meteorology: Isotherm*. Boston, MA, USA: American Meteorological Society. Disponible en: <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Isotherm>
- [82] World Meteorological Organization (WMO), *State of the Global Climate 2024*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2024.
- [83] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: FAO, 1998.
- [84] U.S. Geological Survey (USGS), *What is a Geographic Information System (GIS)?* Reston, VA, USA: U.S. Geological Survey. Disponible en: <https://www.usgs.gov/>
- [85] Esri, *How Interpolation Works (Spatial Analyst)*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/>
- [86] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1998.
- [87] Federal Emergency Management Agency (FEMA), *National Flood Insurance Program (NFIP): Glossary*. Washington, DC, USA: FEMA. Disponible en: <https://www.fema.gov/flood-insurance>
- [88] L. A. Arneson, L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse, and P. E. Clopper, *Evaluating Scour at Bridges*, 5th ed., HEC-18, FHWA, 2012.
- [89] J. Hurtado de Barrera, *Metodología de la Investigación: Guía para la Comprensión Holística de la Ciencia*, 4.^a ed., 2012.
- [90] J. Hurtado de Barrera, *Metodología de la Investigación Holística*, 3.^a ed., 2008.
- [91] E. E. Gallardo Echenique, *Metodología de la Investigación: Manual Autoformativo Interactivo*. Huancayo, Perú: Universidad Continental, 2017.
- [92] G. Morán and D. Alvarado, *Métodos de Investigación*. Quito, Ecuador: Editorial Jurídica del Ecuador, 2010.
- [93] C. A. Bernal, *Metodología de la Investigación*, 3.^a ed. Bogotá, Colombia: Pearson Educación, 2010.
- [94] V. T. Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana, 1994.

- [95] CLIRSEN and SIGAGRO, *Geomorfología del Ecuador: Memoria Técnica*. Quito, Ecuador, 2009.
- [96] Instituto Espacial Ecuatoriano (IEE) y MAGAP-SINAGAP, *Memoria Técnica: Geomorfología y Suelos del Ecuador*. Quito, Ecuador, 2012.
- [97] J. A. Páez Molineros, *Geomorfología Fluvial: Procesos y Formas del Relieve Fluvial*. Bogotá, Colombia, 2019.
- [98] P. Bustillos *et al.*, “Geology of the Macuchi Unit, Western Cordillera of Ecuador,” 2016.
- [99] D. Gordon Madruñero, *Caracterización Geológica y Metalogenética del Bloque Macuchi, Ecuador*, 2024.
- [100] Esri, *How Stream Order works—ArcGIS Pro Documentation*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute, 2024.
- [101] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), *Visor de Estaciones Meteorológicas e Hidrológicas*. Quito, Ecuador, 2026.
- [102] Esri, *How IDW and Kriging work—ArcGIS Pro Documentation*. Redlands, CA, USA: Environmental Systems Research Institute, 2024.
- [103] World Meteorological Organization (WMO), *International Meteorological Vocabulary*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization. [Online]. Available: <https://wmo.int>
- [104] Secretaría de Gestión de Riesgos (SGR), *Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Amenaza por Inundación*. Quito, Ecuador: Secretaría de Gestión de Riesgos, 2017.
- [105] D. Vicencio, *Modelación hidráulica con HEC-RAS 2D: Preparación del terreno y procesamiento SIG*. 2022.
- [106] J. Salguero Pérez, *Hidrología*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS), Guatemala, 2021.
- [107] L. Rodríguez Fiallos, *Estudio de lluvias intensas*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), Ecuador, 1999.
- [108] L. A. Arneson, L. W. Zevenbergen, P. F. Lagasse y P. E. Clopper, *Evaluating Scour at Bridges*. Federal Highway Administration, Hydraulic Engineering Circular No. 18, FHWA-HIF-12-003, 2012.
- [109] P. Y. Julien, *Erosion and Sedimentation*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

- [110] U.S. Army Corps of Engineers (USACE), *HEC-HMS Hydrologic Modeling System: Technical Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center, 2024.
- [111] U.S. Army Corps of Engineers (USACE), *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual*. Hydrologic Engineering Center, 2024.
- [112] U.S. Army Corps of Engineers (USACE), *HEC-RAS 2D User's Manual*. Hydrologic Engineering Center, 2024.
- [113] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), *Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación*. Quito, Ecuador: INAMHI, 2019.
- [114] P. Pourrut, *Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos*. Quito, Ecuador: Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica, 1983.
- [115] F. Portilla Farfán, *Agroclimatología del Ecuador*. Quito, Ecuador, 2018.
- [116] V. M. Ponce, *El sistema de codificación Pfafstetter para la identificación de cuencas hidrográficas*. San Diego, CA, USA: San Diego State University, 2015.

ANEXOS.

ANEXO A: Levantamiento topográfico:



ANEXO B: Encuesta aplicada

ENCUESTA PARA PROPIETARIOS DE PREDIOS UBICADOS EN EL PERÍMETRO RIBEREÑO DEL RÍO CALUMA

Objetivo: Recopilar información sobre afectaciones ocasionadas por crecidas y procesos de socavación del río Caluma en el casco urbano del cantón Caluma, para complementar el análisis hidrológico, hidráulico y SIG de la investigación.

Instrucciones: Marque con una (X) la respuesta que corresponda. Cuando se indique, puede seleccionar más de una opción.

SECCIÓN A. IDENTIFICACIÓN DEL PREDIO

1. Código del predio: _____
2. Barrio o sector: _____
3. Coordenada GPS (si es posible): _____
4. Tipo de predio: ☐ Vivienda ☐ Comercial ☐ Institucional ☐ Mixto
5. Tiempo de residencia o permanencia: ☐ Menos de 5 años ☐ 5–10 años ☐ 11–20 años ☐ Más de 20 años
6. Distancia aproximada al río: ☐ Menos de 10 m ☐ 10–25 m ☐ 25–50 m ☐ Más de 50 m

SECCIÓN B. HISTORIAL DE INUNDACIONES

7. ¿Su predio ha sufrido inundaciones causadas por el río Caluma? ☐ Sí ☐ No
8. ¿En qué años recuerda las mayores inundaciones? _____
9. Frecuencia de inundaciones en los últimos 10 años: ☐ 1 vez ☐ 2–3 veces ☐ 4–5 veces ☐ Más de 5 veces
10. Nivel máximo de agua alcanzado: ☐ Menos de 0,30 m ☐ 0,30–0,50 m ☐ 0,50–1,00 m ☐ Más de 1,00 m
11. Grado de afectación ocasionado por las inundaciones: ☐ Muy bajo ☐ Bajo ☐ Moderado ☐ Alto ☐ Muy alto

SECCIÓN C. PROCESOS DE SOCAVACIÓN

12. ¿Ha observado pérdida de terreno cerca de su predio? ☐ Sí ☐ No
13. ¿Cuánta pérdida aproximada de terreno ha observado? ☐ Menos de 1 m ☐ 1–3 m ☐ 3–5 m ☐ Más de 5 m
14. ¿La erosión observada ha aumentado en los últimos años? ☐ Sí ☐ No ☐ No sabe

15. ¿Existen obras de protección ribereña cerca de su predio? ☐ Sí ☐ No

16. Si existen, ¿considera que funcionan adecuadamente? ☐ Sí ☐ Parcialmente ☐ No

SECCIÓN D. DAÑOS OBSERVADOS

17. ¿Qué daños ha observado? (Puede marcar más de una opción)

☐ Grietas en edificaciones

☐ Colapso de muros

☐ Pérdida de terreno

☐ Daños en vías

☐ Daños en redes de agua potable

☐ Daños en alcantarillado

☐ Ninguno

SECCIÓN E. PERCEPCIÓN DEL RIESGO

18. Nivel de riesgo por inundación: ☐ Muy alto ☐ Alto ☐ Medio ☐ Bajo ☐ Nulo

19. Nivel de riesgo por socavación: ☐ Muy alto ☐ Alto ☐ Medio ☐ Bajo ☐ Nulo

20. ¿Ha recibido capacitación sobre gestión del riesgo? ☐ Sí ☐ No

21. ¿Considera necesaria la elaboración de mapas de riesgo? ☐ Sí ☐ No

22. ¿Considera prioritaria la construcción de obras de protección ribereña? ☐ Sí ☐ No

ANEXO C. Evidencia fotográfica de la aplicación de las encuestas en campo



ANEXO D: Base de datos obtenida de la encuesta

Identificación	Identificación	Identificación	Identificación	Identificación	Identificación	Identificación	Inundaciones	Inundaciones	Inundaciones	Inundaciones	Inundaciones	Socavaciones	Socavaciones	Socavaciones	Socavaciones	Socavaciones	Daños	Daños	Daños	Daños	Daños	Daños	Daños	Percepciones	Percepciones	Percepciones	Percepciones	Percepciones
ID	CODIGO	BARRIO	COORD	TIPO	RESID	DIST	P7	P8	P9	P10	P11	Pz12	P13	P14	P15	P16	P17_GRI	P17_CO L	P17_P E R	P17_VI AS	P17_A P	P17_AL C	P17_NI N	P18	P19	P20	P21	P22
1		San vice nte	1°37'53 "S - 79°15'14"O	4	4	1	1	2024	1	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	1	1	0	1	1	2	1	1
2		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'15"O	4	4	4	2	2023	2	4	5	2	1	3	1	2	0	1	1	1	1	1	0	1	2	2	1	1
3		San vice nte	1°34'54 "S - 79°15'14"O	4	4	1	1	2023	2	4	5	1	2	1	2	3	1	0	0	0	0	0	0	3	1	2	1	1
4		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'17"O	4	4	1	1	2023	4	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	0	1	0	1	4	2	1	1
5		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'18"O	4	3	1	1	2023	3	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	0	1	1	0	1	1	2	1	1
6		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'18"O	2	3	1	1	2023	2	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	0	1	0	1	1	2	1	1
7		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'18"O	2	3	1	1	2023	3	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	0	0	1	0	1	1	2	1	1

8		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'1 8"O	1	4	1	1	202 3	4	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	0	1	0	1	1	2	1	1
9		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'1 7"O	2	3	2	1	202 3	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	1	0	1	0	1	4	2	1	1
10		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'1 9"O	2	4	1	1	202 3	4	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	0	1	0	1	1	2	1	1
11		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'1 5"O	2	3	4	1	202 3	2	4	5	1	2	3	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	2	2	1	1
12		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'1 6"O	4	3	3	1	202 3	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
13		San vice nte	1°37'54 "S - 79°15'1 6"O	2	4	4	1	202 3	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
14		San vice nte	1°37'54 "S - 79°15'1 6"O	2	3	4	1	202 3	2	4	5	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
15		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'1 6"O	2	3	3	1	202 3	2	4	5	2	1	3	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
16		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'1 6"O	4	4	3	1	202 3	2	4	5	1	1	2	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1

17		San vice nte	1°37'55 "S - 79°15'1 6"O	2	2	3	1	202 3	2	4	5	1	1	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
18		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'1 7"O	4	3	3	1	202 3	2	4	5	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
19		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'1 7"O	2	2	4	1	202 3	2	4	1	1	2	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
20		San vice nte	1°37'57 "S - 79°15'1 7"O	4	3	3	1	202 3	2	4	5	1	2	1	1	3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
21		San vice nte	1°37'56 "S - 79°15'1 9"O	2	3	3	1	202 3	2	4	5	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
22		San vice nte	1°37'50 "S - 79°15'1 2"O	2	1	4	2	202 4	2	4	4	2	1	3	1	3	1	1	0	1	1	1	0	2	2	2	1	1
23		San vice nte	1°37'51 "S - 79°15'1 2"O	4	4	4	2	202 0	2	4	4	2	1	3	1	3	0	1	0	1	1	1	0	2	2	2	1	1
24		San vice nte	1°37'52 "S - 79°15'1 3"O	2	1	2	1	202 3	2	4	5	1	2	2	2	3	1	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	1
25		San vice nte	1°37'53 "S - 79°15'1 4"O	4	4	1	1	202 3	2	4	4	1	3	3	1	2	1	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	1

26		San vice nte	1°37'53 "S - 79°15'1 3"O	4	1	4	2	202 3	2	4	2	2	1	3	2	3	0	1	0	0	1	1	0	2	2	2	1	1
27		San vice nte	1°37'52 "S - 79°15'1 2"O	1	4	3	2	202 0	3	4	2	2	1	3	2	3	0	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	1
28		San vice nte	1°37'50 "S - 79°15'1 1"O	4	4	3	1	202 4	3	4	2	2	1	1	2	3	0	1	0	1	1	1	0	3	2	2	1	1
29		San vice nte	1°37'49 "S - 79°15'1 1"O	1	4	3	2	202 4	2	4	3	2	1	3	1	2	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	2	1
30		San vice nte	1°37'50 "S - 79°15'1 1"O	4	4	4	2	202 3	3	3	4	2	1	3	1	3	1	1	1	1	0	1	0	2	2	2	1	1
31		San Vice nte	1°37'58 "S - 79°15'1 7"O	1	3	1	1	202 4	1	1	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	1	1	0	1	1	2	1	1
32		San Vice nte	1°38'00 "S - 79°15'1 6"O	1	2	2	1	202 4	1	3	4	2	1	3	1	3	0	1	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1
33		San Vice nte	1°38'00 "S - 79°15'1 8"O	4	4	3	1	202 4	3	4	2	2	1	1	2	3	0	1	0	1	1	1	0	1	1	2	1	1
34		La Fort una	1°38'02 "S - 79°15'1 8"O	2	3	1	1	202 3	3	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	1	1	0	1	2	2	1	1

35		La Fort una	1°38'05 "S - 79°15'2 0"O	4	4	4	1	202 4	2	4	3	2	1	3	1	2	0	1	0	1	1	1	0	3	2	2	1	1
36		La Fort una	1°38'06 "S - 79°15'2 1"O	4	4	1	1	202 3	4	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	1	0	1	0	1	4	2	1	1
37		La Fort una	1°38'08 "S - 79°15'2 3"O	4	3	1	1	202 3	3	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	0	1	1	0	1	1	2	1	1
38		La Fort una	1°38'09 "S - 79°15'2 5"O	2	3	1	1	202 4	2	4	5	2	1	3	1	3	0	1	1	1	0	1	0	1	1	2	1	1
39		Cent ro	1°38'00 "S - 79°15'2 6"O	2	3	3	1	202 3	2	4	5	1	3	3	1	3	1	1	1	1	0	0	0	1	2	2	1	1
40		Cent ro	1°37'58 "S - 79°15'2 4"O	2	3	1	1	202 3	1	3	4	2	1	3	1	3	0	1	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1
41		Cent ro	1°37'57 "S - 79°15'2 2"O	2	2	3	1	202 3	2	4	5	1	1	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
42		Cent ro	1°37'54 "S - 79°15'1 9"O	2	1	4	2	202 4	2	4	4	2	3	3	1	3	1	1	0	1	1	1	0	2	2	2	1	1
43		Cent ro	1°37'49 "S - 79°15'1 5"O	4	3	1	1	202 3	3	4	5	2	1	3	1	3	0	1	0	0	1	1	0	1	1	2	1	1

44		El Hemisferio	1°37'37" S - 79°15'07" O	2	3	2	1	2023	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	1	0	1	0	1	3	2	1	1
45		Sanviente	1°37'48" S - 79°15'09" O	2	3	4	1	2023	2	4	5	1	2	3	1	3	0	1	1	1	0	0	0	1	2	2	1	1
46		Sanviente	1°37'47" S - 79°15'09" O	2	4	4	1	2024	2	4	5	1	3	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
47		El Hemisferio	1°37'46" S - 79°15'08" O	4	3	4	1	2023	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	1	0	0	0	1	1	2	1	1
48		El Hemisferio	1°37'44" S - 79°15'07" O	2	3	3	1	2023	2	4	5	2	1	3	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
49		El Hemisferio	1°37'42" S - 79°15'05" O	4	4	3	1	2023	2	4	5	1	1	3	1	3	1	1	1	1	0	0	0	1	1	2	1	1
50		El Hemisferio	1°37'38" S - 79°15'04" O	2	2	3	1	2024	2	4	5	1	1	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1
51		Gua yabal	1°38'11" S - 79°15'39" O	4	3	3	1	2023	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	1	0	0	0	1	1	2	1	1
52		Gua yabal	1°38'10" S - 79°15'37" O	4	3	4	1	2023	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	1	1	1	0	1	1	2	1	1

53		Gua yaba l	1°38'13 "S - 79°15'4 3"O	1	3	4	1	202 3	2	4	5	1	2	1	1	3	0	1	1	0	1	1	0	1	1	2	1	1
54		La Fort una	1°38'16 "S - 79°15'3 9"O	2	3	3	1	202 3	2	4	5	1	1	1	1	3	1	1	1	0	1	1	0	1	1	2	1	1
55		La Fort una	1°38'15 "S - 79°15'3 6"O	2	1	2	1	202 3	2	4	5	1	2	2	2	3	0	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	1
56		La Fort una	1°38'14 "S - 79°15'3 5"O	4	4	1	1	202 3	2	4	4	1	3	3	1	2	0	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	1
57		La Fort una	1°38'16 "S - 79°15'3 8"O	1	4	1	2	202 4	2	4	2	2	1	3	2	3	0	1	0	0	1	1	0	2	2	2	1	1
58		La Fort una	1°38'10 "S - 79°15'2 6"O	2	4	3	2	202 3	3	4	2	2	1	3	2	3	0	1	1	1	1	1	0	2	2	2	1	1
59		Cent ro	1°37'58 "S - 79°15'2 3"O	4	4	3	1	202 4	3	4	3	2	2	1	2	3	0	1	0	1	1	1	0	3	2	2	1	1
60		Cent ro	1°37'55 "S - 79°15'2 0"O	2	4	3	2	202 4	2	4	3	2	2	3	1	2	0	1	0	1	1	1	0	1	1	2	2	1
61		Cent ro	1°37'52 "S - 79°15'1 7"O	2	3	4	2	202 3	3	3	4	2	1	3	1	2	0	1	1	1	0	1	0	2	2	2	1	1

62		San vice nte	1°37'47 "S - 79°15'1 1"O	1	1	4	2	202 4	2	4	4	2	1	3	1	3	1	1	0	1	1	1	0	2	2	2	1	1
----	--	--------------------	-----------------------------------	---	---	---	---	----------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---