



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

“EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA REPRESA VELASCO
IBARRA Y SU IMPACTO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS
HÍDRICOS, EN EL CANTÓN LA LIBERTAD.”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORAS:

MISHELL THALIA CARDENAS SOUZA
FÁTIMA DENISSE PARRALES NEIRA

TUTOR:

ING. ORTIZ SAFADI GUIDO MOISES Mg.

La Libertad - Ecuador

2025



UPSE

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**“EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA REPRESA VELASCO
IBARRA Y SU IMPACTO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS
HÍDRICOS, EN EL CANTÓN LA LIBERTAD”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORAS:

**MISHELL THALIA CARDENAS SOUZA
FÁTIMA DENISSE PARRALES NEIRA**

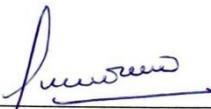
TUTOR:

Ing. Ing. ORTIZ SAFADI GUIDO MOISES Mg.

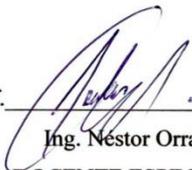
La Libertad - Ecuador

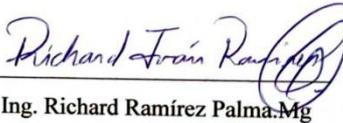
2025

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 
Ing. Lucrecia Moreno Alcivar PhD.
DIRECTOR DE CARRERA

f. 
ING. Guido Ortiz Safadi Mg.
DOCENTE TUTOR

f. 
Ing. Néstor Orrala.Mg.
DOCENTE ESPECIALISTA

f. 
Ing. Richard Ramírez Palma.Mg
DOCENTE UIC

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

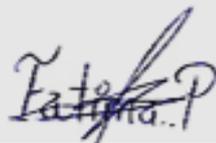
Nosotras, **CARDENAS SOUZA MISHELL THALIA** y **PARRALES NEIRA FÁTIMA DENISSE** declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **“EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA REPRESA VELASCO IBARRA Y SU IMPACTO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL CANTÓN LA LIBERTAD”**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**, Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, por lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente a nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,

f. 

Mishell Thalia Cárdenas Souza
C.I. 0502929250
AUTORA DE TESIS

f. 

Fátima Denisse Parrales Neira
C.I. 0928863547
AUTORA DE TESIS

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

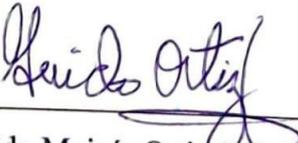
Ing. Guido Moisés Ortiz Safadi Mg.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo **“EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA REPRESA VELASCO IBARRA Y SU IMPACTO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, EN EL CANTÓN LA LIBERTAD”**, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, elaborado por los Srtas. **CARDENAS SOUZA MISHELL THALIA** y **PARRALES NEIRA FÁTIMA DENISSE**, egresadas de la Carrera de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado la presente Tesis de Grado, la apruebo en todas sus partes.

FIRMA DEL TUTOR

f. 

Ing. Guido Moisés Ortiz Safadi Mg.

C.I. 0904149481

DOCENTE TUTOR

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Certificación de Gramatólogo

Lic. MARIANA MEDINA SUÁREZ

Magister En Letras Y Enseñanza

Civ. Modelo Callesera

Miércoles, 11 de junio de 2025

Certifica:

Que después de revisar el contenido del trabajo de titulación en opción al título de INGENIERA CIVIL de: **CÁRDENAS SOUZA MISHHELL THALIA** y **PARRALES NEIRA FÁTIMA DENISSE**, cuyo tema es: “**EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA REPRESA VELASCO IBARRA Y SU IMPACTO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, EN EL CANTÓN LA LIBERTAD**”, me permito declarar que el trabajo investigativo se encuentra idóneo y puede ser expuesto ante el jurado respectivo para la defensa del tema en mención.

Es todo cuanto puedo manifestar en honor a la verdad.


Lic. Mariana Medina Suárez, MSc.
Docente de Español: Literatura
Cel: 0986380800
e-mail: marianoemf@hotmail.com

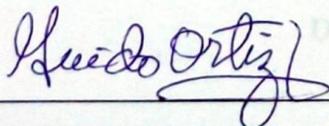
REPORTE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema **“EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA REPRESA VELASCO IBARRA Y SU IMPACTO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, EN EL CANTÓN LA LIBERTAD.”**, elaborado por **CARDENAS SOUZA MISHELL THALIA** y **PARRALES NEIRA FÁTIMA DENISSE**, estudiantes egresados de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente Tesis, se encuentra con un % de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el presente informe.

Adjunto, reporte de similitud.

Atentamente:

f. _____



Ing. Guido Moisés Ortiz Safadi Mg.

C.I. 0904149481

DOCENTE TUTOR



CERTIFICADO DE ANÁLISIS
magister

TESIS- CARDENAS MISHELL Y PARRALES FATIMA

5%
Textos sospechosos



5% **Similitudes**
< 1% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas
0% **Idiomas no reconocidos**
12% **Textos potencialmente generados por la IA (ignorado)**

Nombre del documento: TESIS- CARDENAS MISHELL Y PARRALES FATIMA.pdf
ID del documento: 57bcace0415242ed18e9b36a5f2867e34d604ec8
Tamaño del documento original: 2,57 MB

Depositante: GUIDO MOISES ORTÍZ SAFADI
Fecha de depósito: 12/6/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 12/6/2025

Número de palabras: 14.626
Número de caracteres: 105.277

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/12670/1/UPSE-TIC-2025-0008.pdf 3 fuentes similares	1%		Palabras idénticas: 1% (207 palabras)
2	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/13112/1/UPSE-TPE-2025-0012.pdf 2 fuentes similares	1%		Palabras idénticas: 1% (160 palabras)
3	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/10586/1/UPSE-TIC-2023-0030.pdf 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (97 palabras)
4	Avance introduccion dada baja.docx Taller 1. Definir la introducción(7... #664132 El documento proviene de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (55 palabras)
5	COPILATIO.docx COPILATIO #1159e4 El documento proviene de mi grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (43 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.upse.edu.ec Caracterización geotécnica de la vía alterna Punta Carn... https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/5035/1/UPSE-TIC-2019-0014.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
2	hess.copernicus.org Technical note: Bathymetry observations of inland water b... https://hess.copernicus.org/articles/22/4165/2018/hess-22-4165-2018.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
3	doi.org Risk Assessment of the 2022 Nigerian Flood Event Using Remote Sensing... https://doi.org/10.3390/rs17111814	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (26 palabras)
4	doi.org Non-Darcy Seepage Models of Broken Rock Mass Under Changed Hydra... https://doi.org/10.3390/w17111676	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (28 palabras)
5	doi.org Mathematical Model of Fluid Flow Machine Unit for a Small-Scale Compr... https://doi.org/10.3390/en1812874	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (26 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155518
2	https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
3	http://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/4905
4	https://drive.google.com/drive/folders/1Q26Zk4wf8o8KNVfpueGQXumiz2mPr
5	https://doi.org/10.1016/j.jjenman.2024.121528



Guido Moises Ortiz Safadi



DEDICATORIA

Quiero dedicar principalmente a Dios, en primer lugar por permitirme llegar hasta este punto de mi vida, cumpliendo con uno de los tantos propósitos que anhelo; por ser mi guía espiritual quien me protege, por ayudarme a terminar mi carrera universitaria, por permitirme tener en mi vida a las personas que estimo y han sido un gran soporte y compañía en todo mi periodo estudiantil, gracias a mi familia por el apoyo brindado en cada paso que doy, en especial en este logro, gracias por creer en mí, no ha sido fácil, pero gracias a las experiencias de cada día hasta lo más complicado se puede llegar a cumplir, gracias a mis padres Pablo Chávez Cárdenas y Yessenia Souza Haz quienes fueron mis formadores desde que nací, todo su esfuerzo por inculcarme el bien se ven reflejados en cada paso que doy, gracias por motivarme hasta en mis peores momentos a salir adelante y ser mi gran fuente de fortaleza, A mis hermanas, por darme siempre esa motivación para llegar a ser mejor cada día.

Agradezco a mis profesores y demás personas que fueron parte de este proceso de formación, quienes con sus valiosos conocimientos lograron brindar grandes aportes para mi crecimiento como profesional.

Ellos fueron los pilares fundamentales que me permitieron avanzar y perseverar ante cualquier obstáculo de la vida. Su sabiduría, sacrificio y ejemplo de integridad han sido la base sobre la cual he construido mis logros.

Todo este trabajo logrado fue posible gracias a ustedes

CÁRDENAS SOUZA MISHHELL THALIA

Quiero dedicar esta tesis, en primer lugar, a Dios, por haber sido mi guía constante a lo largo de este camino. Su presencia me dio la voluntad, la inteligencia y la fortaleza necesarias para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles. Fue en esos instantes de incertidumbre donde más me encomendé a Él y encontré la paz y claridad para continuar.

A mis padres, Joffre Parrales y Zoila Neira, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por su esfuerzo constante y por enseñarme con el ejemplo que la perseverancia y el trabajo honesto son la base de todo logro. No hay palabras suficientes para agradecer todo lo que han hecho por mí; sólo ruego a Dios me dé la oportunidad de retribuirles, aunque sea en parte, todo lo que me han dado.

A mi hermano, Jonathan Parrales, por su apoyo silencioso pero constante, por estar presente a pesar de la distancia y por tender siempre una mano cuando más lo necesitaba.

A mi enamorado, Renato Vera, por ser mi roca, mi refugio y mi compañero incondicional. Gracias por tu paciencia, tu aliento y tu amor. Tu presencia ha sido una fuente invaluable de fuerza y alegría en este proceso.

A mi amiga y compañera, Mishell Cárdenas, por ser una luz en este camino. Tu amistad ha sido un regalo que valoro profundamente, y tu compañía ha hecho más llevaderos los desafíos académicos y personales.

Finalmente, a mis profesores, por las enseñanzas impartidas más allá del aula. Gracias por compartir no solo conocimiento, sino también valores, por inspirarme a ser mejor profesional y, sobre todo, mejor persona.

PARRALES NEIRA FATIMA DENISSE

AGRADECIMIENTOS

Mi primer agradecimiento es a Dios por darnos la dicha de poder estar un día más con vida y otorgarnos las fuerzas necesarias para culminar un sueño anhelado por varios años de esfuerzo y dedicación como lo es nuestro crecimiento profesional.

A mis padres por estar en todo momento durante mi carrera universitaria, impulsándome a superar y alcanzar mi meta a corto y largo plazo.

A la Ing. Lucrecia Moreno quien ha dejado una huella imborrable en mi formación, con sus conocimientos, experiencia y motivación brindándome su apoyo.

Al Ing. Richard Ramírez docente UIC, quien orientó este proceso de investigación y la guía profesional necesaria para culminar este proyecto de Titulación. A la Ing. Guido Ortiz docente de tutor, quien nos guio con sus conocimientos para poder realizar nuestro trabajo de titulación.

A la Ing. Raúl Villao quien me compartió sus conocimientos no solo académicos, sino también enseñanzas de vida, quien me incentivo en seguir adelante y no detenerme en cada obstáculo que podría presentarse.

A nuestros amigos y compañeros quienes nos ayudaron en varias ocasiones: Renato Vera, Parrales Fátima, Bernabé Darling, Ordoñez Oscar, Pérez Jostin, Galdea Kelvin, Ching Francisco, Defaz Jhon, Villacis Peter, Pilco Anthony.

Un agradecimiento especial a la Universidad Estatal Península de Santa Elena y a todos los Docentes de la Carrera de Ingeniería Civil que nos enriquecieron del conocimiento necesario para dar fin a nuestra etapa universitaria.

CÁRDENAS SOUZA MISHELL THALIA

Ante todo, agradezco a Dios por acompañarme en este camino lleno de desafíos. Su guía y fortaleza fueron esenciales para culminar con éxito cada etapa de este proceso.

A mis padres, por ser mi pilar constante, por su apoyo incondicional y por enseñarme a no rendirme frente a las adversidades. Mi respeto y amor por ustedes es infinito. A mi amado Zeus, fiel compañero de noches de estudio, gracias por ser ese impulso silencioso cuando más lo necesité.

Expreso mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis. En especial, al Ing. Guido Safadi, mi tutor, por su orientación, paciencia y compromiso, cuyas observaciones fueron claves para alcanzar los objetivos propuestos.

También agradezco a mi universidad, y particularmente a la Ing. Lucrecia Moreno, por fomentar un entorno de apoyo académico y humano que fortaleció este proceso.

A quienes me acompañaron en esta etapa, gracias por su respaldo y por contribuir a mi crecimiento personal y profesional. A mi enamorado Renato Vera, por creer siempre en mí, y a mi amiga y compañera Mishell Cárdenas, cuyo compromiso fue fundamental para este trabajo. A mis amistades Kelvin Galdea, Peter Villacís y a mis compañeros de carrera, por su ejemplo de integridad y amistad. Este logro también les pertenece. Gracias de todo corazón.

PARRALES NEIRA FÁTIMA DENISSE

CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	iii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA	iv
REPORTE ANTIPLAGIO	v
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTOS	ix
RESUMEN	xvi
ABSTRAC	xvii
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	18
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	20
1.2. ANTECEDENTES.....	22
1.3. HIPÓTESIS.....	23
1.3.1. Hipótesis General.....	23
1.3.2. Hipótesis específicas.....	23
1.4. OBJETIVOS	24
1.4.1. Objetivo General.....	24
1.4.2. Objetivos específicos.....	24
1.5. ALCANCE.....	25
1.6. VARIABLES	25
1.6.1. Variables independientes.....	25
1.6.2. Variables dependientes.....	25
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. HIDRAULICA	26
2.1.1. Presión en los fluidos:.....	26

2.1.2.	Ecuación de la continuidad	27
2.1.3.	Teorema de Bernoulli.	27
2.1.4.	Pérdida de carga y ecuación de Darcy-Weisbach	28
2.1.5.	Ecuación de energía para sistemas reales:	29
2.1.6.	Velocidad y caudal.....	29
2.1.7.	Aplicaciones prácticas en la infraestructura hidráulica	30
2.2.	HIDROLOGÍA.....	30
2.2.1.	El ciclo hidrológico.....	30
2.2.2.	Infiltración y escorrentía	30
2.2.3.	Balance hídrico	31
2.3.	MODELOS HIDROLÓGICOS	31
2.4.	Importancia en la gestión de represas	31
2.5.	Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH).....	32
2.5.1.	Instrumentos de la GIRH	32
2.5.2.	Relevancia para la represa Velasco Ibarra	32
2.5.3.	Impacto ambiental de las represas	33
2.5.4.	Alteración de los ecosistemas acuáticos	33
2.5.5.	Sedimentación.....	33
2.5.6.	Calidad del agua y eutrofización	33
2.6.	MEDIDAS DE MITIGACIÓN	33
3.	CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	34
3.1.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	34
3.1.1.	Tipo de Investigación.....	34
3.1.2.	Nivel de Investigación.	34
3.2.	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	34
3.2.1.	Método.....	35
3.2.2.	Enfoque.....	35

3.2.3.	Diseño.....	35
3.3.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO	35
3.3.1.	Población.....	35
3.3.2.	Muestra.....	36
3.3.3.	Muestreo.....	36
3.4.	UBICACIÓN DEL SECTOR DE ESTUDIO.....	36
3.5.	TECNICAS DE LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	37
3.6.	DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA	38
3.7	METODOLOGÍA DEL OE1.: GENERAR UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) Y CALCULAR PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA APORTANTE A LA REPRESA VELASCO IBARRA.	40
3.7.1.	Recolección y procesamiento inicial de datos geoespaciales	41
3.7.2.	Procesamiento en Sistemas de Información Geográfica (SIG)	41
3.7.3.	Cálculo de parámetros morfométricos.....	42
3.7.4.	Validación y representación cartográfica	43
3.8.	METODOLOGÍA DEL OE.2: ESTIMAR LOS CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 50 100 AÑOS MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL MODIFICADO Y BALIZAR SU COMPORTAMIENTO ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS RCP 4.5 Y 8.5	43
3.8.1.	Recolección de información climática e hidrometeorológica.....	44
3.8.2.	Determinación de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF) 44	
3.8.3.	Estimación de caudales máximos con el método Racional Modificado... 45	
3.8.4.	Validación ante escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5	46
3.8.5.	Representación cartográfica y análisis comparativo.....	46
3.9.	METODOLOGÍA DEL OE3.: SIMULAR LA CAPACIDAD DE EVACUACIÓN Y LAMINACIÓN DEL ALIVIADERO DE LA REPRESA VELASCO IBARRA MEDIANTE MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS	

2D, CONSIDERANDO CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO, SEDIMENTACIÓN ACUMULADA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS, CON EL FIN DE VERIFICAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL.....	46
3.9.1. Preparación y procesamiento de datos topográficos.....	47
3.9.2. Configuración del modelo hidráulico bidimensional.....	47
3.9.3. Verificación normativa y análisis de resultados	48
3.9.4. Consideración del segundo aliviadero	49
4.	50
4.1. RESULTADOS DEL O.E.1.: GENERAR UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) Y CALCULAR PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA APORTANTE A LA REPRESA VELASCO IBARRA	50
4.1.1. Parámetros base para la caracterización morfométrica.....	50
4.1.2. Delimitación de la cuenca.....	50
4.1.3. Análisis visual y validación con imágenes satelitales Sentinel-2	53
4.1.4. Cálculo de parámetros morfométricos y herramientas utilizadas.....	55
4.2. RESULTADOS DEL O.E.2.: ESTIMAR LOS CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 50, 100 y 200 AÑOS MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL MODIFICADO Y VALIDAR SU COMPORTAMIENTO ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS RCP 4.5 Y 8.5	61
4.2.1. Obtención de los datos y generación de las curvas IDF	61
4.2.2. Determinación del tiempo de concentración (Tc).....	63
4.2.3. Determinación del coeficiente de escorrentía.....	63
4.2.4. Cálculo de las intensidades máximas de precipitación.....	64
4.2.5. Cálculo de los caudales máximos (Q).....	64
4.2.6. Validación ante escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5	65
4.3. RESULTADOS DEL O.E.3.: SIMULAR LA CAPACIDAD DE EVACUACIÓN Y LAMINACIÓN DEL ALIVIADERO DE LA REPRESA VELASCO IBARRA MEDIANTE MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS	

2D, CONSIDERANDO CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS, CON EL FIN DE VERIFICAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL.....	67
4.3.1. Caracterización geométrica y topográfica del embalse	68
4.3.2. Indicadores morfométricos del embalse	72
4.3.3. Simulación hidráulica del aliviadero	74
5.1. CONCLUSIONES.....	76
5.2. Recomendaciones.....	78
6. ANEXOS.....	81
6.1. Anexos Fotográficos	81
6.2. Anexos Cartográficos y SIG (QGIS)	84

“EVALUACIÓN HIDROLÓGICA DE LA REPRESA VELASCO IBARRA Y SU IMPACTO EN LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS, EN EL CANTÓN LA LIBERTAD.”

Autoras: Mishell Thalia Cárdenas Souza
Fátima Denisse Parrales Neira

Tutor: Mg. Guido Moises Ortiz Safadi

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar las características hidrológicas, estructurales y operativas de la represa Velasco Ibarra, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena (Ecuador), con el fin de estimar su capacidad actual de abastecimiento hídrico frente a escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5. Metodológicamente, se aplicó un enfoque cuantitativo de nivel explicativo y tipo aplicado, empleando herramientas geoespaciales y de modelación hidrodinámica. La caracterización morfométrica de la cuenca se realizó mediante análisis SIG, imágenes satelitales y generación de un modelo digital de elevación. El área del aliviadero fue levantada mediante tecnología GNSS de alta precisión y fotogrametría aérea con dron. Se estimaron caudales máximos para periodos de retorno de 50, 100 Y 200 años usando el método Racional Modificado y se desarrolló una modelación hidráulica bidimensional en HEC-RAS 2D, considerando el efecto de sedimentación acumulada y obstrucciones aguas abajo.

[En esta sección se incorporarán los resultados obtenidos y las conclusiones principales del estudio.]

Palabras clave: recurso hídrico, represa, modelación hidrodinámica, cambio climático, cuenca hidrográfica.

“HYDROLOGICAL EVALUATION OF THE VELASCO IBARRA DAM AND ITS IMPACT ON WATER RESOURCES MANAGEMENT IN LA LIBERTAD”

Autoras: Cárdenas Souza Mishell Thalia
Parrales Neira Fátima Denisse

Faculty: Mg. Guido Moises Ortiz Safadi

ABSTRAC

This research aims to evaluate the hydrological, structural, and operational characteristics of the Velasco Ibarra dam, located in La Libertad Canton, Santa Elena Province (Ecuador), in order to estimate its current water supply capacity under climate scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. A quantitative, explanatory-level and applied-type methodology was used, involving geospatial tools and hydrodynamic modeling. The morphometric characterization of the contributing watershed was carried out through GIS analysis, satellite imagery, and the generation of a digital elevation model (DEM). The spillway area was surveyed using high-precision GNSS technology and aerial photogrammetry with a drone. Maximum flow rates for return periods of 50, 100 and 200 years were estimated using the Modified Rational Method, and a two-dimensional hydraulic simulation was developed in HEC-RAS 2D, considering sediment accumulation and downstream backwater effects.

[This section will include the results obtained and the main conclusions of the study.]

Palabras clave: *water resource, dam, hydrodynamic modeling, climate change, watershed.*

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una de las principales amenazas para la seguridad hídrica global, provocando alteraciones significativas en los patrones de precipitación, mayor frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos, reducción de la disponibilidad de agua superficial y salinización progresiva de cuerpos de agua en zonas costeras (IPCC, 2021; Pradhan et al., 2025). En este contexto, la capacidad de las infraestructuras hidráulicas tradicionales para responder eficazmente a condiciones climáticas más severas se encuentra seriamente comprometida. Particularmente, las represas construidas en décadas anteriores, bajo criterios de diseño que no contemplaban escenarios de variabilidad climática como los propuestos por los RCP (Representative Concentration Pathways), requieren ser evaluadas bajo un nuevo marco técnico-operativo que integre modelos hidrodinámicos avanzados, sensores de alta precisión y análisis geoespacial multiescala (Calvin et al., 2023; Liu et al., 2025).

La represa Velasco Ibarra, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, constituye una de las infraestructuras hidráulicas más relevantes de la región, utilizada para almacenamiento de agua con fines agrícolas, poblacionales y de conservación ecosistémica. No obstante, su funcionalidad actual se ve amenazada por diversos factores: envejecimiento estructural, incertidumbre sobre su capacidad real de evacuación y almacenamiento, ausencia de monitoreo hidrometeorológico continuo y posibles procesos de intrusión salina debido a la presión marina sobre acuíferos costeros, como lo evidencian estudios regionales (Gholizadeh et al., 2016; De La A Santos, 2019). A ello se suma la falta de integración de herramientas de evaluación hidrológica y topográfica modernas en la gestión de la infraestructura, lo que impide conocer con precisión su grado de vulnerabilidad frente a eventos extremos como crecidas súbitas o sequías prolongadas.

En términos técnicos, las proyecciones del IPCC para los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 indican un incremento promedio del 20 al 30 % en la intensidad de lluvias para regiones del litoral ecuatoriano hacia el año 2050, con una alta probabilidad de exceder los caudales de diseño de muchas estructuras de control construidas bajo normativas anteriores (IPCC, 2021). La modelación hidrodinámica y la simulación de

comportamiento hidráulico en condiciones forzadas se convierten entonces en herramientas clave para evaluar la capacidad operativa y de seguridad de sistemas como el aliviadero de la represa, en cumplimiento de normas como la ASCE/SEI 42-21 (American Society of Civil Engineers, 2021).

Desde el punto de vista metodológico, se requieren levantamientos topográficos de alta resolución con tecnología GNSS y fotogrametría aérea, generación de modelos digitales de elevación (DEM) y simulaciones en entornos computacionales como HEC-RAS 2D. Estos instrumentos permiten representar con precisión la geometría del sistema hidráulico, calcular caudales máximos asociados a periodos de retorno específicos (50 y 100 años), y proyectar escenarios de inundación o desbordamiento, asegurando un análisis hidrotécnico integral (USACE, 2022; Fernández & Castillo, 2021).

A partir de este panorama, el presente estudio tiene como objetivo evaluar las características hidrológicas, estructurales y operativas de la represa Velasco Ibarra, mediante una metodología que integra análisis morfométrico, modelación bidimensional en HEC-RAS y proyecciones climáticas basadas en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5. Se pretende cuantificar su capacidad actual de abastecimiento hídrico, analizar su comportamiento ante crecidas extremas y verificar el cumplimiento de criterios de seguridad establecidos por normativa internacional, todo ello con el fin de proveer a las autoridades locales de herramientas técnicas que respalden una gestión hídrica basada en evidencia.

Este trabajo se alinea con los principios de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), promovida por la ONU y adoptada en el marco del ODS 6: Agua limpia y saneamiento, y del ODS 13: Acción por el clima (United Nations, 2023). Al generar datos georreferenciados y modelos de simulación robustos, esta investigación contribuye al fortalecimiento de la planificación hídrica adaptativa en un territorio de alta vulnerabilidad hídrica como es la península de Santa Elena, fomentando la sostenibilidad, la resiliencia y la toma de decisiones informada frente a los efectos del cambio climático.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El cambio climático constituye uno de los principales desafíos del siglo XXI, cuyas manifestaciones incluyen alteraciones en los patrones de precipitación, incremento de eventos extremos, intrusión salina en zonas costeras y disminución de la disponibilidad hídrica (Pradhan et al., 2025). Estos fenómenos afectan directamente al ciclo hidrológico y exigen que la infraestructura hidráulica existente sea evaluada bajo nuevas condiciones de variabilidad climática (S. Liu et al., 2025). De acuerdo con el IPCC escenarios como el RCP 4.5 y RCP 8.5 proyectan un aumento sostenido de temperaturas y cambios significativos en la distribución espacial y temporal de las lluvias, con repercusiones directas sobre los sistemas de almacenamiento y regulación del agua (Calvin et al., 2023).

El agua, reconocida como un derecho humano esencial por las Naciones Unidas, es un recurso fundamental para el desarrollo agrícola, el consumo humano, la producción energética y la conservación de ecosistemas (Ward, 2023). Sin embargo, su gestión eficiente depende de la capacidad técnica, normativa y operativa de las infraestructuras hidráulicas para adaptarse a nuevas presiones ambientales y sociales (Baccour et al., 2022). En zonas con clima semiárido o costero, como muchas regiones de América Latina, esta situación se ve agravada por procesos de sobreexplotación, contaminación y salinización de fuentes hídricas (Idhirij & Ward, 2024).

En Ecuador, la provincia de Santa Elena presenta condiciones críticas: baja disponibilidad de fuentes hídricas superficiales permanentes, alta demanda agrícola y urbana, y creciente salinización de acuíferos costeros (Gholizadeh et al., 2016). Dentro de este contexto, el cantón La Libertad depende históricamente de la represa Velasco Ibarra como infraestructura clave para el almacenamiento y distribución de agua (Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón La Libertad, 2022). No obstante, esta estructura enfrenta múltiples amenazas: acumulación de sedimentos que reducen su volumen útil, obsolescencia de componentes hidráulicos y un aumento progresivo en la salinidad del agua almacenada (De La A Santos, 2019). A ello se suman deficiencias en el monitoreo de sus condiciones estructurales y en la modelación hidrológica para la toma de decisiones bajo escenarios de cambio climático (Briones et al., 2001).

La ausencia de estudios técnicos actualizados que integren herramientas geoespaciales, modelación hidrodinámica y proyecciones climáticas limita la capacidad de los gobiernos locales para diseñar planes de gestión hídrica eficientes y sostenibles (INAMHI, 2025). No contar con datos precisos sobre la capacidad real del embalse, el estado funcional de su aliviadero o los niveles de intrusión salina, representa un riesgo significativo para la seguridad hídrica, la producción agrícola y el bienestar de la población local, se plantea la necesidad de una evaluación integral de las condiciones hidrológicas, estructurales y operativas de la represa Velasco Ibarra, con el fin de generar información técnica confiable que permita mejorar la gestión de los recursos hídricos en el cantón La Libertad, adaptándose a los desafíos actuales y futuros del clima.

Esta investigación se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Agenda 2030 de las Naciones Unidas, principalmente el **ODS 6: Agua limpia y saneamiento**, al contribuir a la mejora de la gestión hídrica mediante el análisis técnico de una infraestructura de almacenamiento vital para la región. En particular, se vincula con las metas 6.4 y 6.5, al promover el uso eficiente del agua y la implementación de una gestión integrada de los recursos hídricos basada en información geoespacial y modelación hidrodinámica y de manera complementaria se alinea con el **ODS 13: Acción por el clima**, al incorporar escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 en la evaluación del comportamiento de la represa Velasco Ibarra, fortaleciendo las capacidades locales de adaptación frente a riesgos hidrológicos extremos. (United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2023)

La investigación se encuadra en la siguiente interrogante: **PG.** ¿Cómo influyen las condiciones hidrológicas, estructurales y operativas actuales de la represa Velasco Ibarra en la gestión sostenible de los recursos hídricos en el cantón La Libertad, considerando escenarios climáticos RCP 4,5 y RCP 8,5? y derivan preguntas específicas: **PE.1:** ¿Qué características morfométricas y zonas críticas de erosión y recarga hídrica pueden identificarse en la cuenca aportante a la represa Velasco Ibarra mediante levantamientos topográficos de alta resolución (fotogrametría y GNSS)?, **PE.2:** ¿Cuáles son los caudales máximos esperados para los periodos de retorno de 50 y 100 años, y cómo varía su confiabilidad bajo escenarios climáticos RCP 4,5 y RCP 8,5, considerando cambios en el uso de suelo? y **PE.3:** ¿Cuál es la capacidad hidráulica real del aliviadero de la represa frente a eventos extremos de precipitación, niveles de sedimentación acumulada y

remanso aguas abajo, y en qué medida cumple con los criterios de seguridad establecidos por la norma ASCE/SEI 42-21?

1.2. ANTECEDENTES.

Los antecedentes en un proyecto de investigación sirven para contextualizar la investigación dentro del conocimiento ya existente y justificar su relevancia (García Ramírez, 2019, 2021).

Los estudios nacionales incluyen:

(Lucas Chabla, 2014) en su tesis de grado titulada “**Evaluación de la calidad del agua en la represa San Vicente – Colonche**”, desarrolló un estudio orientado a determinar el estado del recurso hídrico mediante la aplicación de índices de calidad de agua (ICA) y bioindicadores como macroinvertebrados acuáticos. La investigación incluyó el análisis de parámetros fisicoquímicos (pH, oxígeno disuelto, conductividad, entre otros) y biológicos, permitiendo establecer una clasificación del agua según su aptitud para el consumo humano y riego. Este estudio resulta relevante como referencia metodológica para el análisis de la calidad del agua en embalses de la provincia de Santa Elena, aunque se centra en aspectos de calidad y no en el comportamiento hidrológico-operativo de la infraestructura como en el presente trabajo.

Rodríguez Santos (2022) en su tesis de maestría titulada “**Evaluación de la presa multipropósito El Azúcar en Santa Elena**”, realizó una valoración del desempeño hidráulico y de almacenamiento del embalse, identificando una subutilización de aproximadamente el 50 % de su volumen útil. El estudio abordó la capacidad de regulación del agua para riego y uso poblacional, incluyendo una revisión del estado físico de sus estructuras de control. Este antecedente ofrece una visión complementaria sobre la eficiencia de presas en la región, y aunque no incorpora modelación hidrodinámica ni proyecciones climáticas, permite establecer puntos de comparación con la represa Velasco Ibarra en términos de operación y aprovechamiento del recurso.

Murrieta Posligua, (2025) en su tesis de grado titulada “**Caracterización hidrológica de la cuenca del río Salanguillo, cantón Santa Elena**”, desarrolló un estudio enfocado en determinar el comportamiento hidrológico de una cuenca representativa del perfil costero semiárido de la provincia. La investigación incluyó la delimitación de la cuenca, análisis

morfométrico y estimación de caudales mediante métodos hidrológicos convencionales. Este antecedente guarda similitud metodológica con la presente investigación al abordar la caracterización de cuencas para fines de gestión hídrica, aunque sin integrar técnicas geoespaciales avanzadas ni modelación bajo escenarios de cambio climático.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis General.

La represa Velasco Ibarra presenta un desempeño hidráulico y estructural insuficiente para enfrentar caudales máximos generados por eventos extremos bajo escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, lo que compromete su capacidad de regulación hídrica y control de inundaciones en el cantón La Libertad.

1.3.2. Hipótesis específicas.

H.E.1.: La infraestructura hidráulica actual de la represa Velasco Ibarra presenta irregularidades geométricas y pérdidas de eficiencia física detectables mediante levantamiento topográfico de alta resolución (error vertical ≤ 10 cm), afectando su capacidad operativa y la precisión de los modelos hidrodinámicos.

H.E.2.: Los caudales máximos proyectados para periodos de retorno de 50 y 100 años, calculados bajo escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, superarán en más de un 15% la capacidad de regulación hídrica del embalse, comprometiendo la distribución de agua para riego y otros usos productivos.

H.E.3.: La capacidad hidráulica del aliviadero (diseñado para ≤ 250 m³/s) será superada por los caudales máximos modelados en HEC-RAS 2D (≥ 280 m³/s), generando un aumento del 25% en el riesgo de desbordamiento en eventos extremos, en incumplimiento de la norma ASCE/SEI 42-21.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

Evaluar las características hidrológicas, estructurales y operativas de la represa Velasco Ibarra en el Cantón La Libertad, mediante fotogrametría aérea, GNSS y modelación hidrodinámica con HEC-RAS, con el fin de cuantificar su capacidad actual de abastecimiento hídrico bajo escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5.

1.4.2. Objetivos específicos.

O.E.1.: Caracterizar morfométricamente la cuenca hidrográfica aportante a la represa Velasco Ibarra mediante levantamiento topográfico con GNSS y dron, procesamiento de imágenes satelitales y análisis SIG, con el fin de identificar parámetros de forma, zonas críticas de escorrentía y áreas de recarga hídrica.

O.E.2.: Estimar los caudales máximos de diseño para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años mediante el método racional modificado, aplicando parámetros IDF regionales y coeficientes de escorrentía derivados del uso de suelo, y validar dichos caudales frente a escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5.

O.E.3.: Simular la capacidad de evacuación y laminación del aliviadero de la represa Velasco Ibarra mediante modelación hidráulica en HEC-RAS 2D, considerando caudales máximos para diferentes periodos de retorno, sedimentación acumulada y escenarios climáticos, con el fin de verificar el cumplimiento de las condiciones de seguridad estructural y funcional.

1.5. ALCANCE

El presente estudio tiene un **alcance explicativo y técnico-diagnóstico**, orientado a evaluar las características hidrológicas, estructurales y operativas de la represa Velasco Ibarra, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena (Ecuador). La investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, basado en herramientas de análisis geoespacial y modelación hidrodinámica. En cuanto a su **alcance espacial**, el estudio abarca la cuenca aportante directa a la represa Velasco Ibarra, incluyendo su espejo de agua, las estructuras de control (aliviadero, canales, obras de captación) y las zonas aguas abajo que pudieran verse afectadas por remansos o desbordamientos.

La información generada busca servir como insumo técnico para la planificación hídrica local y regional, y para el diseño de estrategias de adaptación frente al cambio climático, priorizando la sostenibilidad del abastecimiento de agua para riego, consumo humano y conservación ambiental.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables independientes.

- Condiciones hidrogeológicas de la cuenca
- Condiciones estructurales de la cuenca
- Condiciones operativas del sistema
- Características morfométricas de la cuenca

1.6.2. Variables dependientes.

- Capacidad actual de abastecimiento hídrico
- Seguridad hidráulica del aliviadero
- Superficie agrícola abastecida.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. HIDRAULICA

La hidráulica es una rama de la física aplicada y de la ingeniería civil que estudia las propiedades y el comportamiento de los fluidos, especialmente el agua, tanto en reposo como en movimiento (T. Liu et al., 2025). Su importancia radica en que permite comprender los principios que gobiernan el flujo y la presión de los fluidos, facilitando el diseño y operación de sistemas hidráulicos y de infraestructura esencial, como represas, canales, tuberías y redes de distribución. El estudio de la hidráulica integra los fundamentos teóricos y las herramientas matemáticas que permiten predecir y controlar los fenómenos relacionados con el movimiento del agua, asegurando la eficiencia y seguridad de los proyectos hidráulicos (Lis et al., 2025).

La hidráulica se puede dividir en dos grandes áreas: la **hidrostática**, que se encarga del estudio de los fluidos en reposo, y la **hidrodinámica**, que aborda los fluidos en movimiento. Cada área posee conceptos y ecuaciones fundamentales que permiten describir y cuantificar el comportamiento del agua en distintos escenarios (Cao et al., 2025). El conocimiento detallado de los principios hidráulicos y de las ecuaciones fundamentales permite un análisis riguroso y técnico de los procesos hídricos asociados a la represa Velasco Ibarra. Estos principios son la base para garantizar que las intervenciones hidráulicas sean sostenibles y seguras, y proporcionen beneficios a largo plazo para la gestión de los recursos hídricos.

2.1.1. Presión en los fluidos:

La presión es una magnitud fundamental en hidráulica que describe la fuerza ejercida por el fluido sobre una superficie. La comprensión de la presión es esencial en el diseño de estructuras hidráulicas y en el análisis de estabilidad de presas y canales. Se define como la fuerza por unidad de área:

Ecuación 1. Presión

$$P = \frac{F}{A}$$

donde:

- P es la presión [Pa o N/m²]
- F es la fuerza ejercida [N]
- A es el área sobre la cual actúa la fuerza [m²]

2.1.2. Ecuación de la continuidad

La ecuación de la continuidad expresa el principio de conservación de la masa en un fluido incompresible. Esta ecuación permite relacionar la velocidad del fluido con las dimensiones de la sección de paso, siendo clave en el análisis de redes de abastecimiento y en el cálculo de pérdidas de carga en tuberías. Establece que el caudal volumétrico se mantiene constante a lo largo de una tubería o canal, es decir:

Ecuación 2.

Principio de continuidad.

$$Q = A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

donde:

- Q es el caudal volumétrico [m³/s]
- A es el área de la sección transversal del conducto [m²]
- V es la velocidad media del fluido en esa sección [m/s]

2.1.3. Teorema de Bernoulli.

El teorema de Bernoulli es uno de los principios más importantes de la hidráulica y establece la conservación de la energía en un fluido en movimiento. La ecuación de Bernoulli permite analizar el intercambio entre energía de presión, cinética y potencial, lo que resulta esencial para calcular alturas piezométricas, presiones y velocidades en sistemas hidráulicos. Para un fluido ideal, incompresible y en régimen estacionario, la energía total en cualquier punto de una corriente de fluido permanece constante y se expresa como:

Ecuación 3.

Ecuación de Bernoulli.

$$\frac{\rho}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constante}$$

donde:

- P es la presión del fluido [Pa]
- ρ es la densidad del fluido [kg/m³]
- g es la aceleración de la gravedad [9.81 m/s²]
- V es la velocidad del fluido [m/s]
- z es la altura geométrica o piezométrica [m]

2.1.4. Pérdida de carga y ecuación de Darcy-Weisbach

En la práctica, los fluidos reales presentan resistencia al flujo debido a la fricción con las paredes del conducto y a las pérdidas localizadas (codos, válvulas, contracciones, expansiones). Estas pérdidas se conocen como **pérdidas de carga** y afectan directamente la energía disponible en el sistema. La ecuación de Darcy-Weisbach permite cuantificar la pérdida de carga por fricción a lo largo de un conducto recto:

Ecuación 4.

Ecuación Darcy Weisbach

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

donde:

- h_f es la pérdida de carga [m]
- f es el factor de fricción (adimensional)
- L es la longitud del conducto [m]
- D es el diámetro hidráulico [m]
- v es la velocidad media del fluido [m/s]

El factor de fricción f depende del régimen de flujo (laminar o turbulento) y de la rugosidad relativa de las paredes del conducto. Para flujos laminares ($Re < 2000$) se puede usar la expresión de Hagen-Poiseuille:

Ecuación 5.

Expresión Hagen Poiseuille.

$$f = \frac{64}{Re}$$

mientras que para flujos turbulentos ($Re < 4000$) se utilizan diagramas como el de Moody o correlaciones empíricas (Colebrook-White).

2.1.5. Ecuación de energía para sistemas reales:

Para sistemas reales donde existen pérdidas de carga, la ecuación de Bernoulli se adapta considerando las pérdidas, esta forma extendida de la ecuación es fundamental para diseñar redes de tuberías, estaciones de bombeo y cualquier sistema que transporte agua o fluidos.

Ecuación 6.

Ecuación fundamental para diseño de redes.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_1 + h_f + h_l$$

donde:

- h_f son las pérdidas por fricción
- h_l son las pérdidas localizadas

2.1.6. Velocidad y caudal.

La velocidad del fluido es una variable crítica en la hidráulica y se calcula en función del caudal y el área transversal, este cálculo es esencial para dimensionar conductos y seleccionar equipos de bombeo o de control de flujo.

Ecuación 7.

Ecuación de caudal.

$$v = \frac{Q}{A}$$

Donde:

- Q es el caudal volumétrico [m^3/s]
- A es el área de la sección transversal del conducto [m^2]
- V es la velocidad media del fluido en esa sección [m/s]

2.1.7. Aplicaciones prácticas en la infraestructura hidráulica

La hidráulica tiene un papel decisivo en la evaluación y diseño de obras como represas, donde la determinación de caudales, velocidades, presiones y pérdidas de carga permite asegurar la eficiencia de la captación, almacenamiento y distribución del agua. Además, posibilita el análisis de los fenómenos de remanso, cavitación, y de los posibles efectos de sedimentación y erosión que pueden comprometer la estabilidad y vida útil de la infraestructura.

2.2. HIDROLOGÍA

La hidrología es la ciencia que estudia el agua en la Tierra, incluyendo su distribución, movimiento y propiedades. Su objetivo principal es comprender el ciclo hidrológico y cuantificar los procesos que intervienen en el transporte y almacenamiento del agua en el sistema terrestre (Chow et al., 1988). El análisis hidrológico es esencial para la planificación, gestión y conservación de los recursos hídricos, ya que permite predecir caudales, evaluar riesgos asociados a fenómenos extremos y dimensionar infraestructuras hidráulicas.

2.2.1. El ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico describe el movimiento continuo del agua entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. Incluye procesos como la precipitación, la escorrentía, la infiltración, la evaporación y la transpiración. La precipitación representa la entrada principal de agua en la cuenca hidrográfica, mientras que la escorrentía superficial y subterránea permite el retorno del agua a los ríos, lagos y océanos.

2.2.2. Infiltración y escorrentía

La infiltración es el proceso mediante el cual el agua se incorpora al suelo, recargando los acuíferos y disminuyendo la escorrentía superficial. Su magnitud depende de factores como la permeabilidad del suelo, la cobertura vegetal y la intensidad de la precipitación (Dingman, 2015). Por su parte, la escorrentía es el flujo de agua que circula sobre la superficie terrestre y constituye la principal fuente de abastecimiento de ríos y embalses. Se clasifica en escorrentía superficial, subsuperficial y subterránea.

2.2.3. Balance hídrico

El balance hídrico es una herramienta fundamental en hidrología que permite cuantificar la disponibilidad de agua en una cuenca, relacionando las entradas y salidas de agua. Este balance ayuda a identificar excedentes o déficits hídricos y a evaluar la sostenibilidad del recurso hídrico en la cuenca. Se expresa generalmente como:

Ecuación 8.

Ecuación de balance hídrico.

$$P = ET + Q + \Delta S$$

donde:

- P es la precipitación [mm]
- ET es la evapotranspiración [mm]
- Q es la escorrentía [mm]
- ΔS es el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo y acuíferos [mm]

2.3.MODELOS HIDROLÓGICOS

Los modelos hidrológicos son herramientas matemáticas que simulan el comportamiento del ciclo hidrológico en una cuenca. Se dividen en modelos conceptuales, empíricos y físicos, y permiten estimar caudales, predecir crecidas y evaluar el impacto de cambios en el uso del suelo o el clima. Su aplicación en la evaluación de la represa Velasco Ibarra es esencial para entender cómo se distribuye y varía el recurso hídrico a lo largo del tiempo.

2.4. Importancia en la gestión de represas

La hidrología aporta los datos necesarios para dimensionar la capacidad de almacenamiento y la operación de la represa, evaluando las variaciones estacionales e interanuales de los caudales. Asimismo, permite determinar los caudales ambientales mínimos para preservar los ecosistemas aguas abajo y garantizar el equilibrio ecológico.

2.5. Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH)

La gestión integrada de recursos hídricos (GIRH) es un enfoque que busca optimizar el uso del agua considerando simultáneamente las dimensiones social, económica y ambiental. La GIRH reconoce que los recursos hídricos están interconectados y que su manejo debe ser coordinado para satisfacer las necesidades presentes sin comprometer las futuras (GWP, 2000). Estos principios promueven la participación activa de las comunidades, la equidad y la sostenibilidad en la toma de decisiones sobre el recurso hídrico. La GIRH se basa en cuatro principios fundamentales clave:

- El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para la vida.
- El desarrollo y manejo del agua deben basarse en la participación de los usuarios y actores involucrados.
- Las mujeres desempeñan un papel fundamental en la gestión y provisión de agua.
- El agua debe ser gestionada considerando la cuenca hidrográfica como la unidad básica.

2.5.1. Instrumentos de la GIRH

La implementación de la GIRH implica el uso de herramientas como planes de ordenamiento hídrico, modelos de simulación, sistemas de información geográfica (SIG) y monitoreo continuo de caudales y calidad del agua. Estas herramientas permiten integrar la información hidrológica y socioeconómica para planificar y gestionar el recurso de manera efectiva.

2.5.2. Relevancia para la represa Velasco Ibarra

La GIRH en el contexto de la represa Velasco Ibarra es esencial para garantizar que el almacenamiento y distribución del agua sean sostenibles y equitativos, minimizando impactos negativos sobre los ecosistemas y las comunidades. Su aplicación permite conciliar los distintos usos del agua (abastecimiento humano, riego, recreación, protección ambiental) y definir estrategias de manejo adaptadas a las condiciones locales.

2.5.3. Impacto ambiental de las represas

Las represas, si bien ofrecen importantes beneficios económicos y sociales, también pueden generar impactos ambientales significativos en los ecosistemas acuáticos y terrestres. Estos impactos deben ser considerados y mitigados para asegurar la sostenibilidad de la infraestructura.

2.5.4. Alteración de los ecosistemas acuáticos

Las represas modifican el régimen hidrológico natural de los ríos, alterando caudales, temperaturas y sedimentación. Esto puede afectar la fauna y flora acuática, interrumpir las migraciones de peces y alterar los hábitats naturales (Batalla et al., 2004).

2.5.5. Sedimentación

Uno de los principales problemas asociados a las represas es la acumulación de sedimentos en el embalse, lo que reduce la capacidad de almacenamiento y afecta la calidad del agua. El manejo de sedimentos es un desafío clave para prolongar la vida útil de la represa y mantener su funcionalidad.

2.5.6. Calidad del agua y eutrofización

La estratificación térmica y la acumulación de nutrientes en el embalse pueden provocar procesos de eutrofización, generando proliferación de algas y disminución del oxígeno disuelto. Esto impacta negativamente en la calidad del agua y en los usos del recurso. La evaluación de estos impactos y la implementación de medidas de mitigación son esenciales para garantizar la sostenibilidad ambiental de la represa Velasco Ibarra.

2.6. MEDIDAS DE MITIGACIÓN

Para minimizar los impactos ambientales, se aplican estrategias como:

- Caudales ecológicos mínimos para conservar los ecosistemas aguas abajo.
- Monitoreo de calidad de agua y programas de gestión de sedimentos.
- Diseño de estructuras de paso para peces y otras especies acuáticas.
- Programas de educación y participación comunitaria.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

En una investigación científica, el tipo y nivel de investigación determinan el enfoque metodológico con el que se abordará el objeto de estudio (Ñaupas Paitán, 2014). El tipo de investigación se refiere al propósito general del estudio: exploratorio, descriptivo, explicativo; mientras que el nivel indica el grado de profundidad con el que se analiza la información, permitiendo comprender, interpretar, predecir o transformar una situación (Cauas, 2013).

3.1.1. Tipo de Investigación.

La presente investigación es de tipo aplicada, ya que busca resolver un problema técnico específico: la necesidad de evaluar la capacidad actual y futura de la represa Velasco Ibarra en términos de almacenamiento, regulación hídrica y calidad del agua, frente a condiciones de cambio climático (Nieto, 2018). Se aplica conocimiento científico a un caso real y localizado con el fin de generar información útil para la toma de decisiones en planificación hídrica local.

3.1.2. Nivel de Investigación.

El nivel de esta investigación es explicativo, pues no solo describe los fenómenos observados (Tena-Parera, 2023), sino que analiza las relaciones causales entre variables hidrológicas, climáticas y operativas para explicar cómo estos factores afectan la disponibilidad hídrica y el desempeño de la represa. Adicionalmente, integra análisis cuantitativos mediante modelación, lo que permite proyectar escenarios futuros.

3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Toda investigación debe apoyarse en un método sistemático, un enfoque epistemológico y un diseño estructurado que le otorgue rigor (Ramos-Galarza, 2021). El método establece el procedimiento general, el enfoque define la naturaleza de los datos (cuantitativa, cualitativa o mixta), y el diseño es la planificación operativa del estudio (experimental, no experimental, transversal, longitudinal, etc.).

3.2.1. Método.

Se emplea el método científico técnico, que permite abordar el problema a partir de la observación, levantamiento de información, procesamiento de datos mediante modelos matemáticos e interpretación de resultados (Manterola et al., 2007). Este método es adecuado porque la investigación busca obtener datos medibles y verificables sobre el comportamiento hidráulico de una infraestructura crítica y su entorno (Rodríguez Jiménez & Pérez Jacinto, 2017).

3.2.2. Enfoque.

El estudio adopta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la recolección y análisis de datos numéricos: caudales, precipitación, conductividad, niveles de embalse, curvas IDF, entre otros (Tejero González, 2021). Este enfoque es pertinente porque se requiere obtener mediciones objetivas para simular y validar el comportamiento de la represa bajo escenarios climáticos.

3.2.3. Diseño.

El diseño es no experimental porque no se manipulan variables, sino que se observan y analizan en su estado natural, transversal ya que los datos se recogen en un período definido de tiempo y de campo debido a que la información principal se obtiene directamente del entorno físico de la represa mediante levantamientos topográficos, sensores GNSS y drones.

3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

En el contexto técnico, la población no se refiere únicamente a personas, sino al conjunto de elementos o unidades de análisis a los que se aplicará la investigación (Sanchez Carlessi & Reyes Meza, 2015). La muestra es una parte representativa de esta población, y el muestreo es el procedimiento que permite su selección.

3.3.1. Población.

La población está conformada por todos los elementos físicos e hídricos del sistema hidráulico de la represa Velasco Ibarra, incluyendo el embalse, el aliviadero, el cauce aguas abajo, y la cuenca de aporte (Arias-Gómez et al., 2016). También incluye variables climáticas e hidrológicas históricas del cantón La Libertad.

3.3.2. Muestra.

La muestra es representativa ya que cubre las zonas clave de operación y vulnerabilidad del sistema hidráulico evaluado. Las muestras para estudiar: los puntos de control topográfico (fotogrametría y GNSS), los datos pluviométricos del periodo 1990–2023, las curvas IDF actualizadas, los puntos críticos del embalse con evidencia de sedimentación o intrusión salina.

3.3.3. Muestreo.

Se utiliza un muestreo no probabilístico de tipo intencional, ya que se seleccionan zonas específicas de la represa y su cuenca con base en criterios técnicos como: accesibilidad, visibilidad en imágenes satelitales, concentración de sedimentos y registros históricos de caudales o salinidad (Casal & Mateu, 2003). Este tipo de muestreo es adecuado para estudios de campo que requieren precisión en puntos críticos del sistema.

3.4. UBICACIÓN DEL SECTOR DE ESTUDIO.

La presente investigación se desarrolla en la represa Velasco Ibarra, ubicada en el cantón La Libertad, en la provincia de Santa Elena, región litoral del Ecuador. Este cuerpo de agua constituye una de las principales infraestructuras hidráulicas de almacenamiento superficial en la zona costera del suroeste ecuatoriano. Su embalse forma parte del sistema hídrico que abastece zonas agrícolas, poblaciones urbanas y ecosistemas locales.

Para delimitar el área de estudio y caracterizar su entorno geográfico, se han empleado técnicas de análisis geoespacial, utilizando imágenes satelitales de alta resolución, fotointerpretación digital, y la generación de ortomosaicos mediante fotogrametría aérea con drones, complementado con datos georreferenciados obtenidos mediante GNSS de precisión centimétrica. Esta información ha permitido identificar con exactitud la

superficie del embalse, los sectores agrícolas circundantes, las zonas boscosas y el drenaje natural del sistema.

La **Figura 1** muestra una imagen satelital procesada del embalse Velasco Ibarra, donde se identifican las principales masas de agua y su entorno inmediato, incluyendo las comunidades aledañas. En el recuadro superior derecho se presenta la ubicación regional de la represa dentro del perfil peninsular de Santa Elena, con énfasis en su proximidad a la zona urbana de La Libertad.

Figura 1.

Imagen Satelital del embalse Velasco Ibarra



3.5. TECNICAS DE LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

En la presente investigación se utilizaron técnicas topográficas y geoespaciales enfocadas en obtener datos de alta precisión para el análisis hidrológico-operativo de la represa Velasco Ibarra, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena. Dada la extensión de la masa de agua y la complejidad logística de un levantamiento total del embalse, se decidió enfocar el levantamiento **únicamente en el área del aliviadero**, mientras que el resto del análisis espacial se apoyó en imágenes satelitales de alta resolución.

El aliviadero es una estructura crítica para la seguridad y operación de la represa. Para su levantamiento se utilizó un sistema combinado de GNSS de doble frecuencia (RTK) y un dron multirrotor equipado con cámara fotogramétrica de 20 MP. Cumpliendo con los estándares establecidos en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), esta metodología permitió obtener una nube de puntos georreferenciada con precisión centimétrica (Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes, 2002; Norma Ecuatoriana Vial, 2013).

La selección de este método se definió basado en experiencias exitosas de estudios internacionales como el realizado por Bandini et al. (2018) que han demostrado la eficacia del uso de drones para la obtención de datos topográficos en cuerpos de agua interiores, resaltando su utilidad en la generación de mapas batimétricos de alta calidad, el proceso incluyó la planificación de vuelos, captura de imágenes aéreas y procesamiento fotogramétrico para generar modelos digitales de elevación y ortomosaicos del área del aliviadero.

3.6.DESCRIPCIÓN METODOLÓGICA

La presente investigación tiene como finalidad evaluar las características hidrológicas, estructurales y operativas de la represa Velasco Ibarra, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena, con el propósito de estimar su capacidad actual de abastecimiento hídrico bajo escenarios de cambio climático (RCP 4.5 y 8.5). El estudio adopta un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y nivel explicativo, utilizando herramientas de análisis espacial, modelación hidrodinámica y procesamiento geodésico cuya metodología se estructura en tres ejes principales:

Caracterización morfométrica de la cuenca aportante: Se delimita la cuenca hidrográfica mediante el uso de imágenes satelitales (Sentinel-2 y Google Earth Pro) y modelos digitales de elevación. Se emplea SIG (QGIS) para calcular parámetros como área, pendiente media, orden de corriente e índice de compacidad, lo cual permite identificar zonas de recarga, erosión y dinámica de escorrentía.

Estimación de caudales máximos y análisis hidrológico: Se aplica el método Racional Modificado para la estimación de caudales de diseño para periodos de retorno

de 50 y 100 años. Se integran datos históricos de precipitación (1990–2023), curvas IDF actualizadas y coeficientes de escorrentía ajustados según uso de suelo. Esta información se proyecta a condiciones futuras bajo los escenarios climáticos RCP 4.5 y 8.5.

Evaluación hidráulica del aliviadero mediante HEC-RAS 2D: Se realiza un levantamiento topográfico del aliviadero utilizando GNSS de doble frecuencia (RTK) en combinación con dron multirrotor con cámara fotogramétrica de 20 MP. Los datos obtenidos son procesados fotogramétricamente para generar ortomosaicos y modelos digitales de superficie. Esta base se integra en HEC-RAS 2D para simular el comportamiento hidráulico del aliviadero frente a los caudales estimados, considerando además la acumulación de sedimentos y los efectos de remanso por obstrucciones aguas abajo.

La evaluación integral de la represa Velasco Ibarra cobra especial relevancia debido a la creciente presión sobre los recursos hídricos en la región costera del Ecuador, donde fenómenos como la variabilidad climática, el incremento de la demanda poblacional y el deterioro de la infraestructura hídrica impactan directamente en la disponibilidad y calidad del agua. En este contexto, la represa representa una infraestructura estratégica para el almacenamiento y regulación del recurso hídrico, por lo que resulta indispensable conocer su estado actual, su funcionalidad operativa y su capacidad real de respuesta ante eventos extremos.

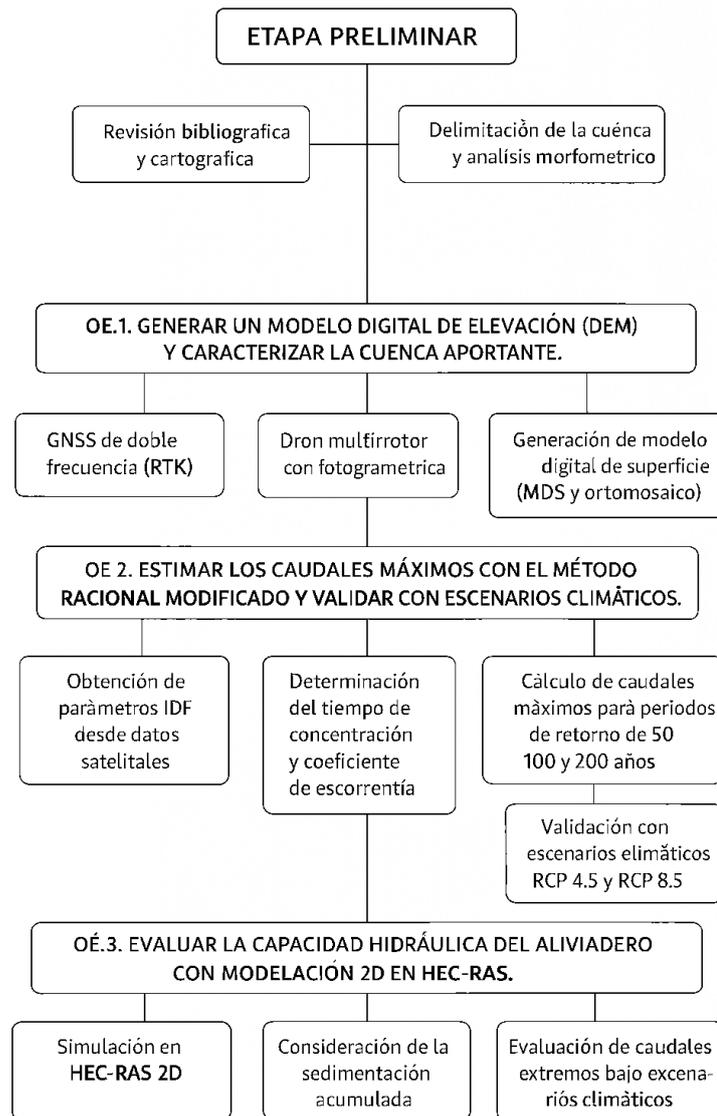
El enfoque metodológico adoptado en esta investigación no solo permite realizar un diagnóstico técnico detallado, sino que también contribuye a fortalecer la toma de decisiones en materia de gestión hídrica sostenible. Al integrar herramientas geoespaciales, modelación matemática y simulación hidráulica, se logra una visión holística del sistema, permitiendo identificar puntos críticos y establecer medidas preventivas o correctivas. Además, el uso de escenarios climáticos RCP aporta una dimensión prospectiva que facilita la adaptación de la infraestructura a condiciones futuras, lo cual es especialmente relevante en zonas con alta exposición a fenómenos como El Niño–Oscilación del Sur (ENOS).

Este tipo de estudios representa un aporte significativo para los gobiernos locales, autoridades del agua y entes responsables de la planificación territorial, ya que

proporciona información técnica confiable que puede ser empleada en la formulación de planes de inversión, mantenimiento y rehabilitación de sistemas de almacenamiento.

Figura 2.

Diagrama de diseño de investigación



3.7 METODOLOGÍA DEL OE1.: GENERAR UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) Y CALCULAR PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA APORTANTE A LA REPRESA VELASCO IBARRA.

El desarrollo de este objetivo específico se fundamentó en la obtención de un modelo digital de elevación (DEM) preciso, así como en el cálculo de parámetros morfométricos clave que permitieron caracterizar la cuenca hidrográfica que abastece a la represa Velasco Ibarra, ubicada en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena. Este proceso resultó esencial para identificar zonas críticas de recarga, áreas susceptibles a erosión y comprender la dinámica de escorrentía, aspectos fundamentales para el diagnóstico y la gestión integral del recurso hídrico.

La metodología adoptada fue de carácter cuantitativo y descriptivo-explicativo, basada en la utilización de herramientas geoespaciales y normativas técnicas reconocidas. A continuación, se detallan las etapas y procedimientos desarrollados:

3.7.1. Recolección y procesamiento inicial de datos geoespaciales

Se emplearon imágenes satelitales del programa Sentinel-2 y datos altimétricos procedentes de modelos digitales de elevación de la misión SRTM y del ASTER GDEM, ambos con resolución espacial de 30 metros. Los datos fueron obtenidos a través de los portales oficiales USGS EarthExplorer y Copernicus Open Access Hub para las imágenes ópticas.

A fin de asegurar la calidad y confiabilidad de la base altimétrica, se realizó una validación geométrica preliminar y, de ser necesario, se efectuó la corrección de depresiones artificiales (sinks) mediante la herramienta r.fill.dir en el entorno de QGIS. Este paso se llevó a cabo conforme a las recomendaciones del Manual de Cuencas Hidrográficas elaborado por la FAO (2011), el cual destaca la importancia de contar con datos continuos y sin interrupciones para garantizar la correcta simulación del flujo superficial.

3.7.2. Procesamiento en Sistemas de Información Geográfica (SIG)

El procesamiento y análisis espacial se desarrollaron utilizando el software QGIS 3.34, complementado con el módulo de herramientas hidrológicas de GRASS GIS. Se llevaron a cabo las siguientes actividades:

- Se calculó la dirección de flujo y la acumulación de flujo mediante el algoritmo `r.watershed`.
- Se determinó y validó el punto de salida o “outlet”, correspondiente al aliviadero de la represa Velasco Ibarra, identificado como el punto de menor cota altimétrica en el embalse. Esta selección se fundamentó en la interpretación del mapa de acumulación y en la verificación visual con imágenes satelitales, en concordancia con los lineamientos metodológicos propuestos por Leopold et al. (1964) en estudios de morfometría fluvial.
- Finalmente, se delimitó la cuenca hidrográfica mediante la herramienta `r.water.outlet`, utilizando como insumo el raster de direcciones de flujo y las coordenadas previamente definidas del punto de salida.

3.7.3. Cálculo de parámetros morfométricos

Una vez delimitada la cuenca hidrográfica, se procedió al cálculo de los parámetros morfométricos que permitieron comprender la geometría y comportamiento hidrológico del área de estudio, específicamente:

- **Área de la cuenca (A):** Se obtuvo la superficie total de la cuenca en km², calculada a partir del polígono vectorial resultante.
- **Pendiente media (S):** Se determinó a partir del DEM utilizando la herramienta de análisis de pendientes en QGIS, expresada en grados o porcentaje.
- **Orden de corriente:** Se asignó mediante el método de Strahler, que clasifica la red de drenaje de acuerdo con jerarquías de flujo.
- **Índice de compacidad (Kc):** Se calculó según la relación entre perímetro y área de la cuenca, empleando la fórmula:

Ecuación 1.

Índice de compacidad

$$K_C = \frac{0.28 \times P}{\sqrt{A}}$$

Donde

P: es el perímetro de la cuenca (en km)

A: el área (en km²).

Estos cálculos se fundamentan en metodologías recomendadas por la FAO (2011) y por la literatura técnica de análisis morfométrico de cuencas

3.7.4. Validación y representación cartográfica

Los resultados obtenidos se validaron mediante comparación visual con las imágenes de Sentinel-2 y datos secundarios disponibles para la zona de estudio. Asimismo, se generaron productos cartográficos en QGIS, tales como mapas de delimitación de la cuenca, gradientes de pendiente, red de drenaje e índices morfométricos, que servirán como insumo fundamental para los análisis hidrológicos y de modelación hidráulica posteriores.

3.8.METODOLOGÍA DEL OE.2: ESTIMAR LOS CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 50 100 AÑOS MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL MODIFICADO Y BALIZAR SU COMPORTAMIENTO ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS RCP 4.5 Y 8.5

Se recopiló información histórica de precipitación diaria y subdiaria desde 1990 hasta 2023 de estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, provistas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Estas series se utilizaron para construir las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) necesarias para la estimación de la intensidad de lluvias extremas.

El procesamiento estadístico de los datos se realizó siguiendo criterios del Manual de Hidrología de la Dirección de Riego y Drenaje (MIDAG, 2014) y con soporte del software Excel y Python para regresión y ajuste de curvas.

3.8.1. Recolección de información climática e hidrometeorológica

Se recopilaron datos de precipitación diaria y mensual correspondientes al periodo 1990–2023, obtenidos de las estaciones meteorológicas disponibles en la zona de estudio, con respaldo del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). Para la proyección de los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, se consideraron las proyecciones oficiales generadas por el IPCC (2021) y ajustadas para la región costera del Ecuador.

3.8.2. Determinación de las curvas de Intensidad – Duración – Frecuencia (IDF)

Para estimar de forma precisa las intensidades máximas de precipitación en la cuenca hidrográfica de la represa Velasco Ibarra, se construyeron curvas IDF (Intensidad – Duración – Frecuencia) con base en una serie histórica de máximos anuales obtenidos del satélite NASA POWER (1996–2024), validada frente a los parámetros regionales de la plataforma POWER by ESRI y contrastada con normativa hidrológica nacional (MIDAG, 2014).

Este procedimiento permitió ajustar una ecuación empírica del tipo de Bernard, la cual relaciona la intensidad de precipitación con la duración crítica de la tormenta (T_c) y el periodo de retorno, obteniendo así parámetros localmente calibrados. Esta metodología es esencial para garantizar que el modelo hidrológico responda a las condiciones reales de la cuenca, tal como lo demanda el objetivo específico 2.

Los periodos de retorno considerados fueron 50, 100 y 200 años, definidos con base en criterios de diseño para infraestructuras críticas según la normativa ASCE 7-22. Las intensidades resultantes constituyen insumos técnicos fundamentales para la

aplicación del método racional modificado y la posterior simulación hidráulica del aliviadero (OE.3).

Adicionalmente, se incorporaron escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5, aplicando incrementos del 20 % y 30 % respectivamente sobre las intensidades base, conforme a las proyecciones regionalizadas del IPCC (2021). Esta validación ante condiciones futuras permite establecer una base sólida para la gestión adaptativa del recurso hídrico, cumpliendo con la directriz de analizar la sensibilidad climática del sistema hídrico.

3.8.3. Estimación de caudales máximos con el método Racional Modificado

Se aplicó el método Racional Modificado para calcular los caudales máximos de escorrentía, empleando la ecuación:

Ecuación 2.

Método racional modificado

$$Q = C * I * A$$

Donde:

- Q: es el caudal máximo (m³/s),
- C: es el coeficiente de escorrentía ajustado,
- I: es la intensidad de lluvia (mm/h),
- A: es el área de la cuenca (ha).

Los coeficientes de escorrentía fueron determinados en función de las coberturas de suelo predominantes, utilizando las imágenes satelitales de Sentinel-2 y la clasificación supervisada en QGIS. Este análisis permitió diferenciar áreas agrícolas, forestales y urbanas, lo cual resultó esencial para ajustar el valor de *C*

El área de la cuenca y otros parámetros morfométricos empleados en la fórmula se basaron en los resultados del primer objetivo específico. Todo el procesamiento y los cálculos se realizaron en hojas de cálculo estructuradas y en el entorno de QGIS para la validación espacial.

3.8.4. Validación ante escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5

La confiabilidad de los caudales estimados fue validada mediante la comparación de los resultados obtenidos con los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5. Se incorporaron proyecciones de incremento de la intensidad y frecuencia de lluvias, conforme a los datos oficiales del IPCC (2021), para ajustar las curvas IDF y recalcular los caudales máximos.

Este análisis permitió determinar la sensibilidad de la represa Velasco Ibarra a la variabilidad climática proyectada, aspecto fundamental para la planificación adaptativa y la gestión de riesgos hídricos en la región.

3.8.5. Representación cartográfica y análisis comparativo

Finalmente, se elaboraron mapas temáticos en QGIS que representaron las zonas críticas de mayor generación de escorrentía dentro de la cuenca, así como los valores de caudales máximos proyectados bajo cada escenario climático. Estos productos cartográficos y los resultados obtenidos constituyen la base para los análisis hidráulicos y de seguridad estructural desarrollados en el siguiente objetivo específico.

3.9. METODOLOGÍA DEL OE3.: SIMULAR LA CAPACIDAD DE EVACUACIÓN Y LAMINACIÓN DEL ALIVIADERO DE LA REPRESA VELASCO IBARRA MEDIANTE MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS 2D, CONSIDERANDO CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO, SEDIMENTACIÓN ACUMULADA Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS, CON EL FIN DE VERIFICAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL

El desarrollo de este objetivo se centró en la simulación hidrodinámica bidimensional del comportamiento del aliviadero de la represa Velasco Ibarra, con el propósito de evaluar su capacidad de evacuación ante caudales máximos asociados a periodos de retorno de 50, 100 y 200 años. Esta simulación consideró también el efecto de la sedimentación acumulada en el embalse, así como la influencia de escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 en la intensidad de las precipitaciones.

El enfoque metodológico fue cuantitativo, aplicado y explicativo, basado en la integración de insumos morfométricos obtenidos mediante SIG, parámetros hidráulicos derivados de estudios previos y simulación numérica con el software HEC-RAS 2D.

3.9.1. Preparación y procesamiento de datos topográficos

Para la generación de la geometría del modelo, se realizó el levantamiento topográfico del área del aliviadero y su entorno inmediato mediante fotogrametría aérea utilizando un dron multirrotor (DJI Air 2S), con vuelos programados a 50 m de altura y traslape frontal/lateral del 80%. Las imágenes capturadas fueron procesadas en Agisoft Metashape para generar un Modelo Digital de Superficie (MDS) de alta resolución (≤ 10 cm/píxel). Esta información permitió construir una malla hidráulica detallada que representa con precisión la geometría del canal de desagüe y la topografía aguas abajo.

El procesamiento fotogramétrico se realizó mediante software especializado, generando ortomosaicos y modelos digitales de superficie (MDS) que sirvieron como base para la modelación hidráulica posterior.

3.9.2. Configuración del modelo hidráulico bidimensional

Se desarrolló un modelo hidráulico bidimensional en el software HEC-RAS 2D, herramienta reconocida internacionalmente para la simulación de flujos en cuerpos de agua y estructuras hidráulicas. La modelación consideró:

- La geometría detallada del aliviadero y del cauce aguas abajo, a partir de los datos del MDS.
- Las condiciones de contorno y caudales máximos obtenidos del Objetivo Específico 2, para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años.
- El nivel de sedimentación acumulada en el embalse, estimado en ≥ 1.2 millones de m^3 , incorporado como reducción del volumen útil del embalse y modificación del perfil hidráulico de entrada al aliviadero.
- La consideración de remansos y obstrucciones aguas abajo, para simular el efecto de retroceso en la lámina de agua.

El modelo se calibró y ajustó con base en parámetros hidráulicos representativos, como rugosidades de canal (coeficiente de Manning) y perfiles de flujo.

3.9.3. Verificación normativa y análisis de resultados

Una vez ejecutadas las simulaciones hidráulicas, se procedió a analizar los resultados obtenidos, especialmente en términos de:

- Capacidad de descarga del aliviadero (m^3/s).
- Altura de lámina de agua en condiciones de caudal máximo.
- Áreas de desbordamiento o potenciales zonas de inundación aguas abajo.
- Cumplimiento de los factores de seguridad establecidos en la norma ASCE/SEI 42-21 para estructuras de control de inundaciones.

Se generaron mapas de resultados en el entorno de QGIS, visualizando las zonas críticas y las líneas de flujo principales. Esta información permitió fundamentar las conclusiones sobre la capacidad hidráulica del aliviadero y la seguridad hídrica de la represa.

Los resultados obtenidos fueron procesados y representados mediante mapas temáticos en QGIS, facilitando la visualización de las líneas de flujo principales, las zonas de concentración de energía hidráulica y los sectores donde se generan mayores presiones o acumulaciones de agua. Esta representación espacial resultó fundamental para la interpretación integral del desempeño del aliviadero, permitiendo fundamentar de manera técnica las conclusiones relativas a su funcionamiento, así como emitir recomendaciones para su mantenimiento o rediseño.

Además, los escenarios de simulación bajo condiciones actuales y proyectadas de cambio climático permitieron establecer un rango de operación esperada del aliviadero en las próximas décadas, aportando elementos claves para el diseño de estrategias de adaptación y resiliencia frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

3.9.4. Consideración del segundo aliviadero

Durante el levantamiento de información de campo se identificó la existencia de un segundo aliviadero complementario ubicado aguas abajo de la represa Velasco Ibarra. No obstante, esta estructura no fue considerada en la modelación hidráulica ni en el análisis de caudales asociados a periodos de retorno debido a que, según observaciones directas y reportes técnicos preliminares, se encuentra en estado de abandono y con proyecciones de clausura definitiva por parte de los entes responsables de la infraestructura hidráulica.

Por esta razón, la simulación hidrodinámica desarrollada en HEC-RAS 2D se centró exclusivamente en el aliviadero principal, operativo y funcional, cuya capacidad estructural sí representa un componente clave en la seguridad hidráulica de la represa. Esta decisión metodológica fue respaldada con registros fotográficos de campo, los cuales evidencian el estado actual del segundo aliviadero y su configuración hidráulica pasiva

Ilustración 1.

Vista lateral del cauce de descarga asociado al segundo aliviadero de la represa Velasco Ibarra.



CAPITULO IV: RESULTADOS

Los resultados de esta tesis corresponden a las conclusiones y hallazgos específicos obtenidos a partir de la aplicación de las metodologías y herramientas geoespaciales e hidrodinámicas empleadas en la caracterización y evaluación de la represa Velasco Ibarra y su cuenca hidrográfica. Estos resultados constituyen el producto del análisis y procesamiento de datos levantados en campo, así como de información satelital y bases de datos hidrometeorológicos procesados en entornos especializados, como QGIS y HEC-RAS 2D.

4.1. RESULTADOS DEL O.E.1.: GENERAR UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (DEM) Y CALCULAR PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LA CUENCA APORTANTE A LA REPRESA VELASCO IBARRA

4.1.1. Parámetros base para la caracterización morfométrica

La caracterización de la cuenca hidrográfica de la represa Velasco Ibarra se fundamentó en parámetros morfométricos clave que permiten comprender la dinámica de escorrentía y la distribución de los flujos superficiales. Algunos de estos parámetros incluyen:

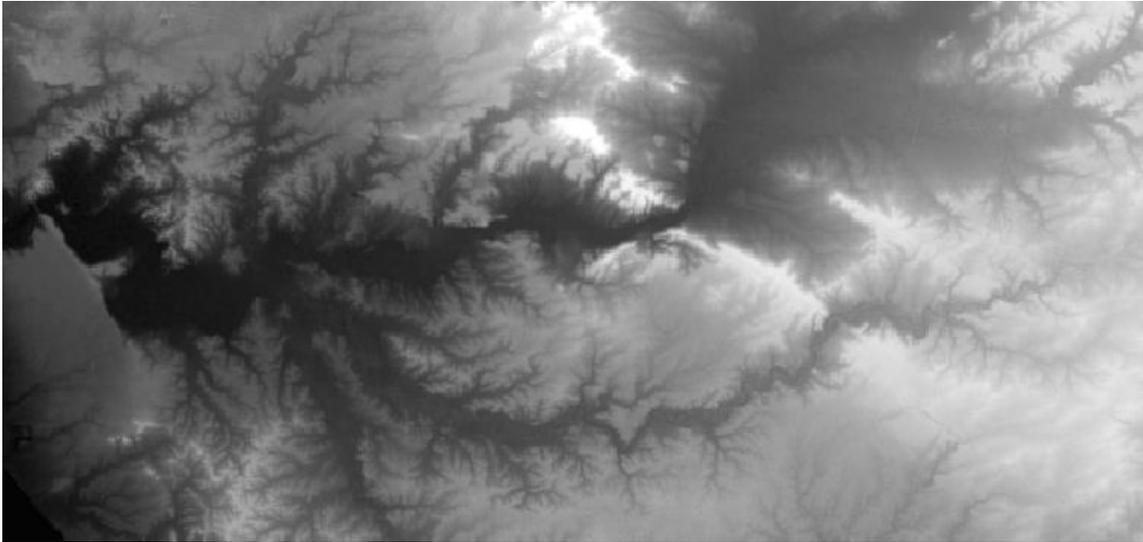
- Área de la cuenca
- Pendiente media
- Perímetro de la cuenca
- Orden de corriente (Strahler)
- Índice de compacidad (K_c)

4.1.2. Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca se realizó mediante el procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM), que fue descargado y procesado en el software QGIS. A continuación, se presentan las imágenes que ilustran los diferentes pasos del proceso:

Ilustración 2.

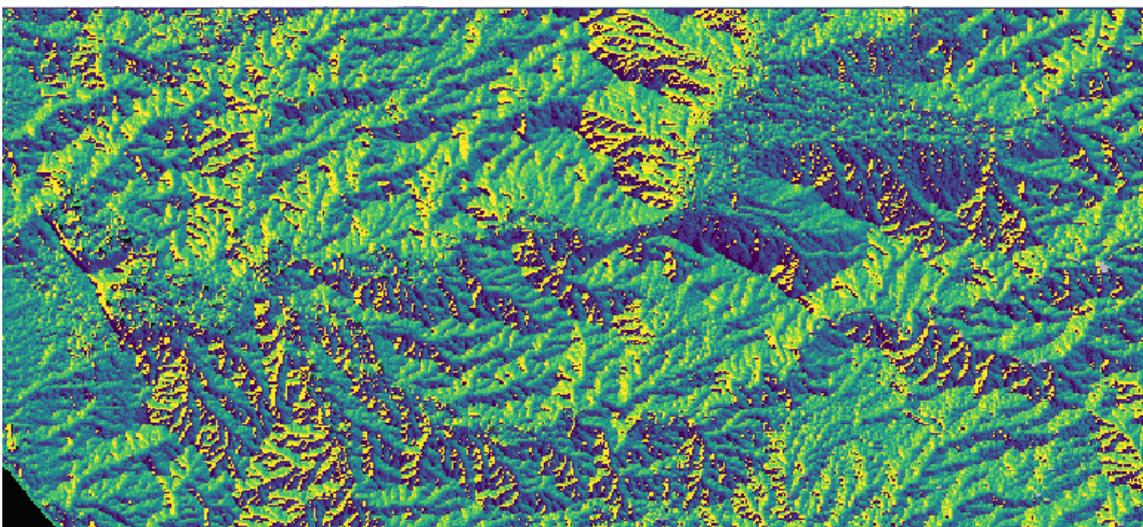
Visualización del Modelo Digital de Elevación (DEM) base utilizado para la delimitación.



Previo a la delimitación de la cuenca, se llevó a cabo un análisis detallado de la topografía del terreno a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM). Se calcularon los mapas de pendiente y acumulación de flujo, los cuales permiten identificar las zonas de mayor contribución hídrica y la red de drenaje natural de la cuenca. Este proceso constituye un paso clave para determinar la dinámica de escorrentía superficial y las áreas críticas donde se concentra el flujo.

Ilustración 3.

Mapa de pendientes generado a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) en QGIS.

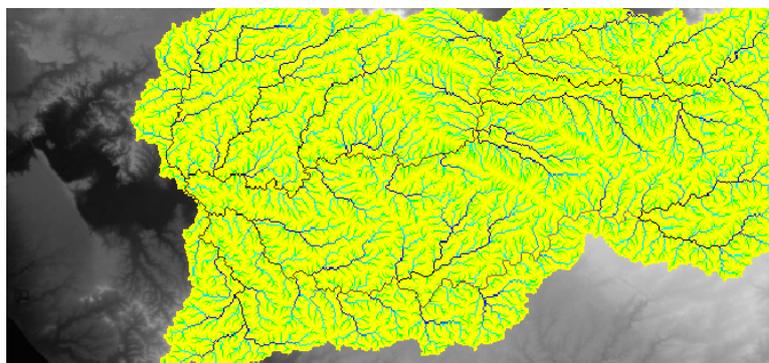


El mapa de pendientes permite visualizar la variación de la inclinación del terreno en la cuenca aportante a la represa Velasco Ibarra. Las áreas con tonalidades más intensas (amarillo y morado) representan pendientes más pronunciadas, mientras que las zonas en verde corresponden a pendientes moderadas o suaves. Este análisis resulta fundamental para identificar zonas críticas de escorrentía y posibles procesos de erosión que influyen en la dinámica hídrica de la cuenca.

Además del análisis de pendientes, se generaron mapas de acumulación de flujo a partir del DEM procesado en QGIS. Estos mapas representan la cantidad de flujo que cada celda del terreno recibe de todas las celdas superiores que drenan hacia ella, permitiendo identificar las rutas principales de escorrentía y zonas de concentración hídrica.

Ilustración 4.

Mapa de acumulación de flujo generado a partir del Modelo Digital de Elevación en QGIS.



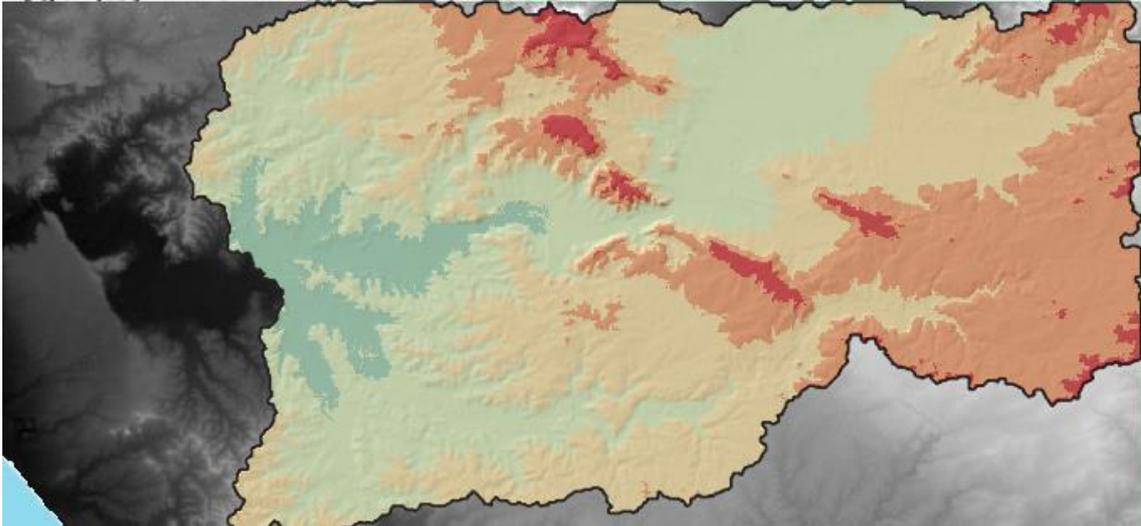
Las zonas con colores más intensos (amarillo y morado) representan áreas donde la escorrentía se concentra, formando cauces y canales naturales que alimentan directamente a la represa Velasco Ibarra.

La delimitación de la cuenca se realizó mediante el procesamiento del Modelo Digital de Elevación (DEM), que fue descargado y procesado en el software QGIS. Este modelo permitió identificar la red de drenaje natural y la dirección de flujo en el terreno, aspectos fundamentales para determinar las zonas de captación de escorrentía. Posteriormente, se aplicó el algoritmo `r.water.outlet` en el complemento de GRASS GIS,

tomando como punto de salida el aliviadero de la represa, con el fin de generar un polígono que representa la cuenca con exactitud topográfica.

Ilustración 5.

Delimitación final de la cuenca hidrográfica aportante a la represa Velasco Ibarra



4.1.3. Análisis visual y validación con imágenes satelitales

Sentinel-2

Para complementar y validar la delimitación de la cuenca y caracterizar las coberturas de suelo, se emplearon imágenes satelitales del programa Sentinel-2, descargadas del portal Copernicus Open Access Hub y procesadas en QGIS. Estas imágenes proporcionan información multispectral de alta resolución que resulta esencial para el análisis geoespacial y para confirmar la validez de la cuenca delimitada.

Se generaron diferentes composiciones espectrales que ofrecen perspectivas complementarias del área de estudio:

4.1.3.1. Composición True Color (B4, B3, B2)

Esta composición muestra el área con colores naturales, como lo vería el ojo humano, lo que facilita la interpretación visual directa de la cobertura del suelo y del entorno físico. Permite identificar de manera precisa las áreas urbanas, cuerpos de agua, zonas agrícolas y forestales.

Ilustración 6.

Composición true color de Sentinel-2

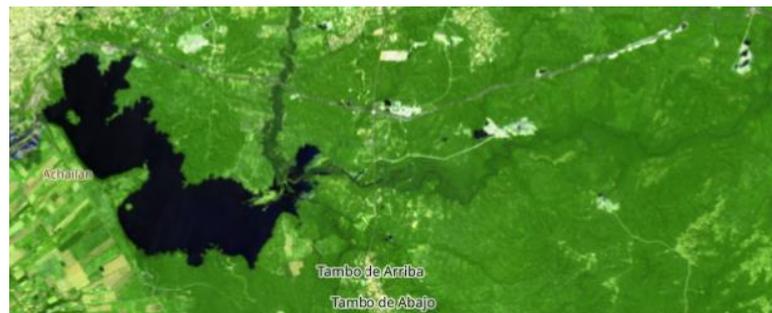


4.1.3.2. *Composición False Color (B8, B4, B3)*

La composición en falso color, que utiliza la banda del infrarrojo cercano, realza la vegetación en tonos rojos o rosados, permitiendo diferenciar con mayor claridad las coberturas vegetales de las zonas agrícolas o urbanizadas. Esto es especialmente relevante para determinar las áreas de mayor densidad vegetal, las cuales tienen un impacto directo en los coeficientes de escorrentía y en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Ilustración 7.

Composición false color (vegetación) de Sentinel-2



4.1.3.3. *NDVI (Índice de Vegetación)*

El NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) se calculó a partir de las bandas correspondientes de Sentinel-2, ofreciendo un indicador cuantitativo de la salud y densidad de la vegetación. Los valores más altos de NDVI representan áreas con vegetación más sana y densa, mientras que valores bajos o negativos indican áreas con escasa cobertura vegetal o zonas degradadas.

Ilustración 8.

Índice NDVI derivado de Sentinel-2



Se evidencian las zonas con mayor densidad de vegetación en la cuenca. Este análisis permitió identificar áreas críticas para la conservación hídrica y zonas donde la cobertura vegetal juega un papel fundamental en la regulación de escorrentía y recarga.

La combinación de estas imágenes permitió obtener un diagnóstico visual completo y multidimensional de la cuenca aportante a la represa Velasco Ibarra. Su integración con los productos derivados del DEM (pendientes, acumulación de flujo y red de drenaje) refuerza la confiabilidad de la delimitación y aporta evidencia clave para la evaluación de la dinámica hídrica y las necesidades de manejo sostenible de la cuenca.

4.1.4. Cálculo de parámetros morfométricos y herramientas utilizadas

A partir de la cuenca delimitada, se calcularon los parámetros morfométricos principales utilizando las funciones del complemento QGIS Processing Toolbox y r.stream.stats (GRASS GIS). Las fórmulas y procedimientos fueron los siguientes:

4.1.4.1. Área de la cuenca (A)

Calculada directamente a partir del polígono vectorial de la cuenca en QGIS usando la herramienta:

- Vector > Research Tools > Basic Statistics for Fields
- Unidad: ha (o km²).

El área total de la cuenca se estimó en:

Tabla 1.

Área de cuenca delimitada de la represa Velasco Ibarra

Unidades	Metros cuadrados	Kilómetros cuadrados	Hectáreas
Medida	114259576,51	114.26	11,425.96

4.1.4.2. Perímetro de la cuenca (P)

Obtenido del polígono de la cuenca mediante la herramienta:

- Vector > Geometry Tools > Add Geometry Attributes
- Unidad: km.

Tabla 2.

Perímetro de la cuenca

Unidades	Metros lineales	Kilómetros
Medida	61548,76	61,54

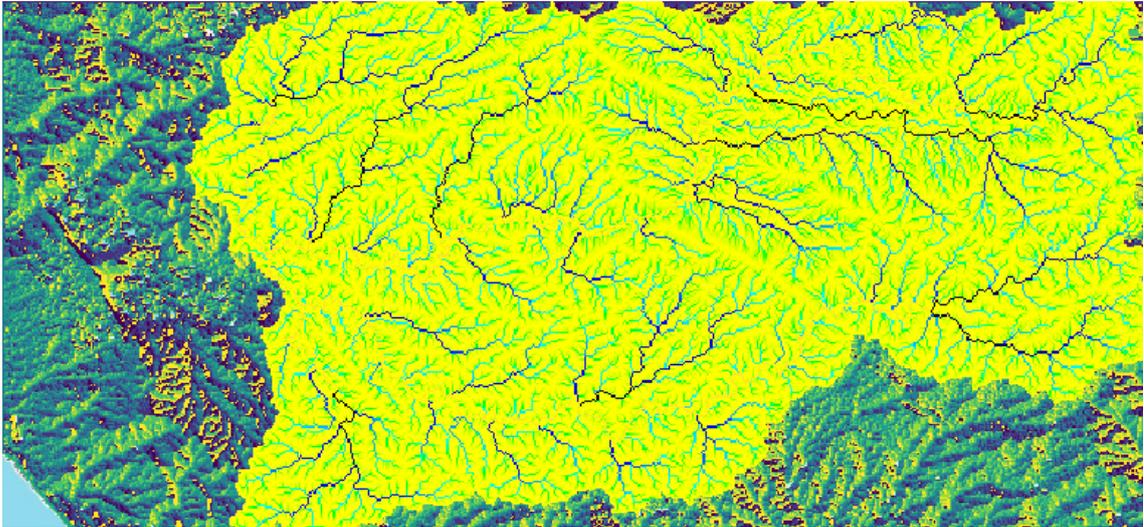
4.1.4.3. Longitud total de corrientes y longitud del cauce principal (L)

Derivados de la red de drenaje generada con el módulo r.stream.extract de GRASS GIS y analizados con:

- r.stream.order para jerarquizar la red.
- r.stream.stats para obtener la longitud total y del cauce principal.
- Unidad: km.

Ilustración 9.

Clasificación de causas



4.1.4.4. Orden de corriente principal

Determinado mediante el método de Strahler (Strahler, 1957) usando r.stream.order. El orden más alto encontrado corresponde al cauce principal

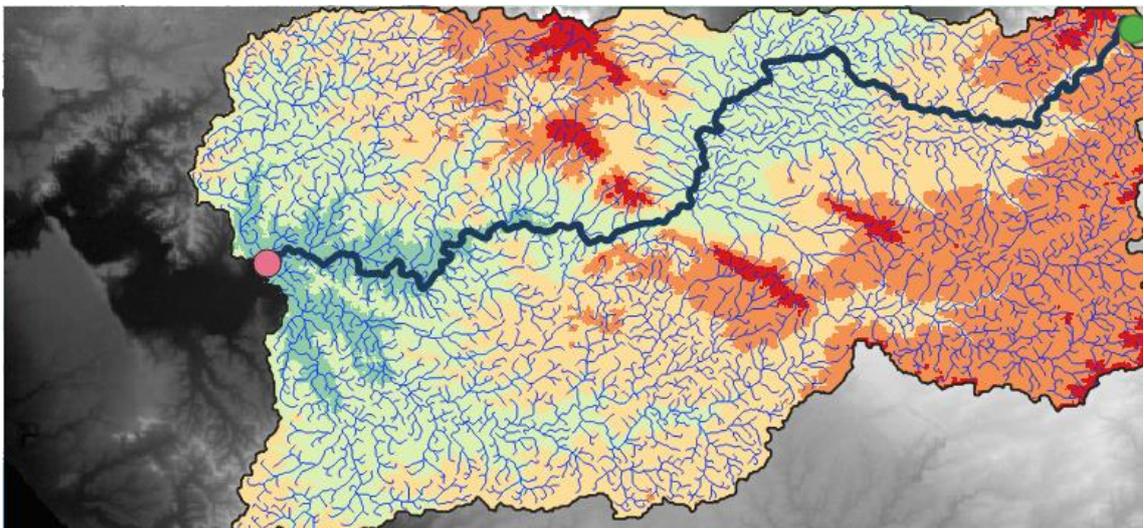
Tabla 3.

Longitud de cuenca principal

Unidades	Metros lineales	Kilómetros
Medida	23464,15	23.46

Ilustración 10.

Longitud de corriente principal



4.1.4.5. *Índice de Gravelius (Kc)*

El coeficiente de compacidad se calculó utilizando la fórmula:

Ecuación 9 .

Coeficiente de compacidad

$$K_C = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Donde

P: Perímetro de la cuenca (m)

A: área de la cuenca (m²)

$$K_C = \frac{61548,76}{2\sqrt{\pi * 114259576,51}} = 1.612$$

Corresponde a una cuenca Oblonga alargada

Debido a la forma alargada de la cuenca, el recorrido del agua se extiende en longitud, lo cual reduce significativamente la probabilidad de que se produzcan crecidas rápidas o repentinas.

4.1.4.6. *Factor de Forma (Rf)*

Calculado con la ecuación:

Ecuación 10.

Factor de forma

$$Rf = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

A: área de cuenca (m²)

L: longitud del cauce principal (m)

$$Rf = \frac{114259576,51}{(23464,15)^2} = 0.2075$$

El coeficiente de factor de forma es bajo por lo cual se clasifica en cuenca alargada

4.1.4.7. Curva e índice hipsométricos

La curva hipsométrica se generó en QGIS usando:

- Raster > Terrain Analysis > Hipsometric Curve (complemento).

Se graficó la relación entre la altitud y el área acumulada de la cuenca, permitiendo interpretar el estado evolutivo de la misma. El índice hipsométrico (Hi) se calculó aplicando la metodología de Strahler (1952).

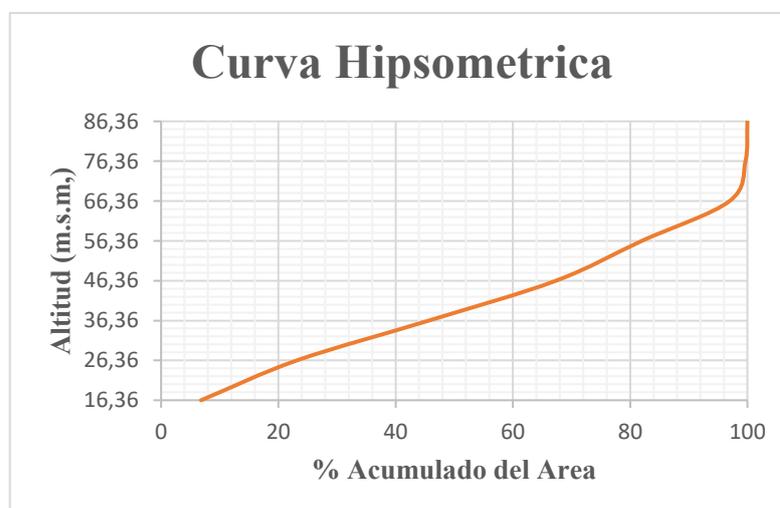
Tabla 4.

Índices hipsométricos

Curva Hipsométrica	
Área	Altitud
6.82	16.36
23.16	26.36
45.67	36.36
67.34	46.36
81.99	56.36
96.96	66.36
99.67	76.36
100.00	86.36

Figura 3.

Curva Hipsométrica



4.1.4.8. *Cálculo del índice hipsométrico (Hi)*

El índice hipsométrico (Hi) se determinó aplicando la fórmula de Strahler (1952):

Ecuación 10.

Índice hipsométrico

$$Hi = (h^- - hmin)/(hmin - hmax)$$

Donde:

- h^- : altitud media de la cuenca (62.89 m.s.n.m.).
- $hmin$: altitud mínima (16.36 m.s.n.m.).
- $hmax$: altitud máxima (86.36 m.s.n.m.).

Sustituyendo los valores:

$$Hi = \frac{62.89 - 16.36}{86.36 - 16.36} = 0.66$$

4.1.4.9. *Interpretación y clasificación*

El índice hipsométrico (Hi) calculado para la cuenca es 0.66, valor que la clasifica dentro del estado juvenil ($Hi > 0.6$). Este resultado sugiere que la cuenca presenta:

- Un relieve joven y activo, con pendientes pronunciadas.
- Alta capacidad de erosión y transporte de sedimentos.
- Mayor susceptibilidad a la generación de escorrentía concentrada y, por ende, potenciales crecidos rápidas durante eventos de precipitación intensa.

La curva hipsométrica y el índice Hi complementan los parámetros morfométricos generales, proporcionando una herramienta integral para comprender la respuesta geomorfológica e hidrológica de la cuenca ante diferentes escenarios climáticos y de gestión de recursos hídricos. Además, el índice hipsométrico aporta un enfoque adicional para entender cómo puede comportarse la cuenca bajo escenarios de cambio en el uso del suelo o variaciones climáticas. Al incorporar estos resultados dentro del análisis integral de la represa Velasco Ibarra, se fortalece la capacidad predictiva sobre el comportamiento del escurrimiento superficial y los procesos

de sedimentación, aspectos claves para la gestión de los recursos hídricos en la región.

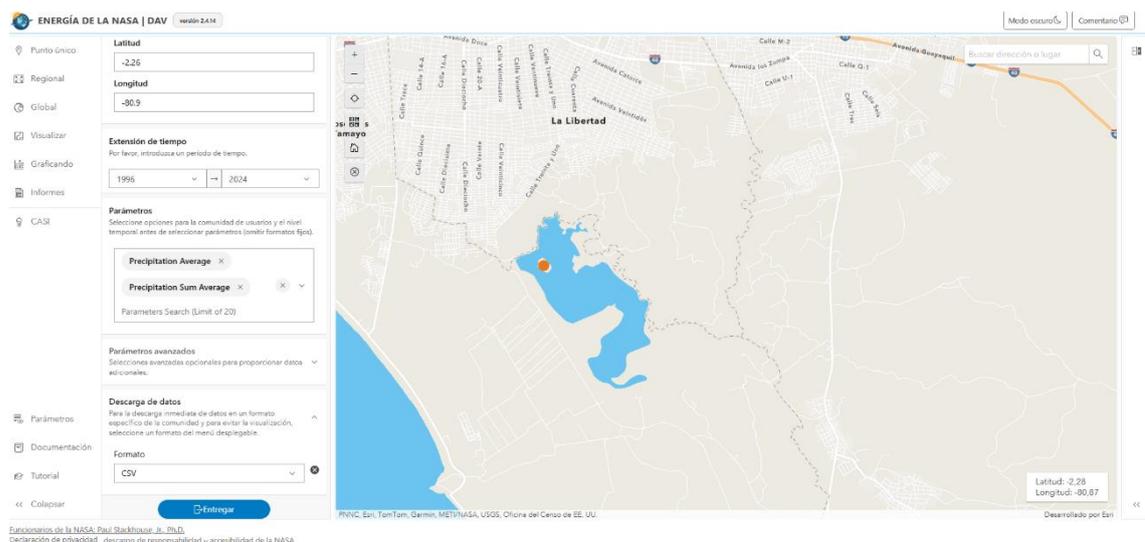
4.2. RESULTADOS DEL O.E.2.: ESTIMAR LOS CAUDALES MÁXIMOS PARA PERIODOS DE RETORNO DE 50, 100 y 200 AÑOS MEDIANTE EL MÉTODO RACIONAL MODIFICADO Y VALIDAR SU COMPORTAMIENTO ANTE ESCENARIOS CLIMÁTICOS RCP 4.5 Y 8.5

4.2.1. Obtención de los datos y generación de las curvas IDF

Para la determinación de la intensidad máxima de precipitación (i) se utilizó la plataforma POWER Data Access Viewer (versión 2.4.14) de la NASA. Esta plataforma proporciona datos meteorológicos satelitales e históricos de alta resolución para cualquier punto del mundo. Se descargaron los datos correspondientes a la ubicación de la represa Velasco Ibarra (Latitud: -2.26, Longitud: -80.9) para el período 1996–2024

Ilustración 11.

Vista de la plataforma NASA POWER donde se seleccionaron y descargaron los datos históricos de precipitación para la zona de estudio.



Con estos datos históricos se elaboró una base de datos de máximos mensuales y anuales de precipitación, permitiendo determinar los máximos anuales por año (una serie de 30 valores, correspondiente a los años de estudio).

A partir de estos máximos anuales se ajustaron las curvas **Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)** mediante el método de la ecuación de Bernard, obteniendo los parámetros específicos para la región:

Ecuación 11.

Periodo de retorno

$$P_r = \frac{k * T^m}{T_C^n}$$

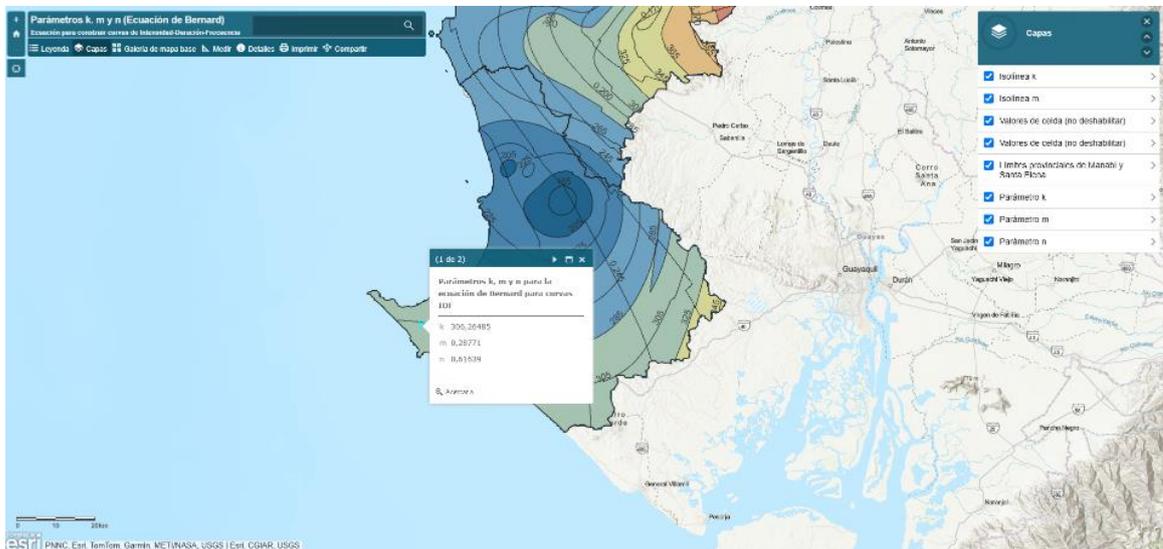
- $k = 306.26$
- $m = 0.28771$
- $n = 0.61639$
- $b = 0$ (asumido como cero para simplificación).

Que coinciden con los parámetros reales del sector sacados en la plataforma del POWER BY esri:

Ilustración 12.

Parámetros regionales para curvas IDF

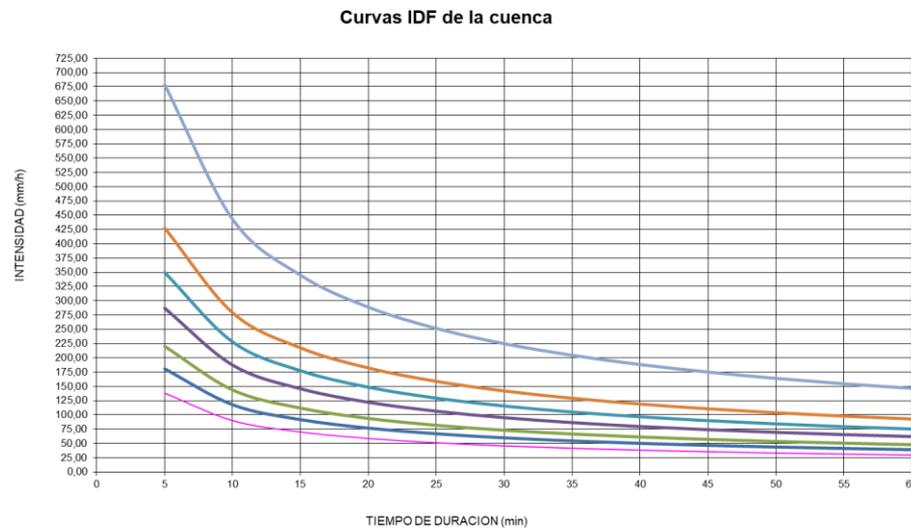
6



Estas curvas IDF generadas de manera personalizada para el área de la represa reflejan la relación entre la intensidad de precipitación, la duración crítica de la tormenta y el periodo de retorno, proporcionando una herramienta confiable y localmente calibrada para los cálculos hidrológicos.

Ilustración 13.

Curva IDF generada con los datos satelitales de la NASA y ajustada para la cuenca de la represa Velasco Ibarra.



4.2.2. Determinación del tiempo de concentración (Tc)

El tiempo de concentración (Tc) se estimó aplicando la fórmula de Kirpich (1940), utilizando las características morfométricas obtenidas en el O.E.1:

$$T_c = 0.0195 * L^{0.77} * S^{-0.385}$$

Donde:

- L: longitud del cauce principal (m).
- S: pendiente media del cauce (m/m).

$$T_c = 0.0195 * 23464.15 \text{ m}^{0.77} * 0.0298 \text{ m/m}^{-0.385}$$

$$T_c = 176.22 \text{ minutos} = 3 \text{ horas}$$

4.2.3. Determinación del coeficiente de escorrentía

El coeficiente de escorrentía ponderado se determinó considerando la cobertura de suelo identificada mediante imágenes Sentinel-2 y clasificada en QGIS, con base en la FAO (2011) y la Norma NEVI-12.

$C = 0.4$, valor ponderado representativo de la cuenca.

4.2.4. Cálculo de las intensidades máximas de precipitación

Utilizando la ecuación de Bernard con los parámetros regionales y el nuevo T_c , se obtuvieron las intensidades máximas para los periodos de retorno de 50, 100 y 200 años:

- Periodo de retorno de 50 años

$$i_{50} = \frac{306.26 * 50^{0.28771}}{176.22^{0.61639}} = 38.94 \text{ mm/h}$$

- Periodo de retorno de 100 años

$$i_{100} = \frac{306.26 * 100^{0.28771}}{176.22^{0.61639}} = 47.54 \text{ mm/h}$$

- Periodo de retorno de 200 años

$$i_{200} = \frac{306.26 * 200^{0.28771}}{176.22^{0.61639}} = 58.033 \text{ mm/h}$$

4.2.5. Cálculo de los caudales máximos (Q)

Se empleó la fórmula del método racional modificado:

$$Q = 0.278 \cdot C \cdot i \cdot A$$

Donde:

- A: área de la cuenca (ha), obtenida en el O.E.1.
- C: 0.4
- i: intensidades calculadas.

Periodo de retorno de 50 años

$$Q = 0.278 \cdot 0.40 \cdot 38.94 \cdot 11,42$$
$$Q = 49.45 \text{ m}^3/\text{s}$$

Periodo de retorno de 100 años

$$Q = 0.278 \cdot 0.40 \cdot 47.54 \cdot 11,42$$
$$Q = 60.37 \text{ m}^3/\text{s}$$

Periodo de retorno de 100 años

$$Q = 0.278 \cdot 0.40 \cdot 58.03 \cdot 11,42$$

$$Q = 73.69 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.2.6. Validación ante escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5

Para evaluar el impacto potencial del cambio climático sobre los caudales máximos estimados, se realizó una validación considerando los escenarios climáticos propuestos por el IPCC (2021): RCP 4.5 y RCP 8.5. Estos escenarios representan proyecciones de concentración de gases de efecto invernadero y sus impactos sobre la precipitación en la región.

Se consideraron incrementos en la intensidad de la precipitación proyectados para la zona costera ecuatoriana:

- RCP 4.5: incremento del 20% en la intensidad máxima de precipitación.
- RCP 8.5: incremento del 30% en la intensidad máxima de precipitación.

La intensidad ajustada se calculó con la siguiente fórmula:

Ecuación 12.

Intensidad ajustada

$$i_{RCP} = i \cdot \left(1 + \frac{\text{incremento}}{100}\right)$$

Donde:

- i_{RCP} : intensidad de precipitación ajustada al escenario.
- i : intensidad máxima original (mm/h).
- Incremento: porcentaje de incremento (20% o 30%).

Resultados de las intensidades máximas ajustadas

- Periodo de retorno de 50 años:

$$i_{50}^{4.5} = 38.94 \cdot 1.20 = 46.72 \text{ mm/h}$$

$$i_{50}^{8.5} = 38.94 \cdot 1.30 = 50.62 \text{ mm/h}$$

- Periodo de retorno de 100 años:

$$i_{100}^{4.5} = 47.54 \cdot 1.20 = 57.04 \text{ mm/h}$$

$$i_{100}^{8.5} = 47.54 * 1.30 = 61.80 \text{ mm/h}$$

- Periodo de retorno de 200 años:

$$i_{100}^{4.5} = 58.03 * 1.20 = 69.63 \text{ mm/h}$$

$$i_{100}^{8.5} = 58.03 * 1.30 = 75.43 \text{ mm/h}$$

Cálculo de caudales máximos ajustados

Se utilizó la fórmula del método racional modificado para cada escenario

- Periodo de retorno de 50 años

$$Q_{50}^{4.5} = 0.278 * 0.40 * 46.73 * 11.42 = 59.34 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{50}^{8.5} = 0.278 * 0.40 * 50.61 * 11.42 = 64.22 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Periodo de retorno de 100 años

$$Q_{50}^{4.5} = 0.278 * 0.40 * 57.05 * 11.42 = 72.30 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{50}^{8.5} = 0.278 * 0.40 * 61.80 * 11.42 = 78.44 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Periodo de retorno de 200 años

$$Q_{50}^{4.5} = 0.278 * 0.40 * 69.63 * 11.42 = 88.42 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q_{50}^{8.5} = 0.278 * 0.40 * 75.43 * 11.42 = 95.78 \text{ m}^3/\text{s}$$

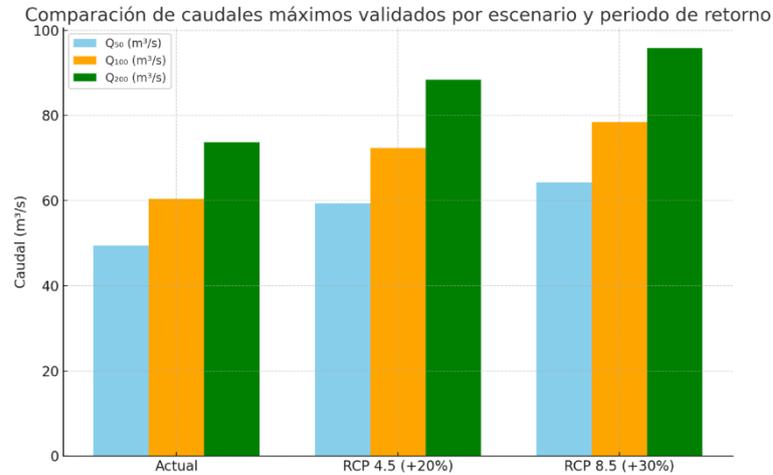
Tabla 5 .

Resumen final de caudales maximos validados

Caudales máximos validados			
Escenario	$Q_{50}(\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{100}(\text{m}^3/\text{s})$	$Q_{200}(\text{m}^3/\text{s})$
Actual	49.45	60.37	73.69
RCP 4.5 (+20%)	59.34	72.30	88.42
RCP 8.5 (+30%)	64.22	78.44	95.78

Figura 4.

Comparación de caudales máximos proyectados en diferentes escenarios climáticos para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años.



La gráfica muestra cómo aumentan los caudales a medida que se incrementa la intensidad de lluvia proyectada por los escenarios climáticos, destacando la importancia de considerar estos efectos en la gestión hídrica de la represa Velasco Ibarra.

4.3. RESULTADOS DEL O.E.3.: SIMULAR LA CAPACIDAD DE EVACUACIÓN Y LAMINACIÓN DEL ALIVIADERO DE LA REPRESA VELASCO IBARRA MEDIANTE MODELACIÓN HIDRÁULICA EN HEC-RAS 2D, CONSIDERANDO CAUDALES MÁXIMOS PARA DIFERENTES PERIODOS DE RETORNO Y ESCENARIOS CLIMÁTICOS, CON EL FIN DE VERIFICAR EL CUMPLIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE SEGURIDAD ESTRUCTURAL Y FUNCIONAL

El análisis de las características hidráulicas y morfométricas del embalse se desarrolló a partir de información geoespacial obtenida mediante modelos digitales de elevación (DEM), imágenes satelitales de alta resolución y herramientas de sistema de información geográfica (SIG). Los datos permitieron delimitar con precisión la topografía del vaso de embalse, estimar la cota de vertido del aliviadero, calcular el volumen útil actual, y

determinar indicadores morfológicos como el índice de Gravelius, el coeficiente de compacidad y la curva hipsométrica.

Adicionalmente, se realizó una evaluación de la pérdida de capacidad del embalse por acumulación de sedimentos, así como un análisis de la eficiencia hidráulica del aliviadero existente. A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos:

4.3.1. Caracterización geométrica y topográfica del embalse

4.3.1.1. Perfil de elevación del aliviadero

Con el objetivo de estimar la cota de descarga del aliviadero, se generó un perfil longitudinal de terreno en el sector donde se encuentra la estructura hidráulica principal. El perfil se elaboró a partir de datos topográficos interpretados desde un Modelo Digital de Elevación, con validación satelital y georreferenciada con imágenes de alta resolución (fecha de captura: 21 de marzo de 2025, fuente: Airbus).

La sección estudiada, que abarca un tramo de 81.5 metros, presenta una elevación máxima de 16 m s.n.m., con una elevación media de aproximadamente 8 m s.n.m. en el punto central correspondiente al canal de vertido. Esto respalda la elección de la cota 8 m s.n.m. como nivel operativo superior del embalse para los fines del cálculo del volumen útil.

Ilustración 14.

Perfil de elevación sobre la represa Velasco Ibarra, interpretado a partir de imágenes satelitales (marzo 2025)



4.3.1.2. Área y superficie del embalse

La delimitación de la superficie útil del embalse Velasco Ibarra se realizó utilizando herramientas de análisis espacial en QGIS, a partir de la interpretación del Modelo Digital de Elevación (DEM) y la generación de curvas de nivel equidistantes. Tras la evaluación de las curvas generadas, se identificó que la curva de 8 metros sobre el nivel del mar representaba con mayor precisión el límite superior del área operativa del embalse.

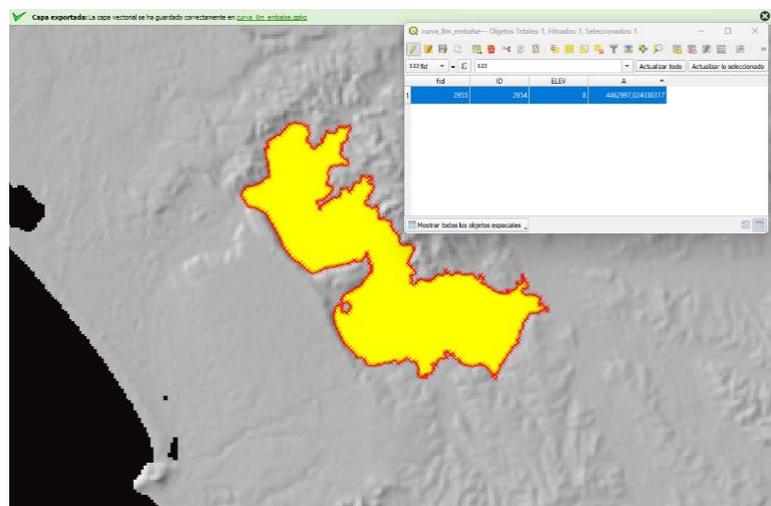
Para aislar esta curva, se seleccionó manualmente el contorno correspondiente al embalse y se exportó como una nueva capa. Posteriormente, se aplicó la herramienta Lines to Polygons para transformar el contorno en una geometría cerrada tipo polígono. Finalmente, se calculó el área de dicha superficie mediante la herramienta Calculadora de campos, obteniendo como resultado:

- Área total del embalse a la curva de nivel 8 m: 4,462,997.02 m² (446.30 ha)

Este valor representa la superficie útil actual del embalse, delimitada por la cota operativa de 8 m, y constituye un insumo fundamental para el cálculo del volumen útil de almacenamiento, así como para el análisis comparativo con superficies históricas o proyectadas a otras cotas.

Ilustración 15.

Delimitación de la superficie del embalse Velasco Ibarra para cota de 8 m.s.n.m., obtenida en QGIS a partir del DEM.



4.3.1.3. *Volumen útil del embalse*

El volumen útil del embalse Velasco Ibarra fue estimado utilizando la herramienta Volumen de la superficie ráster del software QGIS. El cálculo se realizó sobre un Modelo Digital de Elevación (DEM) recortado al área útil del embalse, previamente filtrado mediante la Calculadora Ráster para excluir elevaciones superiores a 8 m, correspondiente a la cota máxima operativa del embalse.

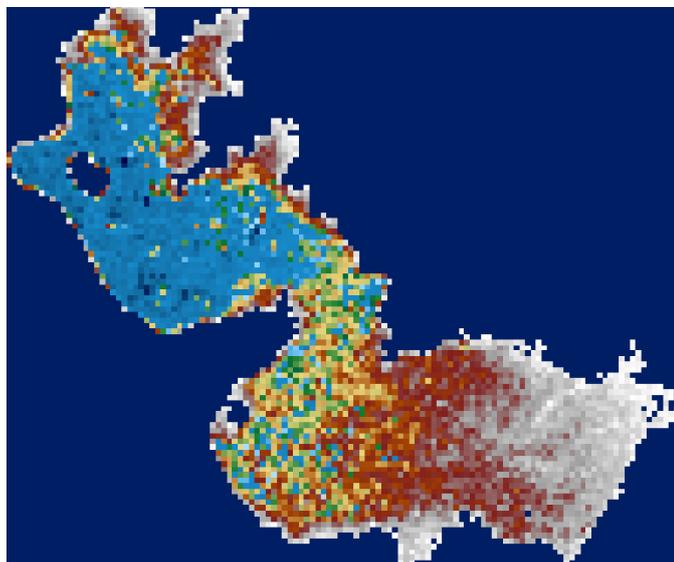
La elevación mínima del vaso se identificó en -1.52 m, valor utilizado como nivel base. Se aplicó el método “Contar solo por encima del nivel base”, lo que permitió calcular únicamente el volumen entre -1.52 m y 8.00 m s.n.m., es decir, el volumen realmente embalsado hasta la cota máxima sin sobreestimar áreas topográficamente más elevadas.

- Volumen útil actual del embalse: $41,577,542.35$ m³

Este valor representa la capacidad real de almacenamiento del embalse bajo condiciones topográficas actuales. La metodología aplicada con SIG permite una estimación precisa sin necesidad de batimetría directa, constituyendo una herramienta confiable para fines de gestión hídrica, planificación de riego y evaluación del impacto por colmatación.

Ilustración 16.

Mapa de elevaciones (DEM) del embalse Velasco Ibarra, recortado a cotas ≤ 8 m para el cálculo del volumen útil



4.3.1.4. *Estimación de volumen acumulado de sedimentos*

Ante la ausencia de registros batimétricos o datos de diseño originales del embalse Velasco Ibarra, se procedió a estimar el volumen acumulado de sedimentos aplicando un enfoque empírico, comúnmente utilizado en estudios de reservorios en regiones tropicales. Este enfoque considera como variable principal la tasa de sedimentación media anual por unidad de área, expresada en m³/km²/año.

Con base en literatura técnica internacional, particularmente el boletín técnico de la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD, 2003), se identifican tasas promedio globales de sedimentación entre 0.7 % y 0.8 % de pérdida de capacidad por año, con rangos más altos en regiones tropicales, donde los valores pueden superar el 2 % anual debido a factores como la pendiente del terreno, el tipo de suelo y el régimen de precipitaciones.

Tabla 6.

Tasas de sedimentación anual en embalses

Región o tipo de cuenca	Tasa de sedimentación anual estimada
Promedio global	0.7 % – 0.8 %
Cuencas tropicales (alta erosión)	1.0 % – 2.0 %
Casos extremos	> 3.0 %

En este estudio, se adoptó una tasa de sedimentación conservadora de 1,000 m³/km²/año, dentro del rango reportado para cuencas con condiciones tropicales. Con un área de cuenca aportante delimitada en 114.26 km² y una antigüedad aproximada de 70 años desde su construcción (década de 1950), el volumen acumulado de sedimentos se estimó mediante la fórmula empírica:

Ecuación 13.

Fórmula de sedimentación acumulada (tasa constante)

$$V_{SED} = A * T * R_S$$

Donde:

A: Área de la cuenca aportante

R_S: Tasa de sedimentación específica

T: Tiempo de operación del embalse

$$V_{SED} = 114.26 \cdot 1,000 \cdot 70 = 7,998,200 \text{ m}^3$$

Este volumen representa una pérdida del 19.24 % de la capacidad útil original del embalse, considerando que el volumen útil actual calculado con herramientas SIG es de 41,577,542.35 m³. El valor evidencia una posible reducción significativa de la capacidad de almacenamiento y refuerza la necesidad de realizar campañas periódicas de monitoreo batimétrico y medidas de conservación de su cuenca aportante.

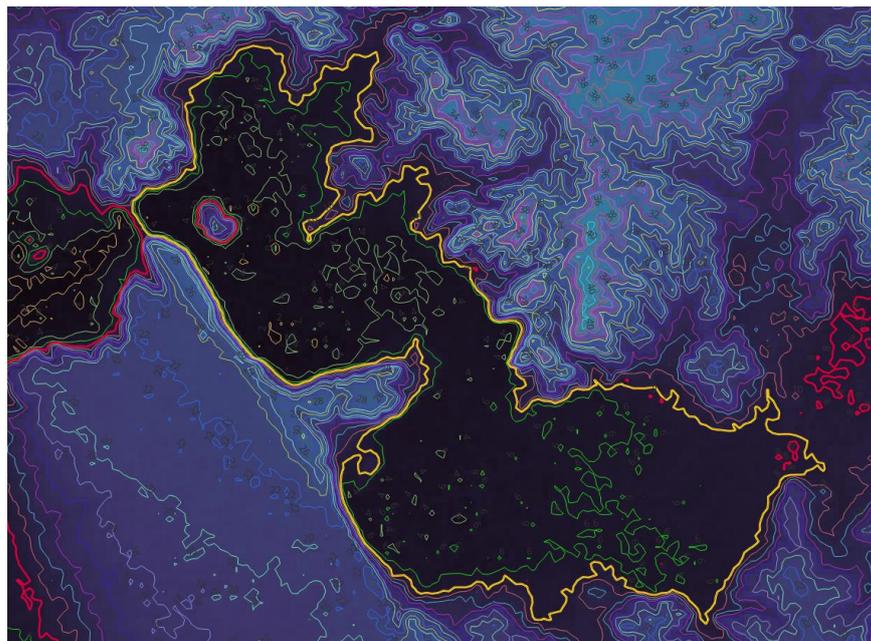
4.3.2. Indicadores morfométricos del embalse

Se calcularon los principales indicadores morfométricos del embalse, fundamentales para evaluar su geometría y eficiencia hidráulica. Todos los cálculos se realizaron en QGIS, con base en el polígono delimitado por la cota de 8 m s.n.m.:

- Área (A): 4.463 km²
- Perímetro (P): 18.202 km
- Longitud máxima (L): 4.303 km (medida sobre el eje del embalse)

Ilustración 17.

Delimitación morfométrica del embalse Velasco Ibarra sobre curvas de nivel generadas a partir de un Modelo Digital de Elevación (DEM) en QGIS.



4.3.2.1. *Índice de Gravelius (K):*

$$k = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} = \frac{18.202}{2\sqrt{\pi 4463}} = 2.4305$$

El índice de Gravelius calculado fue de 2.43, lo cual evidencia una morfología notablemente irregular del embalse Velasco Ibarra. Este valor, significativamente superior a 1, indica una forma alejada de la geometría circular, con múltiples irregularidades y contornos complejos. Tal configuración es común en embalses construidos sobre depresiones naturales o con topografía variable, y puede influir en la distribución interna del flujo, la acumulación de sedimentos y la gestión hidráulica general del reservorio.

4.3.2.2. *Coefficiente de compacidad (Kc):*

$$K_c = \frac{P}{\sqrt{A}} = \frac{18.202}{\sqrt{4.463}} = 8.62$$

El valor obtenido del coeficiente de compacidad fue de 8.62, lo cual ratifica la presencia de un contorno altamente irregular y alargado. Este coeficiente, que relaciona el perímetro del embalse con la raíz cuadrada de su área, tiende a ser bajo en cuerpos de agua compactos o de forma cercana a la circular, mientras que valores elevados (como el presente) evidencian bordes complejos, con entrantes, salientes y posiblemente ramificaciones. Esta morfología puede aumentar la fricción hidráulica y favorecer la sedimentación diferencial a lo largo del vaso, afectando tanto la eficiencia de almacenamiento como el comportamiento del flujo en condiciones de operación y eventos extremos.

4.3.2.3. *Factor de forma (Ff):*

$$F_F = \frac{A}{L^2} = \frac{4.463}{(4.303)^2} = 0.241$$

El factor de forma calculado para el embalse Velasco Ibarra fue de 0.241, lo que indica que se trata de un cuerpo de agua con geometría marcadamente alargada y angosta. Este índice, definido como el cociente entre el área superficial del embalse y el cuadrado de su longitud máxima, tiende a valores cercanos a 1 en

embalses más compactos o de formas regulares, mientras que valores menores a 0.5 son característicos de estructuras lineales o elongadas.

Una morfología alargada como la presente implica que el flujo tiende a distribuirse longitudinalmente, con mayor tiempo de recorrido desde las zonas de captación hacia la descarga. Este tipo de geometría influye directamente en el tiempo de retención hidráulico, la eficiencia en la laminación de caudales de avenida, y la forma en que se depositan los sedimentos, que generalmente se concentran aguas arriba. Además, embalses alargados suelen presentar gradientes de calidad de agua a lo largo de su eje, lo que puede afectar su gestión operativa.

Tabla 7.

Resumen de indicadores morfométricos

Indicador	Valor obtenido	Interpretación
Área superficial (A)	4.463 km ²	Superficie útil a cota 8 m
Perímetro (P)	18.202 km	Contorno total del embalse
Longitud máxima (L)	4.303 km	Eje longitudinal del vaso
Índice de Gravelius (K)	2.43	Forma irregular
Coefficiente de compacidad	8.62	Contorno complejo
Factor de forma (Ff)	0.241	Embalse alargado

4.3.3. Simulación hidráulica del aliviadero

Con base en los caudales máximos obtenidos para los periodos de retorno de 50 y 100 años ($Q_{50} = 49.45 \text{ m}^3/\text{s}$ y $Q_{100} = 60.37 \text{ m}^3/\text{s}$), se procedió a simular hidráulicamente el comportamiento del aliviadero de la represa Velasco Ibarra utilizando el software HEC-RAS 2D. Para ello, se empleó un Modelo Digital de Elevación previamente procesado en QGIS, delimitando el dominio hidráulico, estableciendo condiciones de contorno en los límites de entrada y salida, e incorporando como hidrogramas de entrada las funciones triangulares basadas en dichos caudales, con una duración de 7 horas, correspondientes al tiempo de respuesta estimado para la cuenca.

El aliviadero existente, con una longitud de coronación de 15 metros, fue representado mediante una línea de control de flujo tipo “weir” en el modelo, con base en los parámetros topográficos obtenidos en campo y en el análisis de perfiles extraídos del modelo. Durante la simulación con el caudal de 49.45 m³/s (Q₅₀), el sistema hidráulico operó cerca de su capacidad límite. Se observó que el aliviadero logró evacuar la mayor parte del volumen entrante, alcanzando niveles de tirante promedio sobre la cresta de entre 0.80 y 1.05 m, sin provocar desbordamientos. No obstante, se generaron zonas de encharcamiento aguas arriba, producto de la acumulación temporal del flujo antes de su evacuación.

En contraste, al simular el escenario de 100 años con un caudal de 60.37 m³/s (Q₁₀₀), el modelo mostró una clara insuficiencia del aliviadero para evacuar el volumen entrante de forma eficiente. Se registraron tirantes superiores a 1.25 m sobre la cresta del aliviadero, y el flujo comenzó a rebosar por puntos bajos en la margen izquierda de la represa, generando fugas no controladas que retomaron el cauce aguas abajo. Este comportamiento evidencia que, aunque el agua regresa finalmente al mismo cauce que el aliviadero, lo hace por rutas no diseñadas hidráulicamente, lo que representa un riesgo estructural para la integridad de los bordes y taludes.

El análisis dinámico del llenado del embalse, considerando su volumen útil de 41'577,542.35 m³ y el caudal de entrada de 60.37 m³/s, permitió estimar un tiempo de llenado teórico cercano a los 8 días, bajo condiciones de flujo constante, lo que valida la sensibilidad del sistema frente a eventos extremos prolongados. Además, durante las simulaciones se detectaron velocidades de flujo que superan los 2.5 m/s en el canal de salida, lo cual podría generar erosión localizada si no se implementan estructuras de disipación de energía adecuadas.

Finalmente, se evidenció que en escenarios proyectados con caudales superiores a los 70 m³/s (como los contemplados en RCP 8.5), el aliviadero se ve ampliamente superado, siendo necesario prever medidas de rediseño o refuerzo, tales como ampliación de la sección, incorporación de aliviaderos auxiliares o estructuras de bypass controlado.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. CONCLUSIONES

.La evaluación hidráulica del aliviadero de la represa Velasco Ibarra demostró que su capacidad de evacuación resulta insuficiente ante caudales extremos, especialmente en escenarios de cambio climático. Si bien responde de forma aceptable a eventos de frecuencia media, las simulaciones revelaron que, a partir de caudales de mayor magnitud, el sistema presenta sobrecargas que generan desbordamientos por zonas no diseñadas para la descarga, comprometiendo la seguridad de la infraestructura. Estos resultados confirman la necesidad de redimensionar el aliviadero y de implementar medidas de control complementarias que garanticen su funcionamiento eficiente bajo condiciones hidrológicas futuras más severas.

OE1: La delimitación y caracterización morfométrica de la cuenca hidrográfica aportante a la represa Velasco Ibarra permitió establecer parámetros clave que describen su dinámica hidrológica. Se determinó que el área total de la cuenca es de 114.26 km² (11,425.96 ha) con un perímetro de 61.54 km. La longitud del cauce principal alcanza los 23.46 km, lo que, combinado con su morfología, clasifica a la cuenca como alargada u oblongo, según el índice de compacidad de Gravelius ($K_c = 1.612$) y el factor de forma ($R_f = 0.2075$). Este tipo de forma influye directamente en la respuesta hidrológica de la cuenca, dado que reduce la posibilidad de crecidas abruptas, pero alarga el tiempo de evacuación del flujo superficial.

El análisis topográfico, complementado con datos satelitales Sentinel-2 (composición True Color, False Color y NDVI), permitió validar la delimitación y reconocer las coberturas de suelo predominantes, identificando zonas con vegetación densa que contribuyen a la infiltración y la regulación hídrica.

Asimismo, la construcción de la curva hipsométrica y el cálculo del índice hipsométrico ($H_i = 0.66$) situaron a la cuenca en un estado juvenil. Este valor refleja una topografía activa, con pendientes pronunciadas y alta capacidad de transporte de sedimentos, lo cual

representa un riesgo significativo de colmatación del embalse si no se implementan medidas de manejo de cuenca.

En síntesis, los parámetros morfométricos obtenidos no solo permiten entender el comportamiento natural del sistema hídrico, sino que también fundamentan el diseño de medidas de control hidráulico y la planificación de escenarios ante eventos extremos. Esta caracterización fue indispensable para los cálculos hidrológicos y las simulaciones hidráulicas ejecutadas en los siguientes objetivos.

OE2: La estimación de los caudales máximos para los periodos de retorno de 50, 100 y 200 años en la cuenca de la represa Velasco Ibarra, mediante el método racional modificado, permitió cuantificar con precisión los valores de diseño hidrológico en condiciones actuales y proyectadas. A partir del análisis histórico de precipitación (1996–2024) y la generación de curvas IDF personalizadas, se determinó un tiempo de concentración de 176.22 minutos (aproximadamente 3 horas), lo que refleja una cuenca extensa y con un recorrido de flujo prolongado. Con base en esta duración crítica y considerando un coeficiente de escorrentía ponderado de 0.4, se obtuvieron los siguientes caudales máximos: 49.45 m³/s para 50 años, 60.37 m³/s para 100 años y 73.69 m³/s para 200 años. Posteriormente, se evaluó el impacto de los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 del IPCC, que contemplan incrementos del 20 % y 30 % en la intensidad de lluvia respectivamente, obteniéndose valores de hasta 95.78 m³/s para el escenario más extremo (RCP 8.5, 200 años). Estos resultados evidencian que los caudales proyectados superan considerablemente las condiciones actuales, representando un riesgo real para la infraestructura de la represa si no se adoptan medidas de adaptación. La validación con escenarios climáticos confirma que, bajo condiciones de cambio climático, la represa experimentará eventos de mayor magnitud e intensidad. En conclusión, este objetivo permitió no solo establecer valores de diseño hidrológico para diferentes niveles de seguridad, sino también demostrar que el sistema actual podría ser insuficiente bajo condiciones futuras. Se recomienda revisar las dimensiones hidráulicas del aliviadero y evaluar obras complementarias de regulación y evacuación de excedentes ante eventos extremos.

OE3: En cumplimiento del tercer objetivo específico, se llevó a cabo la simulación hidráulica del aliviadero de la represa Velasco Ibarra mediante el software HEC-RAS 2D, utilizando como insumo los caudales máximos estimados para periodos de retorno de 50 y 100 años. Los resultados obtenidos permitieron evidenciar que el aliviadero actual, con una longitud de coronación de 15 metros, presenta una capacidad hidráulica suficiente para evacuar el caudal correspondiente al periodo de retorno de 50 años ($Q_{50} = 49.45 \text{ m}^3/\text{s}$), sin generar afectaciones significativas en las zonas aledañas ni comprometer la integridad estructural del embalse.

Sin embargo, cuando se simula el caudal de 100 años ($Q_{100} = 60.37 \text{ m}^3/\text{s}$), se registran incrementos considerables en la lámina de agua, lo que produce desbordamientos en áreas aguas arriba del aliviadero, generando fugas por zonas no diseñadas para la conducción de flujo. Estas fugas, si bien retornan eventualmente al cauce principal del aliviadero, implican riesgos estructurales y de erosión en las márgenes del embalse. Este comportamiento se intensifica bajo los escenarios climáticos proyectados RCP 4.5 y RCP 8.5, donde los caudales superan los $70 \text{ m}^3/\text{s}$, confirmando la insuficiencia de la infraestructura existente frente a eventos hidrológicos extremos.

En función de estos hallazgos, se concluye que el aliviadero cumple su función hidráulica bajo condiciones de diseño actuales, pero no garantiza un comportamiento seguro ante eventos con mayores periodos de retorno o en condiciones de cambio climático. Por ello, se recomienda implementar un rediseño del aliviadero que considere una mayor sección hidráulica, la inclusión de disipadores de energía y estructuras auxiliares de descarga, así como el reforzamiento de taludes vulnerables, con el fin de mitigar los riesgos asociados a desbordamientos no controlados y garantizar la seguridad integral del sistema en el mediano y largo plazo.

5.2. Recomendaciones

Fortalecer la red de monitoreo hidrometeorológico.

Se recomienda instalar estaciones meteorológicas y aforos automáticos en puntos estratégicos de la cuenca para obtener datos en tiempo real sobre precipitaciones

extremas, caudales y calidad de agua. Estos datos permitirán recalibrar y actualizar las curvas IDF y mejorar la precisión de los caudales máximos proyectados.

Incorporar escenarios climáticos en la planificación hídrica.

Se debe incluir de forma explícita los escenarios climáticos RCP 4.5 y RCP 8.5 en la actualización de planes de manejo de la represa y en el diseño de obras de mitigación, considerando los incrementos proyectados en los caudales máximos (hasta un 30% en escenarios extremos).

Implementar medidas de conservación y control de erosión.

La caracterización morfométrica y el análisis de pendientes y áreas de recarga hídrica permiten priorizar zonas vulnerables. Se recomienda implementar prácticas de conservación de suelos, como reforestación en zonas de alta pendiente, construcción de diques de retención y control de cárcavas.

Realizar inspecciones periódicas del aliviadero y estructuras conexas.

Se sugiere establecer un programa de mantenimiento y monitoreo de la infraestructura del aliviadero, dado que la modelación hidráulica evidenció incrementos moderados en los niveles de lámina de agua bajo escenarios de cambio climático. Esto garantizará su correcto funcionamiento y la seguridad de la represa.

Promover la capacitación técnica y la participación comunitaria.

Es fundamental capacitar a los técnicos y autoridades locales en el uso de herramientas de SIG, fotogrametría aérea y modelación hidráulica para fortalecer la gestión hídrica. Además, se recomienda involucrar a las comunidades locales en actividades de conservación y monitoreo participativo para fomentar la corresponsabilidad en la gestión del recurso.

Continuar la investigación y actualización de datos.

Dada la variabilidad climática y la importancia de contar con datos confiables, se recomienda mantener la actualización periódica de los datos hidrológicos y morfométricos de la cuenca. Esto permitirá mejorar la precisión de las proyecciones y adaptar las estrategias de manejo hídrico a las condiciones

Caracterizar morfométricamente la cuenca hidrográfica aportante a la represa Velasco Ibarra

Se recomienda implementar un programa de monitoreo geoespacial periódico con herramientas SIG y teledetección, con el fin de actualizar los parámetros morfométricos y detectar cambios en la cobertura vegetal que puedan influir en la generación de escorrentía. Además, se sugiere fortalecer la conservación de zonas con alta densidad de vegetación natural, ya que estas áreas juegan un rol clave en la regulación hídrica de la cuenca. Finalmente, se recomienda utilizar los datos de la caracterización para apoyar estrategias de manejo de cuencas y planificación territorial a nivel cantonal.

Estimar los caudales máximos de diseño y validar con escenarios climáticos

Se recomienda que los valores de caudal máximo estimados para periodos de retorno de 50, 100 y 200 años, así como los incrementos proyectados por escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, sean incorporados en los planes de gestión del riesgo hídrico, obras hidráulicas y diseños estructurales futuros. Asimismo, se aconseja mantener actualizadas las curvas IDF utilizadas en los cálculos, considerando el acceso continuo a bases de datos climáticas satelitales, como las de NASA POWER. Ante el aumento proyectado de caudales por efecto del cambio climático, se recomienda revisar la capacidad estructural de toda la infraestructura hidráulica asociada a la represa.

Simular la capacidad de evacuación del aliviadero mediante modelación hidráulica en HEC-RAS

Se recomienda realizar inspecciones técnicas frecuentes al aliviadero de la represa Velasco Ibarra, especialmente durante la época lluviosa, ya que la modelación hidrodinámica evidenció que su capacidad de evacuación puede verse comprometida ante eventos extremos. En función de los resultados obtenidos, se sugiere estudiar alternativas de rediseño o ampliación del aliviadero, así como implementar obras complementarias de control de sedimentos y disipación de energía aguas abajo. Finalmente, se recomienda integrar las simulaciones hidráulicas con un sistema de alerta temprana para prevenir afectaciones por desbordamientos o erosión regresiva.

ANEXOS

6.1. Anexos Fotográficos

Anexo A.1.

Fotografías del área del aliviadero de la represa Velasco Ibarra – vista general.



Anexo A.2. Fotografías del levantamiento topográfico con dron y GNSS.



Anexo A.3. Fotografías del cauce principal y afluentes de la cuenca aportante.



Anexo A.4. Evidencias de campo durante la fase de validación y modelación hidráulica.



Anexo A.5. Fotografías de cauce bajo de la cuenca.

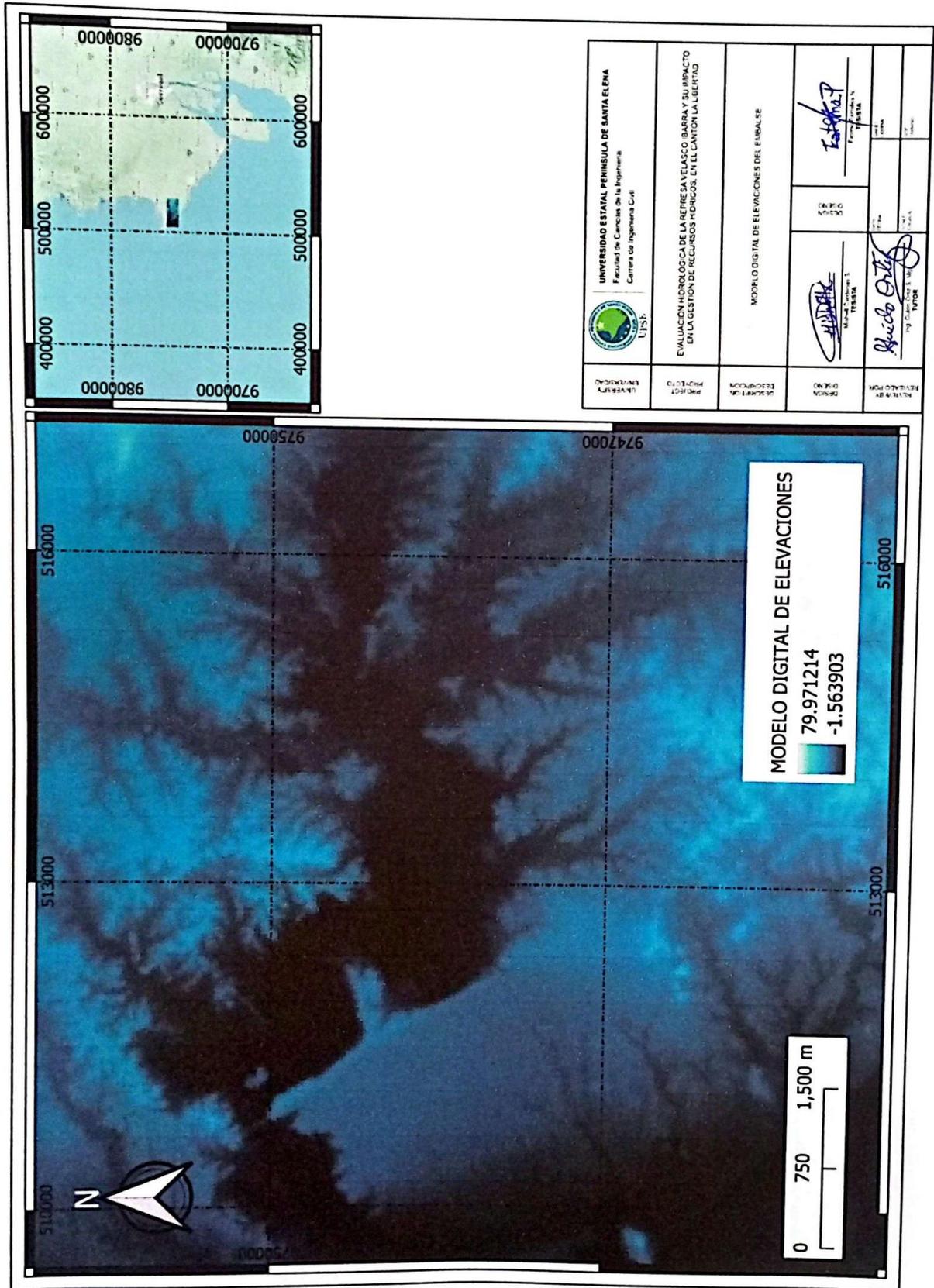


Anexo A.6. Fotografías del aliviadero durante la fase de recolección de datos

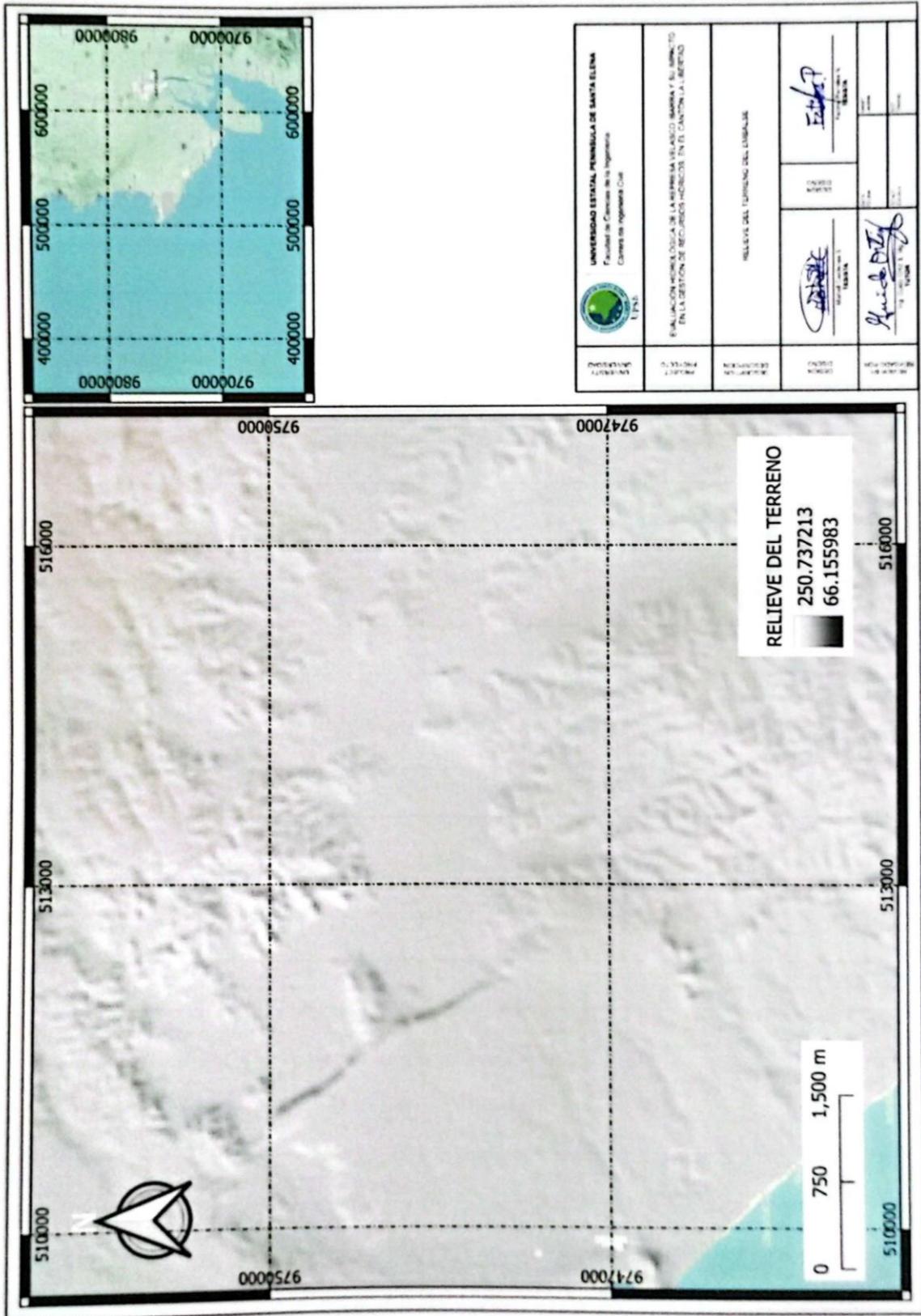


6.2. Anexos Cartográficos y SIG (QGIS)

Anexo B.1. Modelo digital de elevaciones del embalse (QGIS).

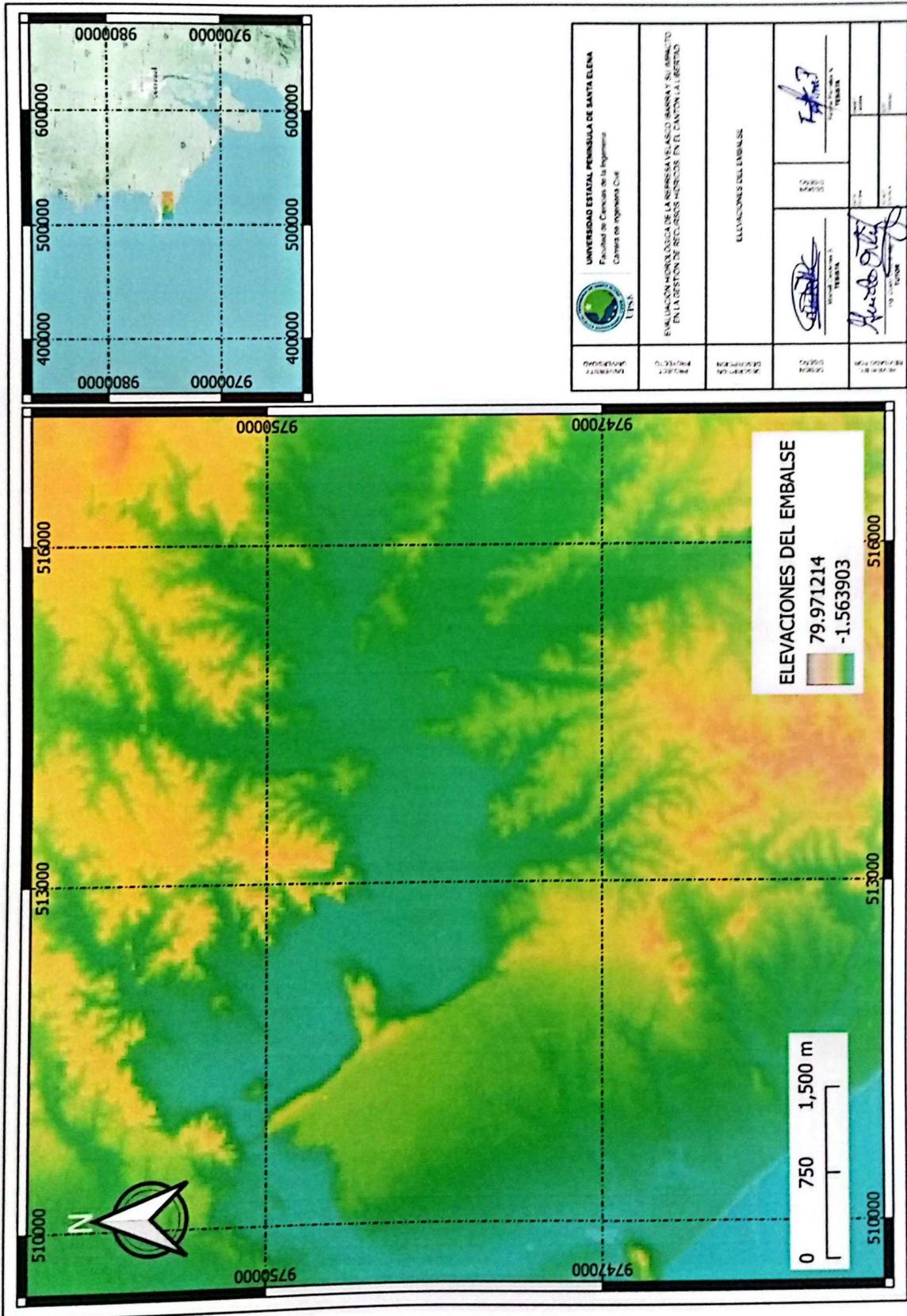


Anexo B.2. RELIEVE DEL TERRENO DEL EMBALSE

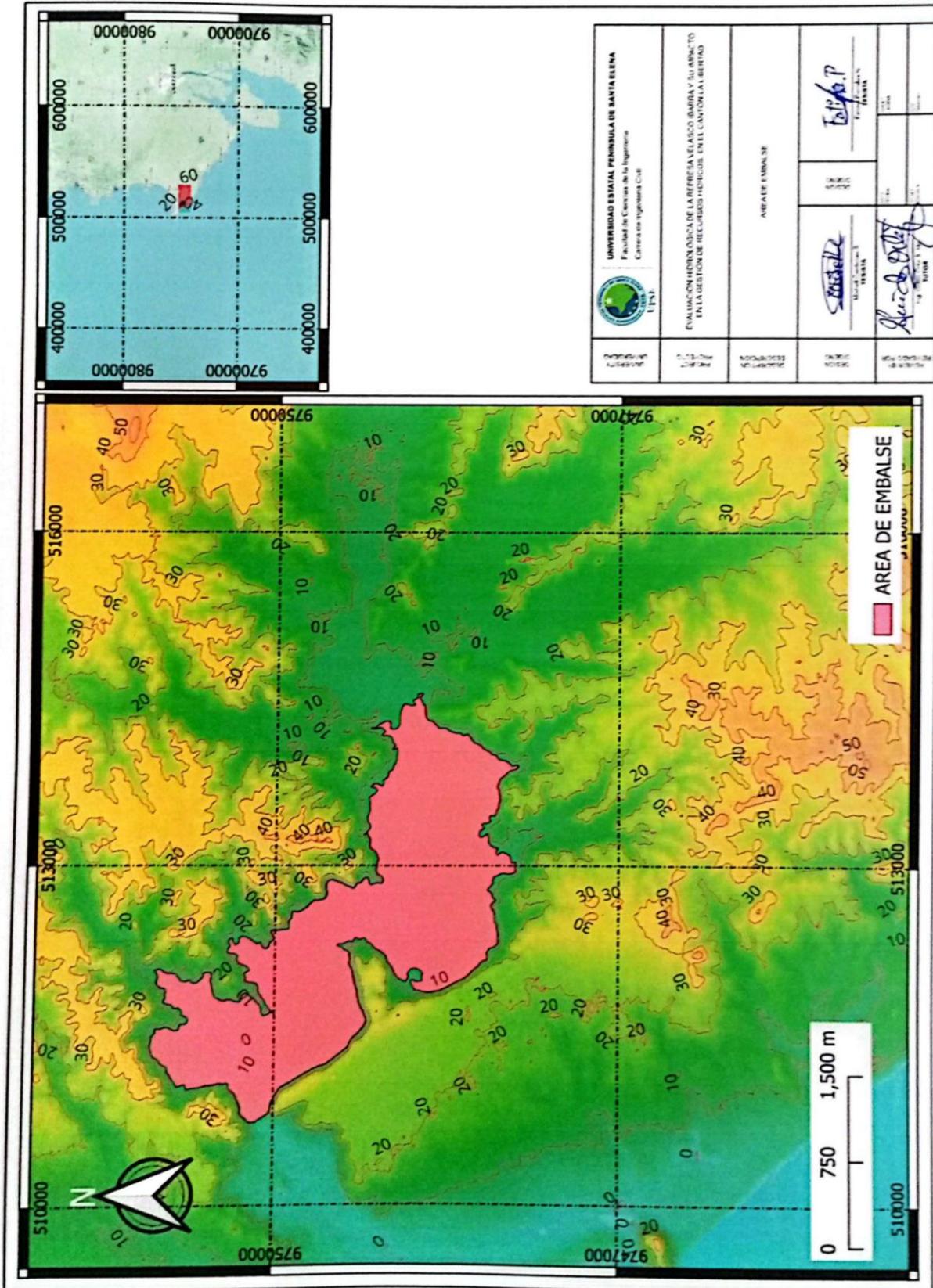


UNIVERSIDAD	 <p>UNIVERSIDAD ESTADAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA Facultad de Ciencias de la Ingeniería Centro de Ingeniería Civil</p>	PROYECTO	EVALUACION HEDROLÓGICA DE LA RED EN LA VELAZCO BARRA Y SU MUNICIPIO EN LA ZONA DE RECURSOS HÍDRICOS EN EL CANTÓN LA LINDERA	REVISOR		FECHA	
REVISOR		FECHA		AUTOR		FECHA	

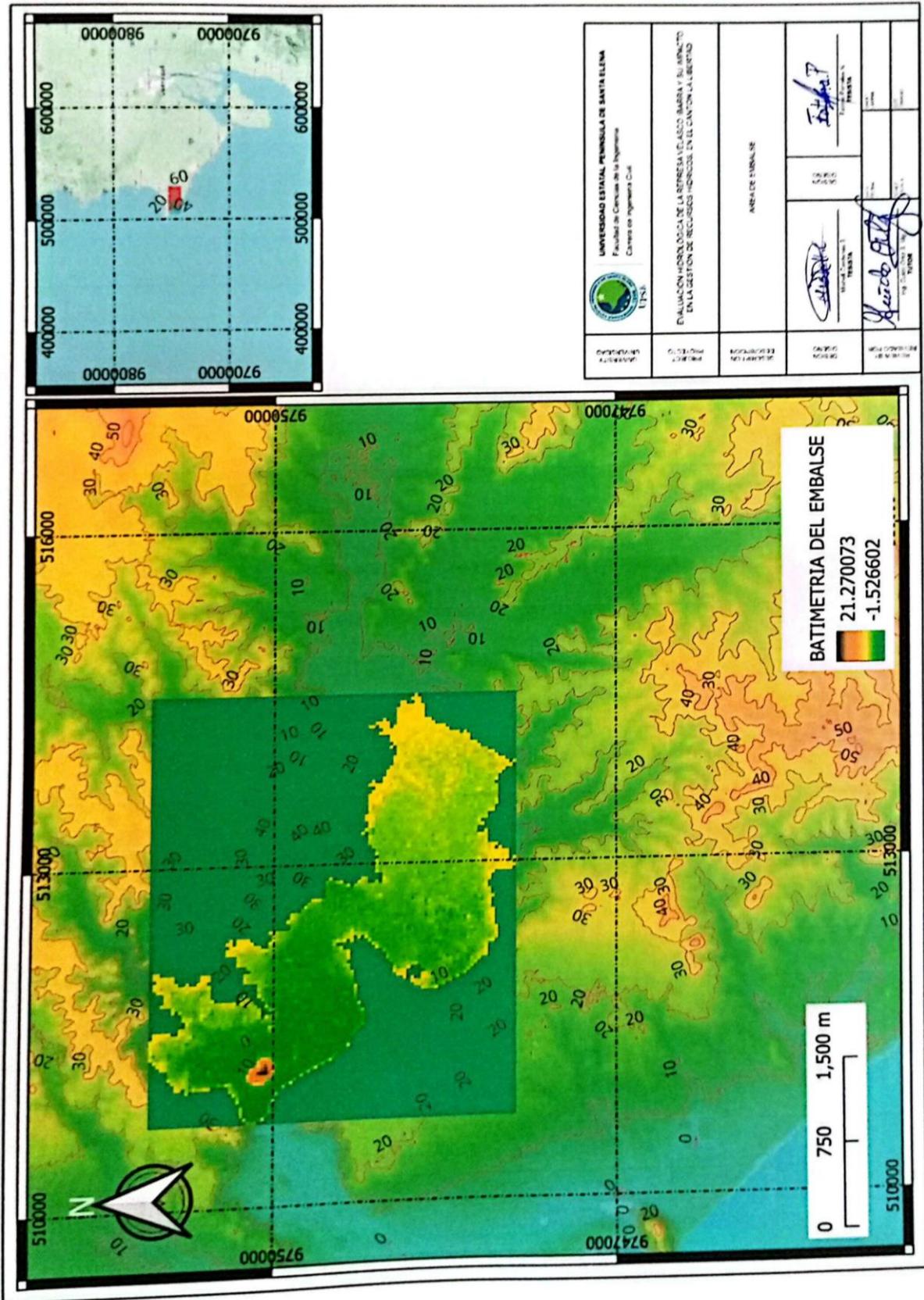
Anexo B.3.ELEVACIONES DEL EMBALSE.



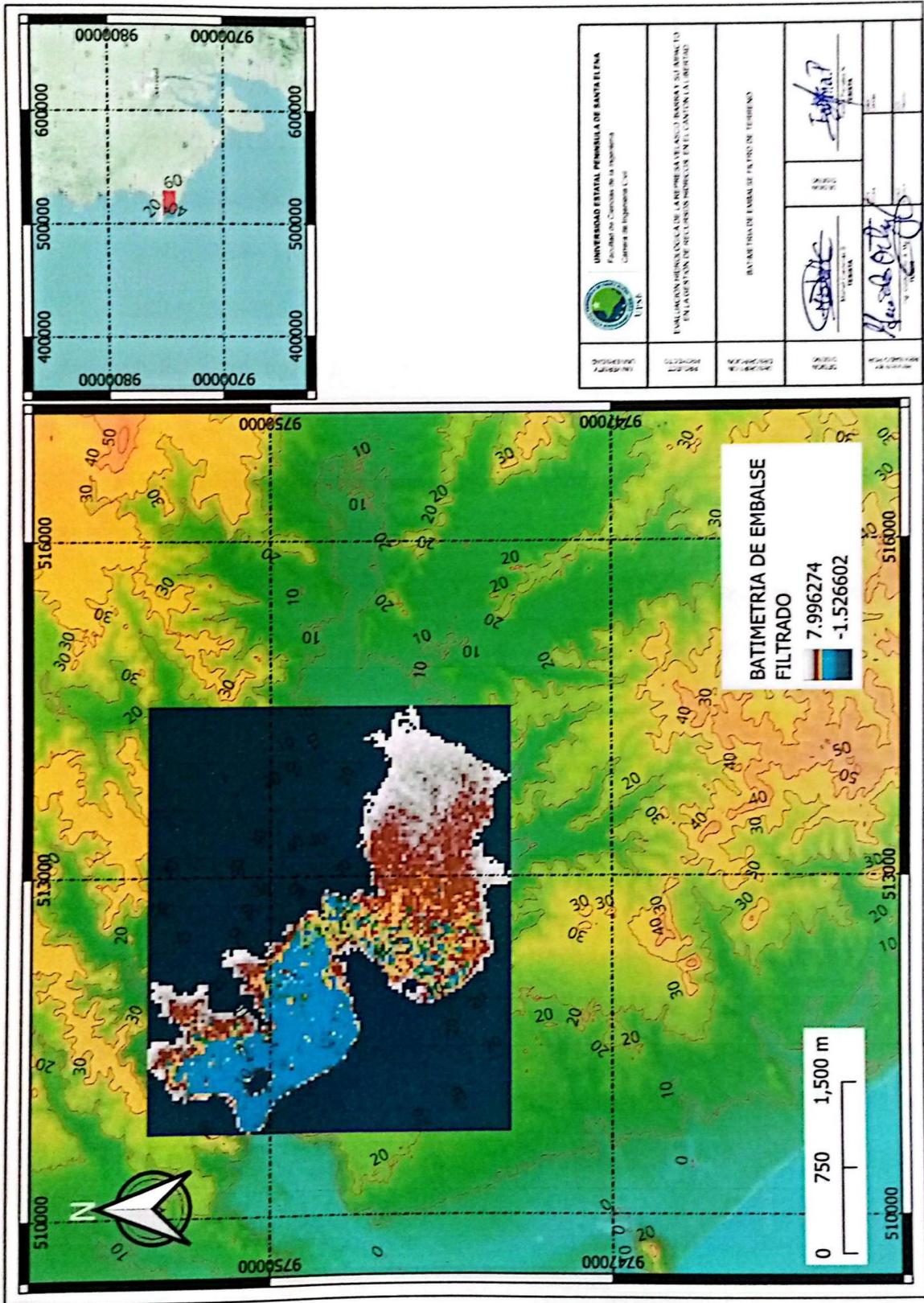
Anexo B.5. Delimitación final de la cuenca aportante en QGIS.



Anexo B.6. BATIMETRIA DEL EMBALSE



Anexo B.7. Composición False Color (vegetación) de Sentinel-2.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abu, I.-O., & Ibebuchi, C. C. (2025). Risk Assessment of the 2022 Nigerian Flood Event Using Remote Sensing Products and Climate Data. *Remote Sensing*, 17(11), 1814. <https://doi.org/10.3390/rs17111814>
- Arias-Gómez, J., Villasís-Keever, M. Á., & Miranda Novales, M. G. (2016). El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia Mexico*, 63(2), 201-206.
- Baccour, S., Ward, F. A., & Albiac, J. (2022). Climate adaptation guidance: New roles for hydroeconomic analysis. *Science of The Total Environment*, 835, 155518. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155518>
- Bandini, F., Olesen, D., Jakobsen, J., Kittel, C. M. M., Wang, S., Garcia, M., & Bauer-Gottwein, P. (2018). Technical note: Bathymetry observations of inland water bodies using a tethered single-beam sonar controlled by an unmanned aerial vehicle. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4165-4181. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4165-2018>
- Briones, E. E., Hidalgo, M. A., Gómez, J., Tirita, D., & Flachier, A. (2001). Inventario de Humedales del Ecuador. Segunda Parte: Humedales Interiores ele la Provincia del Guayas-Tomo1 (Primera). *EcoCiencia*, Fundación Ecuatoriana de Estudios Ecológicos.
- Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Péan, C. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (First). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Cao, C., Zhang, Z., Xu, Z., Chai, J., Shi, Y., & Li, N. (2025). Non-Darcy Seepage Models of Broken Rock Mass Under Changed Hydraulic and Porous Structure. *Water*, 17(11), 1676. <https://doi.org/10.3390/w17111676>
- Casal, J., & Mateu, E. (2003). TIPOS DE MUESTREO. En *Rev. Epidem. Med. Prev* (Vol. 1, pp. 3-7).
- Cauas, D. (2013). Definición de las variables, enfoque y tipo de Investigación. Investigación I.
- De La A Santos, D. L. (2019). Oportunidades del turismo de naturaleza Caso represa Velasco Ibarra, Provincia de Santa Elena. [Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <http://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/4905>
- Especificaciones Generales para la construcción de caminos y puentes (2002).
- Gabr, M. E., El Shorbagy, A. M., & Faheem, H. B. (2022). Utilizing the Harvesting of Rainwater to Provide Safe Road Transportation Efficiency and Increase Water Resources in the Context of Climatic Change. *Sustainability*, 14(15), 9656. <https://doi.org/10.3390/su14159656>
- García Ramírez, Y. (2019). Cómo redactar una tesis en Ingeniería Civil.
- García Ramírez, Y. (2021). Guía para la elaboración de planes de tesis en Ingeniería Civil (UTPL, Ed.).
- Gholizadeh, M. H., Melesse, A. M., & Reddi, L. (2016). A Comprehensive Review on Water Quality Parameters Estimation Using Remote Sensing Techniques. *Sensors* (Basel, Switzerland), 16(8), 1298. <https://doi.org/10.3390/s16081298>

- Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón La Libertad. (2022). Plan de Ordenamiento Territorial. GADM La Libertad.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Santa Elena. (2023). Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial Provincia de Santa Elena (pp. 28-32). Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Santa Elena. <https://drive.google.com/drive/folders/1Q26Zk4wf8o8KNVFpueGQXumiz2mPrZEB>
- Idhirij, S., & Ward, F. A. (2024). Policy analysis for informing climate adaptation, environmental resilience, and irrigation demands in the Rio Grande Basin. *Journal of Environmental Management*, 365, 121528. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121528>
- INAMHI. (2025). Visor de estaciones meteorológicas e hidrológicas [Software]. INAMHI. <https://inamhi.gob.ec/info/visor>
- Lis, P., Milewski, J., Shuhayeu, P., Paczucha, J., & Ryś, P. (2025). Mathematical Model of Fluid Flow Machine Unit for a Small-Scale Compressed Gas Energy Storage System. *Energies*, 18(11), 2874. <https://doi.org/10.3390/en18112874>
- Liu, S., Yang, D., Hu, H., & Wang, J. (2025). Symmetry-Entropy-Constrained Matrix Fusion for Dynamic Dam-Break Emergency Planning. *Symmetry*, 17(5), 792. <https://doi.org/10.3390/sym17050792>
- Liu, T., Si, Z., Liu, Y., Wang, L., Zhao, Y., & Wang, J. (2025). Runoff and Drought Responses to Land Use Change and CMIP6 Climate Projections. *Water*, 17(11), 1696. <https://doi.org/10.3390/w17111696>
- Lucas Chabla, D. A. (2014). Evaluación de la calidad del agua en la represa San Vicente – Colonche [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero

- Civil, Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE)].
<https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/1485>
- Manterola, C., Pineda, V., & Vial, M. (2007). ¿Cómo presentar los resultados de una investigación científica? *Revista chilena de cirugía*, 59(2).
<https://doi.org/10.4067/S0718-40262007000200014>
- Murrieta Posligua, Á. A. (2025). Caracterización hidrológica de la cuenca del río Salanguillo, cantón Santa Elena [Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Politécnica Salesiana].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/30309/1/UPS-GT006309.pdf>
- Nieto, N. E. (2018). Tipos de Investigación. *Universidad Santo Domingo de Guzmán*, 1(1), 1-4.
- Norma Ecuatoriana Vial, 63 (2013).
- Ñaupas Paitán, H. (2014). Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis.
- Office of the United Nations High Commissioner for Human Rights. (2010). The right to water [Fact Sheet]. <https://www.unwater.org/water-facts/human-rights-water-and-sanitation>
- ONU Habitat. (2019). Elementos de una vivienda adecuada. ONU Habitat por un mejor futuro urbano. <https://onuhabitat.org.mx/index.php/elementos-de-una-vivienda-adecuada>
- Ponce, V. M. (2018). DRENAJE DE CARRETERAS.
https://ponce.sdsu.edu/drenaje_de_carreteras_c.html
- Pradhan, A., Sao, A., Thakur, T. K., Anderson, J. T., Chandel, G., Kumar, A., Paramesh, V., Jinger, D., & Kumar, R. (2025). Wetlands as Climate-Sensitive Hotspots:

- Evaluating Greenhouse Gas Emissions in Southern Chhattisgarh. *Water*, 17(10), 1553. <https://doi.org/10.3390/w17101553>
- Quinaluisa Morán, C. O., Peralta Fonseca, K. V., Solano Apuntes, A. P., Gallo Sevillano, A. G., Villalva Bravo, Á. J., & Zambrano Gavilanes, F. E. (2019). Energía hídrica en el Ecuador. *Ciencia Digital*, 3(2.6), 219-237. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i2.6.560>
- Ramos-Galarza, C. (2021). Editorial: Diseños de investigación experimental. *CienciAmérica*, 10(1), 1-7. <https://doi.org/10.33210/ca.v10i1.356>
- Rodríguez Jiménez, A., & Pérez Jacinto, A. O. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 82, 175-195. <https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647>
- Rodríguez Santos, J. E. (2022). Evaluación de la presa multipropósito el azúcar provincia de Santa Elena—Ecuador [Trabajo de fin de Máster en Hidráulica, Universidad de Guayaquil]. <https://repositorio.ug.edu.ec/items/c14e68a4-9571-4087-aa55-d7e9ca46208b>
- Sanchez Carlessi, H., & Reyes Meza, C. (2015). Metodología y diseños en la investigación científica. Biblioteca Nacional del Peru.
- Szatten, D., Łaszycza, E. Z., Bosino, A., De Amicis, M., & Obodovskyi, O. (2025). Impact of Climate Conditions on the Sensitivity of Long-Term Annual River Flow in a Cascade-Dammed River System: The Brda River Case Study (Poland). *Geosciences*, 15(6), 197. <https://doi.org/10.3390/geosciences15060197>
- Tejero González, J. M. (2021). Técnicas de investigación cualitativa en los ámbitos sanitario y sociosanitario (J. M. Tejero González, Ed.). Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha. https://doi.org/10.18239/estudios_2021.171.00

- Tena-Parera, D. (2023). Investigación a la publicación. *Questiones publicitarias*, 6(32), 33-40. <https://doi.org/10.5565/rev/qp.395>
- UNESCO. (2019). Water as a Human Right. <https://en.unesco.org/themes/water-security/human-right-water>
- United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2023). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial. United Nations.
- Ward, F. A. (2023). Integrating water science, economics, and policy for future climate adaptation. *Journal of Environmental Management*, 325(Pt B), 116574. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116574>
- World Meteorological Association. (2025). State of the Global Climate 2024. World Meteorological Association. https://policycommons.net/artifacts/2434625/1290_statement_2021_en/3456217/
- Zhong, M., Li, X., Wang, J., Zhuo, L., & Ling, F. (2025). Cascading Landslide–Barrier Dam–Outburst Flood Hazard: A Systematic Study Using Rockfall Analyst and HEC-RAS. *Remote Sensing*, 17(11), 1842. <https://doi.org/10.3390/rs17111842>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
 - Brunner, G. W. (2021). *HEC-RAS River Analysis System, User's Manual Version 6.0*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (HEC).
 - Döll, P., Trautmann, T., & Gerten, D. (2020). "Risk of Water Scarcity under Climate Change: The Role of Modeling". *WIREs Water*, 7(2), e1418.
 - QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System: User Guide*. Open Source Geospatial Foundation Project.

- Wilson, J. P., & Gallant, J. C. (2000). *Terrain Analysis: Principles and Applications*. John Wiley & Sons.
- IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report – Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.
- Tarboton, D. G. (2003). *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)*. Utah State University.
- Álvarez, J., & López, R. (2019). “Evaluación de cuencas hidrográficas mediante SIG y análisis morfométrico en QGIS”. *Revista Colombiana de Geografía*, 28(2), 45-58.
- NASA POWER Project. (2023). *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resource (POWER) Data Access Viewer*. NASA Langley Research Center.
- Ojha, C. S. P., Berndtsson, R., & Bhunya, P. K. (2008). *Engineering Hydrology*. Oxford University Press.
- Rodríguez, D., & Zambrano, L. (2022). "Aplicación del método racional modificado en el diseño de infraestructura hidráulica urbana". *Ingeniería del Agua*, 26(3), 223-235.
- FAO. (2011). *Evaluación del uso de la tierra y cobertura vegetal para manejo hídrico*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Strahler, A. N. (1952). “Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography”. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117-1142.
- Hijmans, R. J., & van Etten, J. (2022). *Raster: Geographic Data Analysis and Modeling (R package)*. University of California.
- Fernández, D., & Gómez, J. (2021). “Simulación hidráulica de aliviaderos utilizando HEC-RAS 2D”. *Revista de Ingeniería Civil y Ambiental*, 7(1), 101-112.

