

UNIVERSIDAD DE HUANUCO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

“Mejoramiento del diseño hidráulico y cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando el lecho del río Huamuco para incrementar la seguridad y eficiencia de infraestructuras hidráulicas, 2025”

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTOR: Atencio Vilca, Ailton Rai

ASESOR: Taboada Trujillo, William Paolo

HUÁNUCO – PERÚ

2025

U

D

H



UDH
UNIVERSIDAD DE HUANCAYO
<http://www.udh.edu.pe>

TIPO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

- Tesis (X)
- Trabajo de Suficiencia Profesional ()
- Trabajo de Investigación ()
- Trabajo Académico ()

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Hidráulica
AÑO DE LA LÍNEA DE INVESTIGACIÓN (2020)

CAMPO DE CONOCIMIENTO OCDE:

Área: Ingeniería, Tecnología

Sub área: Ingeniería civil

Disciplina: Ingeniería civil

DATOS DEL PROGRAMA:

Nombre del Grado/Título a recibir: Título

Profesional de Ingeniero Civil

Código del Programa: P07

Tipo de Financiamiento:

- Propio (X)
- UDH ()
- Fondos Concursables ()

DATOS DEL AUTOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 73241532

DATOS DEL ASESOR:

Documento Nacional de Identidad (DNI): 40847625

Grado/Título: Doctor en medio ambiente y desarrollo sostenible

Código ORCID: 0000-0002-4594-1491

DATOS DE LOS JURADOS:

Nº	APELLIDOS Y NOMBRES	GRADO	DNI	Código ORCID
1	Trujillo Ariza, Yelen Liseth	Maestro en medio ambiente y desarrollo sostenible, mención en gestión ambiental	70502371	0000- 0002- 5650- 3745
2	Arteaga Espinoza, Ingrid Delia Dignarda	Máster en dirección de proyectos	73645168	0009- 0001- 0745- 5433
3	Aguilar Alcantara, Leonel Marlo	Maestro en ingeniería civil con mención en dirección de empresas de la construcción	43415813	0000- 0002- 0877- 5922



UDH
UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
<http://www.udh.edu.pe>

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

Facultad de Ingeniería

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO(A) CIVIL

En la ciudad de Huánuco, siendo las 18:00 horas del día lunes 03 de noviembre de 2025, en cumplimiento de lo señalado en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco, se reunieron los Jurados Calificadores integrado por los docentes:

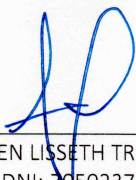
❖ MG. YELEN LISSETH TRUJILLO ARIZA	PRESIDENTE
❖ MG. INGRID DELIA DIGNARDA ARTEAGA ESPINOZA	SECRETARIA
❖ MG. LEONEL MARLO AGUILAR ALCANTARA	VOCAL

Nombrados mediante la RESOLUCIÓN No 2278-2025-D-FI-UDH para evaluar la Tesis intitulada: "MEJORAMIENTO DEL DISEÑO HIDRÁULICO Y CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS CONSIDERANDO EL LECHO DEL RÍO HUAMUCO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD Y EFICIENCIA DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS, 2025", presentado por el (la) Bachiller. Bach Ailton Rai ATENCIO VILCA, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Civil.

Dicho acto de sustentación se desarrolló en dos etapas: exposición y absolución de preguntas: procediéndose luego a la evaluación por parte de los miembros del Jurado.

Habiendo absuelto las objeciones que le fueron formuladas por los miembros del Jurado y de conformidad con las respectivas disposiciones reglamentarias, procedieron a deliberar y calificar, declarándolo(a) **APROBADO** por **UNANIMIDAD** con el calificativo cuantitativo de **15** y cualitativo de **BUENO** (Art. 47).

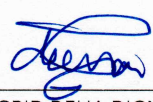
Siendo las **07:00pm** horas del día 03 del mes de noviembre del año 2025, los miembros del Jurado Calificador firman la presente Acta en señal de conformidad.


MG. YELEN LISSETH TRUJILLO ARIZA

DNI: 70502371

ORCID: 0000-0002-5650-3745

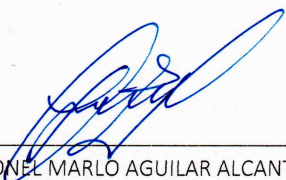
PRESIDENTE


MG. INGRID DELIA DIGNARDA ARTEAGA ESPINOZA

DNI: 73645168

ORCID: 0009-0001-0745-5433

SECRETARIO (A)


MG. LEONEL MARLO AGUILAR ALCANTARA

DNI: 43415813

ORCID: 0000-0002-0877-5922

VOCAL



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD

El comité de integridad científica, realizó la revisión del trabajo de investigación del estudiante: AILTON RAI ATENCIO VILCA, de la investigación titulada "MEJORAMIENTO DEL DISEÑO HIDRÁULICO Y CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS CONSIDERANDO EL LECHO DEL RÍO HUAMUCO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD Y EFICIENCIA DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS, 2025", con asesor(a) WILLIAM PAOLO TABOADA TRUJILLO, designado(a) mediante documento: RESOLUCIÓN N° 2149-2024-D-FI-UDH del P. A. de INGENIERÍA CIVIL.

Puede constar que la misma tiene un índice de similitud del 12 % verificable en el reporte final del análisis de originalidad mediante el Software Turnitin.

Por lo que concluyo que cada una de las coincidencias detectadas no constituyen plagio y cumple con todas las normas de la Universidad de Huánuco.

Se expide la presente, a solicitud del interesado para los fines que estime conveniente.

Huánuco, 16 de septiembre de 2025



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

137. ATENCIO VILCA AILTON RAI.docx

INFORME DE ORIGINALIDAD

12%	12%	2%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.udh.edu.pe	3%
	Fuente de Internet	
2	hdl.handle.net	2%
	Fuente de Internet	
3	repositorio.unach.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
4	repositorio.unsch.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
5	distancia.udh.edu.pe	1%
	Fuente de Internet	
6	vdocumento.com	<1%
	Fuente de Internet	



RICHARD J. SOLIS TOLEDO
D.N.I.: 47074047
cod. ORCID: 0000-0002-7629-6421



MANUEL E. ALIAGA VIDURIZAGA
D.N.I.: 71345687
cod. ORCID: 0009-0004-1375-5004

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a quienes han sido mi pilar en cada etapa de este camino.

A mis padres, por su amor incondicional, por enseñarme el valor del esfuerzo y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Sin su apoyo constante, este logro no habría sido posible y además incentivarme a estudiar para ser profesionales honorables y de respeto en esta vida

A mis hermanos, por ser mi ejemplo, mi compañía y mi refugio en los días de incertidumbre.

A mis amigos, por su paciencia, por escucharme cuando más lo necesitaba y por acompañarme con una sonrisa incluso en los días más duros.

Y a mí mismo(a), por no rendirme, por levantarme cada vez que caí, y por confiar en que todo esfuerzo tiene su recompensa.

Gracias a todos por ser parte de este logro.

AGRADECIMIENTO

El principal agradecimiento a Dios quien me ha guiado y me ha dado la fortaleza para seguir adelante.

A los docentes de la escuela académico profesional de ingeniería civil y a algunos amigos, quienes estuvieron pendientes del avance del trabajo, con su motivación y apoyo hicieron posible mantenerme firme hasta culminar esta tesis.

A la Decana de la facultad de ingeniería Campos Rios, Bertha Lucila por todas las enseñanzas y guiarnos a todos los estudiantes de la facultad.

Al coordinador Jara Trujillo, Alberto Carlos por apoyarme moralmente y darme aliento a seguir investigando sobre mi tema de investigación.

A mi asesor de tesis el Mg. Taboada Trujillo, William Paolo por la orientación y ayuda que me brindo para la realización de este trabajo de investigación.

ÍNDICE

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN	XII
CAPÍTULO I	13
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	13
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	13
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.2.1 PROBLEMA GENERAL	14
1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO	14
1.3 OBJETIVO GENERAL	15
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	15
1.5.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	16
1.5.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	16
1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN	17
CAPÍTULO II	18
MARCO TEÓRICO	18
2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES	18
2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES	18
2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES	21
2.2 BASES TEÓRICAS	23
2.2.1 INTRODUCCIÓN A LA SOCAVACIÓN	23
2.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA SOCAVACIÓN	25

2.2.3 TEORÍAS Y MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LA SOCACACIÓN.....	29
2.2.4 CUENCA HIDROGRÁFICA	33
2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES.....	36
2.4 HIPÓTESIS	38
2.5 VARIABLES	38
2.5.1 VARIABLE 1	38
2.5.2 VARIABLE 2	38
2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES (DIMENSIONES E INDICADORES)	39
CAPÍTULO III.....	40
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	40
3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	40
3.1.1 ENFOQUE	40
3.1.2 ALCANCE O NIVEL.....	40
3.1.3 DISEÑO	41
3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	41
3.2.1 POBLACIÓN.....	41
3.2.2 MUESTRA	41
3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	42
3.3.1 PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS	42
3.3.2 PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS	43
3.3.3 PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS .	44
CAPÍTULO IV.....	46
RESULTADOS.....	46
4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS.....	46
4.1.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA.....	46
4.1.2 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA	55
4.1.3 MODELOS DE SOCACACIÓN APLICADOS.....	62
4.1.4 PLANTEAMIENTO DE MEJORA HIDRÁULICA	65
4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS ...	67
CAPÍTULO V.....	72
DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	72
CONCLUSIONES	75

RECOMENDACIONES.....	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
ANEXOS.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables	39
Tabla 2 Instrumentos de recolección de datos	43
Tabla 3 Parámetros geomorfológicos de la cuenca	49
Tabla 4 Parámetros de forma	51
Tabla 5 Tipos de cobertura vegetal en la cuenca	53
Tabla 6 Estimación de número de curva promedio	54
Tabla 7 Registro de precipitaciones estación Tulumayo	56
Tabla 8 Prueba de bondad de ajuste	58
Tabla 9 Valores de precipitación en diferentes periodos de retorno	58
Tabla 10 Socavación por diferentes metodologías	64
Tabla 11 Parámetros hidráulicos considerados	65
Tabla 12 Estimación del enrocado	65
Tabla 13 Estimación del enrocado	67
Tabla 14 Parámetros de forma	68
Tabla 15 Socavación por diferentes metodologías	69
Tabla 16 Socavación por diferentes metodologías	70
Tabla 17 Matriz de Consistencia	83
Tabla 18 Clasificación de alturas	86
Tabla 19 Clasificación de red hídrica	86
Tabla 20 Clasificación de pendiente de cuenca	86
Tabla 21 Modelo de valores IDF	90
Tabla 22 Tormenta de diseño PR 100 años	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Socavación en puentes.....	23
Figura 2 Régimen de flujo	26
Figura 3 Cálculo de la pendiente máxima del cauce.....	27
Figura 4 Erosión de pilares y estribos en puentes	28
Figura 5 Obras de encausamiento.....	29
Figura 6 Partes de una cuenca hidrográfica	33
Figura 7 Problemática de la zona de estudio.....	42
Figura 8 Delimitación de cuenca.....	46
Figura 9 Clasificación de alturas	47
Figura 10 Curva Hipsométrica y polígono de alturas	47
Figura 11 Caracterización de pendientes	48
Figura 12 Reclasificación de pendientes	48
Figura 13 Caracterización de la red hídrica	49
Figura 14 Cobertura vegetal de la cuenca	52
Figura 15 Número de curva de cuenca.....	54
Figura 16 Identificación de las estaciones meteorológicas	55
Figura 17 Prueba de consistencia.....	57
Figura 18 Análisis de Distribución Log-Gumbel	57
Figura 19 Modelo de curva IDF para cuenca.....	59
Figura 20 Hietograma de diseño PR 100 años	59
Figura 21 Modelo Hec-HMS PR 100 años.....	60
Figura 22 Modelo topográfico de la zona de interés	60
Figura 23 Modelo hidráulico HEC-RAS.....	61
Figura 24 Resultado de simulación – Tirantes.....	61
Figura 25 Modelo de velocidades HEC-RAS	62
Figura 26 Modelamiento HEC-RAS para la socavación	62
Figura 27 Modelo de velocidad de flujo	63
Figura 28 Resultados socavación modelo HEC-RAS	64
Figura 29 Esquema de modelo de enrocado	66
Figura 30 Esquema de modelo de enrocado	70
Figura 31 Ubicación de área de investigación	85
Figura 32 Distribución Normal.....	87

Figura 33 Distribución Log-Normal 2P	87
Figura 34 Distribución Log-Normal 3P	88
Figura 35 Distribución Gamma 2P	88
Figura 36 Distribución Gamma 3P	89
Figura 37 Distribución Gumbel.....	89

RESUMEN

El presente estudio titulado “Mejoramiento del diseño hidráulico y cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando el lecho del río Huamuco para incrementar la seguridad y eficiencia de infraestructuras hidráulicas” tiene como finalidad analizar y proponer una metodología optimizada para calcular con mayor precisión la socavación en estribos de puentes. La socavación es uno de los principales mecanismos de falla en puentes, y su profundidad depende de diversos factores, como las características geomorfológicas del cauce, el tipo de sedimento, la velocidad del flujo y la forma de las estructuras. El estudio parte de la identificación de deficiencias en los métodos tradicionales aplicados al contexto local, como el uso generalizado de fórmulas empíricas sin adecuación a las particularidades del lecho del río Huánuco. Para ello, se realizó un análisis hidrológico, geomorfológico y hidráulico de la cuenca, aplicando software especializado como HEC-HMS y HEC-RAS, que permitió simular escenarios de flujo y evaluar el impacto de distintas condiciones sobre la socavación. Asimismo, se propuso una nueva fórmula de cálculo ponderado, basada en los resultados obtenidos por modelaciones, observaciones de campo y ensayos de laboratorio. Los resultados muestran que cuando el diseño hidráulico se adapta a las condiciones propias del lugar, se logra una mejora importante tanto en la seguridad estructural como en la eficiencia hidráulica de los puentes, lo que además permite optimizar los costos de mantenimiento. La investigación destaca la necesidad de adaptar herramientas y metodologías a las características hidrosedimentológicas del entorno para reducir los riesgos por fallas estructurales.

Palabras clave: socavación, diseño hidráulico, lecho fluvial, estribos, infraestructura hidráulica.

ABSTRACT

The present study titled “Improvement of Hydraulic Design and Scour Depth Calculation in Abutments Considering the Huamuco Riverbed to Increase the Safety and Efficiency of Hydraulic Infrastructures” aims to analyze and propose an optimized methodology to accurately calculate scour at bridge abutments. Scour is one of the main failure mechanisms in bridges, and its depth depends on various factors, such as the geomorphological characteristics of the riverbed, sediment type, flow velocity, and structural configuration. This study identifies deficiencies in traditional methods commonly used without proper adaptation to local conditions, especially empirical formulas. A comprehensive hydrological, geomorphological, and hydraulic analysis of the Huamuco River basin was conducted, applying specialized software such as HEC-HMS and HEC-RAS to simulate flow scenarios and evaluate scour behavior under varying conditions. Furthermore, a new weighted calculation formula was proposed, supported by results from numerical modeling, field observations, and laboratory tests. The results show that when the hydraulic design is adapted to the specific conditions of the site, a significant improvement is achieved in both the structural safety and hydraulic efficiency of bridges, which also allows for optimization of maintenance costs. This research underscores the importance of adapting analytical tools and methodologies to local hydrosedimentary conditions to mitigate the risk of infrastructure failure.

Keywords: scour, hydraulic design, riverbed, abutments, hydraulic infrastructure.

INTRODUCCIÓN

La socavación en estribos constituye una de las principales amenazas para la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas, especialmente en puentes ubicados sobre ríos con alto grado de variabilidad hidrológica y morfológica. En el Perú, numerosos casos de colapso estructural se han atribuido a un inadecuado análisis de las condiciones del cauce, en especial a la omisión de variables locales como la granulometría, pendiente y régimen de flujo, que influyen directamente en la capacidad erosiva del agua. Esta situación se vuelve más crítica en regiones como Huánuco, donde los eventos hidrometeorológicos extremos asociados al cambio climático aumentan los caudales y la energía del flujo, lo que origina procesos de socavación más severos.

El objetivo de este trabajo de investigación es mejorar el diseño hidráulico y optimizar la estimación de la profundidad de socavación en estribos, tomando en cuenta las particularidades del lecho del río Huamuco. Para ello, se plantea una metodología que abarca la caracterización morfológica e hidráulica de la cuenca, la aplicación de modelos numéricos como HEC-HMS y HEC-RAS, y la formulación de una ecuación de cálculo ponderado que considere las condiciones reales del entorno fluvial. Con un enfoque cuantitativo y un nivel descriptivo, la investigación busca detallar las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco, con el fin de comprender cómo estas influyen en los procesos de socavación que afectan a los estribos de las infraestructuras hidráulicas, a fin de reforzar la seguridad estructural y la eficiencia hidráulica de los puentes existentes y de los que se construyan en el futuro. Los resultados obtenidos servirán para orientar el diseño de medidas de mitigación más efectivas, reduciendo de manera considerable los riesgos estructurales, económicos y sociales asociados a este fenómeno, y aportando herramientas técnicas aplicables en futuros proyectos de infraestructura hidráulica en zonas vulnerables.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La socavación en estribos es un fenómeno de gran relevancia en la ingeniería hidráulica, pues constituye una de las principales causas de falla en puentes y en otras obras fluviales. A nivel internacional, diferentes estudios han demostrado que un diseño inadecuado de estructuras en ríos puede ocasionar consecuencias graves, que van desde colapsos parciales hasta la pérdida total de infraestructuras críticas. De acuerdo con Melville y Coleman (2000), alrededor del 60 % de las fallas en puentes en los Estados Unidos se han debido a la socavación en estribos, lo que resalta la importancia de contar con metodologías más confiables para calcular su profundidad y definir medidas de mitigación. La ausencia de modelos hidráulicos ajustados a las condiciones particulares de los ríos ha originado discrepancias en las estimaciones de socavación, incrementando con ello los riesgos estructurales y económicos en los proyectos.

En el contexto nacional, la socavación también ha sido un factor determinante en la vulnerabilidad de la infraestructura vial y fluvial. En el Perú, fenómenos extremos como El Niño han intensificado los procesos de erosión y socavación en diversos ríos, comprometiendo la estabilidad de puentes y carreteras. Estudios realizados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) han evidenciado que la variabilidad de los caudales y las características morfológicas de los ríos peruanos requieren modelos de cálculo que se adapten a la heterogeneidad de los lechos y de los materiales transportados. La falta de adecuación de los métodos tradicionales de estimación ha derivado en estructuras con deficiencias de diseño, generando daños significativos y altos costos de mantenimiento y reparación (Autoridad Nacional del Agua, 2019).

En el ámbito local, el río Huamuco presenta condiciones particulares que incrementan el riesgo de socavación en las obras hidráulicas. La variabilidad de sus caudales, la presencia de sedimentos con granulometría diversa y la geomorfología de su lecho son factores que contribuyen directamente a la erosión en los estribos de puentes y de otras estructuras. Según un informe

técnico del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2020), las estructuras ubicadas en zonas de alta variabilidad hidráulica en el río Huamuco están expuestas a mayores riesgos de socavación, lo que pone en peligro la integridad de los puentes y caminos (Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2020).

Causa Fundamental de la Socavación en el Diseño Hidráulico

La socavación en estribos y pilas de puentes es principalmente causada por la alteración del flujo hidráulico alrededor de estas estructuras. Cuando el agua encuentra un obstáculo, como un estribo, se generan turbulencias y vórtices que incrementan la capacidad erosiva del flujo, removiendo material del lecho y provocando cavidades alrededor de la estructura. Este fenómeno se intensifica cuando el lecho del río está compuesto por materiales no cohesivos, como arenas y gravas, que son fácilmente desplazables por la acción del agua. Como se describe en el estudio de Zhuang et al. (2015), la velocidad del flujo y la forma de la estructura son determinantes cruciales en el grado de socavación experimentado (Zhuang, Li, & Liu, 2015).

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PROBLEMA GENERAL

¿Cómo se puede mejorar el diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco para fortalecer la seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas?

1.2.2 PROBLEMA ESPECÍFICO

¿De qué manera las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco influyen en la profundidad de socavación en estribos?

¿Cómo se puede desarrollar un método mejorado para el cálculo de la profundidad de socavación en estribos, incorporando variables representativas del comportamiento del lecho del río Huamuco?

¿Qué tipo de solución hidráulica optimizada puede reducir los efectos de la socavación en estribos y mejorar la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco?

¿Cómo se puede formular un nuevo cálculo preponderado de acuerdo a las características y propiedades que considere cada método aplicado para la estimación de la socavación?

1.3 OBJETIVO GENERAL

Mejorar el diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación en estribos, considerando las características del lecho del río Huamuco, para aumentar la seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analizar las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco para determinar su influencia en la profundidad de socavación en estribos.

Desarrollar un método mejorado para el cálculo de la profundidad de socavación en estribos, incorporando variables representativas del comportamiento del lecho del río Huamuco.

Diseñar una solución hidráulica optimizada que reduzca los efectos de la socavación en estribos y mejore la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco.

Proponer una nueva fórmula de cálculo preponderado de acuerdo a las características y propiedades que considere cada método aplicado para la estimación de la socavación.

1.5 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

En esta investigación se desarrollará un enfoque teórico que permitirá identificar el método óptimo para calcular la profundidad de socavación general y en estribos, considerando las características específicas del lecho del río Huamuco. Se emplearán métodos convencionales y avanzados de cálculo hidráulico, como HEC HMS, y se evaluará su posición en función de los parámetros geomorfológicos y sedimentológicos del río. Se estudiarán las dinámicas fluviales mediante la recopilación de información hidrológica y geotécnica local, lo que permitirá ajustar los modelos predictivos a las condiciones reales del río. Del mismo modo, se realizarán simulaciones numéricas para comparar las diferentes metodologías disponibles, con el fin de identificar aquel modelo que represente con mayor precisión los procesos de socavación

y reduzca los riesgos estructurales en puentes y estribos. Finalmente, se propondrá una nueva fórmula de cálculo ponderado, considerando las características y propiedades de cada método aplicado para la estimación de la socavación. Este estudio aportará una base teórica sólida para mejorar la seguridad y la durabilidad de las infraestructuras hidráulicas, contribuyendo al diseño y al mantenimiento eficiente de las obras en la región de Huánuco. Asimismo, se espera que los resultados permitan optimizar los costos de mantenimiento de infraestructuras afectadas por la socavación, favoreciendo una mejor gestión de recursos en zonas vulnerables al cambio climático y a la erosión fluvial.

1.5.2 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

Esta investigación permitirá, en el futuro, determinar el método más adecuado para calcular la profundidad de socavación general y en estribos en el río Huamuco, lo que fortalecerá la seguridad y durabilidad de las infraestructuras viales de la región. Una mayor precisión en los cálculos reducirá el riesgo de fallas estructurales en puentes y estribos, evitando colapsos y disminuyendo los costos de mantenimiento por reparaciones frecuentes. Además, los resultados apoyarán la planificación de obras de protección y mitigación, lo que incrementará la eficiencia en la gestión de los recursos hídricos y de la infraestructura pública. En un contexto de variabilidad climática y caudales extremos, esta investigación se convierte en una herramienta clave para optimizar el diseño y la construcción de estructuras hidráulicas, asegurando su estabilidad en el tiempo. De igual forma, este estudio podrá servir como referencia en futuros proyectos desarrollados en cuencas con características similares, promoviendo un enfoque más adecuado en la ingeniería civil para zonas con alta susceptibilidad a la socavación.

1.5.3 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

La metodología se justifica en la necesidad de identificar un método de cálculo de socavación que se adapte a las condiciones propias del río Huamuco. Para ello, se realizará un análisis comparativo entre los métodos tradicionales, como HEC-HMS, Laursen y Toffaleti, complementados con técnicas avanzadas de modelación hidrodinámica que permitan evaluar su precisión en condiciones locales. Se emplearán

datos batimétricos, hidrológicos y sedimentológicos obtenidos a través de trabajo de campo y monitoreo en tiempo real, que servirán para la calibración y validación de los modelos. Además, se desarrollarán simulaciones numéricas bajo distintos escenarios de caudal con el objetivo de analizar el comportamiento erosivo del lecho del río y su efecto en los estribos de los puentes. Los resultados se contrastarán con mediciones empíricas, lo que permitirá determinar la confiabilidad de cada método. De esta manera, será posible proponer un procedimiento óptimo que represente con mayor exactitud las condiciones del río Huamuco, aportando a la seguridad y durabilidad de las infraestructuras viales, al mismo tiempo que se minimizan riesgos de fallas estructurales y se reducen los costos de mantenimiento a largo plazo.

1.6 LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Las limitaciones estarán relacionadas con la disponibilidad y exactitud de los datos batimétricos, hidrológicos y sedimentológicos del río Huamuco, así como con la variación estacional de los caudales, que puede afectar la recolección y representatividad de la información de campo. Del mismo modo, la calibración y validación de los modelos dependerá del acceso a herramientas computacionales avanzadas y de la calidad de los equipos de monitoreo en tiempo real. Otro aspecto a considerar será la adaptación de métodos internacionales a las condiciones locales, que podría presentar dificultades debido a las características geológicas propias del lecho del río.

1.7 VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

La viabilidad de este estudio estará respaldada por el acceso a tecnología avanzada de modelación hidrodinámica, equipos de monitoreo en campo y registros hidrológicos previos del río Huamuco. El proyecto contará con el apoyo de instituciones locales y recursos técnicos que facilitarán la recopilación de información y el desarrollo de simulaciones numéricas. A ello se suma la experiencia del equipo de investigación en estudios hidráulicos y sedimentológicos, lo que permitirá un análisis detallado. La infraestructura disponible y la colaboración con entidades gubernamentales asegurarán la correcta implementación de los métodos propuestos, garantizando el cumplimiento de los objetivos planteados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1 ANTECEDENTES INTERNACIONALES

Andrade (2023) en su tesis titulada “Evaluación de la socavación en el puente de la calle 10 de agosto - Azogues, Ecuador”, tuvo como objetivo principal analizar la magnitud y las características del fenómeno de socavación en dicho puente, con el propósito de entender su impacto sobre la estabilidad estructural y funcional del mismo, además de proponer medidas de mitigación adecuadas. Para llevar a cabo el estudio, se aplicó una metodología basada en el análisis hidráulico y geomorfológico del cauce del río que pasa por debajo del puente. Se utilizaron modelos matemáticos, como el software HEC-RAS, para simular distintos escenarios de flujo y así determinar la profundidad máxima de socavación en las pilas y estribos. También se realizaron inspecciones de campo y mediciones topográficas para verificar los datos obtenidos mediante las simulaciones. Los resultados mostraron que la socavación alcanzaba niveles críticos, especialmente durante eventos de caudal elevado, lo que ponía en riesgo la estabilidad del puente. Las zonas más afectadas eran los alrededores de los estribos, debido a la concentración del flujo y a la erosión lateral. Finalmente, se concluyó que el puente presenta un riesgo alto ante eventos de crecida, tanto para la infraestructura como para los usuarios. Se recomendó la implementación de defensas ribereñas y obras de protección en los estribos para controlar la socavación y garantizar la seguridad a largo plazo del puente.

2.1.2 ANTECEDENTES NACIONALES

Matamoros (2020) en su tesis titulado “Diseño hidráulico y estructural de espigones frente a la socavación de los estribos del puente Matapuquio Pariahuanca - Junín, Perú”, propuso una solución estructural e hidráulica frente a la socavación, mediante el diseño de espigones como método de protección. La metodología consistió en un estudio integral que incluyó la caracterización hidrológica y

geomorfológica del río Pariahuanca, así como la determinación de las condiciones hidráulicas utilizando software especializado como HEC-RAS. También se evaluó el comportamiento estructural de los espigones. Para el diseño hidráulico, se realizaron simulaciones bajo distintos caudales, incluyendo eventos extremos de crecida, y se llevaron a cabo ensayos de laboratorio para probar la resistencia de los materiales seleccionados. Los resultados demostraron que los espigones, cuando están bien dimensionados y ubicados en zonas críticas, logran reducir significativamente la velocidad del flujo cerca de los estribos, disminuyendo la profundidad de socavación en aproximadamente un 40%. Además, el análisis estructural confirmó que estas estructuras pueden resistir las fuerzas hidráulicas y geotécnicas a las que estarían expuestas durante eventos extremos. En las conclusiones se resaltó que los espigones son una alternativa efectiva y sostenible para proteger las estructuras del puente Matapuquio, recomendando su aplicación en proyectos similares de la región. También se hizo hincapié en la importancia de realizar un monitoreo constante del comportamiento del río para asegurar la durabilidad de estas obras.

Quito (2020) en su tesis titulada “Evaluación de la socavación total para la optimización de diseño del puente Solidaridad en el distrito San Juan de Lurigancho – Lima, en Perú”, se enfocó en el análisis de los procesos de socavación en el lecho del río Rímac, especialmente en la zona del Puente Solidaridad, con el fin de mejorar su diseño estructural y asegurar su funcionamiento frente a la erosión. La metodología utilizada incluyó una evaluación hidráulica y geotécnica del río, combinando modelos de socavación general y local con fórmulas empíricas y análisis de campo, lo que permitió estimar la profundidad máxima de socavación. Se tomaron datos durante los periodos de mayor caudal y se realizaron simulaciones computacionales para predecir el comportamiento del lecho del río y su influencia en los estribos del puente. Los resultados evidenciaron que el diseño original del puente no era adecuado para soportar los efectos de la socavación, especialmente en los estribos, lo que generaba un riesgo significativo en eventos de

crecida. Tras la evaluación, se propusieron modificaciones en la profundidad de cimentación y en la protección de los estribos mediante enrocados y estructuras complementarias, con el fin de mitigar los efectos de la socavación. Las conclusiones del estudio señalaron que, con las modificaciones propuestas, se lograba una mejora significativa en la resistencia del puente frente a los efectos erosivos del río, lo que prolongaría su vida útil y reduciría los costos de mantenimiento a largo plazo. Además, la investigación resaltó la importancia de realizar estudios de socavación detallados en las etapas tempranas de diseño de infraestructuras en zonas con ríos de alta variabilidad de caudal.

Chegne (2023) en su tesis titulado “Predicción de la socavación local en el puente Yaminchad para máximas avenidas, utilizando un modelo numérico, San Pablo-Cajamarca, Perú 2022”. El objetivo principal fue determinar la magnitud de la socavación local en las bases del puente Yaminchad durante eventos de máximas avenidas mediante la aplicación de un modelo numérico, con el fin de evaluar la estabilidad de la estructura y proponer medidas de protección ante posibles fallas. Para ello, se empleó una metodología basada en la simulación numérica que incluyó la recopilación de datos hidrológicos y geomorfológicos de la cuenca, la caracterización del flujo y el análisis de la dinámica fluvial en condiciones extremas. Se utilizó el software HEC-RAS para modelar el comportamiento del flujo en el cauce del río y simular los fenómenos de socavación bajo diferentes escenarios de caudal. Los resultados obtenidos mostraron que, durante eventos de avenidas extremas, se produce una socavación considerable en las zonas cercanas a los estribos del puente, lo que pone en riesgo su estabilidad estructural si no se aplican medidas de mitigación adecuadas. A partir de estos hallazgos, la investigación concluyó que el uso de modelos numéricos resulta ser una herramienta muy útil para predecir este tipo de fenómenos, ya que permite optimizar el diseño de las estructuras hidráulicas y planificar acciones preventivas de manera más eficiente. Además, se recomendaron medidas de protección estructural, como el refuerzo de las bases del puente y la construcción de obras complementarias de defensa ribereña, para evitar el colapso ante futuras avenidas.

2.1.3 ANTECEDENTES LOCALES

Robles (2022) en su tesis titulado “Determinación del grado de socavación producido por el Río Higuera a los estribos del puente Daniel Alomía Robles, Huánuco, en Perú 2022”. El objetivo principal del estudio fue analizar y determinar el nivel de socavación que afecta a los estribos del puente Daniel Alomía Robles, ya que este fenómeno representa un factor clave para evaluar la estabilidad y seguridad estructural del puente, debido a la erosión provocada por el río Higuera. Para desarrollar la investigación, se aplicó una metodología basada en el análisis hidrológico e hidráulico del comportamiento del río, utilizando técnicas de modelación matemática y software especializado como HEC-RAS, que permitió simular el flujo del agua y su interacción con la infraestructura del puente. Además, se realizaron trabajos de campo que incluyeron el estudio de suelos y el levantamiento topográfico del área de análisis, con el objetivo de identificar el impacto que la socavación tiene sobre las bases del puente. Los resultados mostraron que los estribos presentan un nivel significativo de socavación, lo cual representa un riesgo para su estabilidad en el largo plazo. En las conclusiones se resaltó la necesidad de aplicar medidas correctivas y preventivas, como la construcción de estructuras de protección y la mejora del cauce del río, con la finalidad de reducir los efectos de la erosión y asegurar la durabilidad del puente. También se enfatizó la importancia de realizar monitoreos periódicos para evitar futuros problemas y mantener la funcionalidad de esta infraestructura vial.

Canales (2021) en su tesis titulada “Evaluación de riesgos existentes por erosión fluvial en el estribo izquierdo del puente Colpa Alta - Huánuco, en Perú 2021”, tuvo como propósito principal evaluar los riesgos generados por la erosión fluvial en el estribo izquierdo de dicho puente, identificando las zonas más vulnerables y proponiendo medidas para mitigar posibles daños estructurales. La metodología empleada consistió en un análisis de campo para conocer las condiciones geológicas, hidrológicas y geomorfológicas del área, complementado con la aplicación de modelos hidráulicos que simularon el comportamiento del río y su interacción con el puente. Asimismo, se

usaron herramientas de geoprocésamiento y sistemas de información geográfica (SIG) para mapear las zonas con mayor riesgo. Los resultados indicaron que la erosión fluvial se intensifica durante la temporada de lluvias, lo que provoca una socavación progresiva en la base del estribo izquierdo y compromete la estabilidad de la estructura. Como conclusión, se recomendó implementar obras de protección como espigones y muros de contención, además de mantener un monitoreo constante de las condiciones hidráulicas del río para prevenir posibles emergencias. El estudio también destacó la importancia de ejecutar mantenimientos periódicos y tomar acciones correctivas a tiempo para garantizar la seguridad de los usuarios del puente.

Sáenz (2023) en su tesis titulada “Influencia de la socavación en la estabilidad de los estribos en el puente La Esperanza del río Huallaga, Huánuco, en Perú 2023”, centró su estudio en analizar el impacto que tiene la socavación sobre la estabilidad de los estribos del puente La Esperanza, con el objetivo de proponer medidas que mejoren su seguridad estructural. Para ello, se desarrolló una metodología que incluyó inspecciones en campo, la caracterización del comportamiento del flujo de agua en la zona y el uso de software especializado en modelación hidráulica y geotécnica, como HEC-RAS y Plaxis. Estos programas permitieron evaluar con mayor precisión las condiciones actuales de erosión y la estabilidad de los estribos. Los resultados mostraron que en las cercanías del puente se presentan niveles críticos de socavación, lo cual representa un alto riesgo de colapso estructural en caso de crecidas del río. Entre las principales recomendaciones del estudio, se propuso la implementación de estructuras de protección, como espigones y revestimientos de roca, que ayuden a controlar la erosión en la base de los estribos. También se indicó la necesidad de llevar a cabo un monitoreo constante de las condiciones hidráulicas y geotécnicas del río, y se destacó la importancia de revisar de manera periódica el estado de la infraestructura del puente, con el fin de prevenir fallos futuros debido a la progresiva socavación.

2.2 BASES TEÓRICAS

2.2.1 INTRODUCCIÓN A LA SOCAVACIÓN

2.2.1.1 Definición de socavación

La socavación es un proceso de erosión que ocurre en el lecho de los ríos, causado por la acción del flujo del agua, el cual arrastra y remueve el material del fondo y de las márgenes del cauce. Este fenómeno se intensifica en áreas cercanas a estructuras hidráulicas como puentes y estribos, generando una disminución de la estabilidad estructural. Existen varios tipos de socavación, entre ellas la socavación general, que afecta el lecho del río en su totalidad, y la socavación local, que se concentra alrededor de los elementos estructurales. La magnitud de la socavación depende de factores como la velocidad del flujo y la naturaleza del sedimento transportado (Ramos, 2018).

2.2.1.2 Clasificación de los tipos de socavación (general, local, en estribos y pilas)

La socavación se clasifica en varios tipos, cada uno afectando de manera distinta el lecho de los ríos y estructuras (Ramos, 2018).

Figura 1

Socavación en puentes



Fuente. (Ramos, 2018).

a) Socavación general

La socavación general se refiere a la erosión que ocurre de manera uniforme en todo el lecho del río debido a la acción natural del flujo de agua, sin estar influenciada por estructuras

artificiales. Este tipo de socavación está relacionado con fenómenos hidrológicos como el aumento del caudal, variaciones en la pendiente del río y la capacidad del flujo para transportar sedimentos. Es un proceso a largo plazo que puede modificar la morfología del río (Ramos, 2018).

b) Socavación local

La socavación local se presenta en zonas específicas alrededor de estructuras hidráulicas, como pilas y estribos de puentes. Este tipo de socavación ocurre debido a que la presencia de estas estructuras modifica el flujo natural del agua, generando vórtices y aceleraciones que erosionan el lecho del río en áreas puntuales. A diferencia de la socavación general, la socavación local es más intensa y, si no se controla de forma adecuada, puede poner en riesgo la estabilidad de las infraestructuras (Ramos, 2018).

c) Socavación en estribos

La socavación en estribos ocurre en las bases laterales de los puentes, donde el flujo de agua se intensifica al impactar contra los estribos. Esta fuerza remueve los sedimentos y debilita el terreno que sirve de soporte. Este fenómeno suele presentarse con mayor frecuencia durante crecidas o inundaciones, aumentando así el riesgo de que la estructura falle. Para reducir sus efectos, comúnmente se recurre a soluciones como revestimientos protectores o la construcción de muros de contención (Ramos, 2018).

d) Socavación en pilas

La socavación en pilas se localiza en la base de las columnas o pilas que sostienen puentes sobre ríos. Estas estructuras interrumpen el flujo del agua, provocando la formación de vórtices de alta energía que erosionan rápidamente el material del lecho que las rodea. Este tipo de socavación es especialmente crítico para la estabilidad del puente, sobre todo en eventos con caudales elevados o en

lechos compuestos por sedimentos fácilmente erosionables (Ramos, 2018).

2.2.1.3 Impacto de la socavación en la estabilidad estructural de puentes y estribos

El impacto de la socavación en la estabilidad estructural de puentes y estribos es considerable, ya que puede debilitar directamente las bases de estas estructuras, provocando asentamientos diferenciales y elevando el riesgo de colapso. Al reducirse la capacidad de soporte del terreno debido a la erosión, se incrementa la posibilidad de fallas estructurales, especialmente durante crecidas o flujos con alta velocidad. Por ello, es fundamental implementar medidas de protección como revestimientos o cimentaciones profundas para mitigar estos efectos (Vega, 2019).

2.2.2 FACTORES QUE AFECTAN LA SOCAVACIÓN

Existen diversos factores que influyen en el proceso de socavación, ya que afectan directamente la erosión del lecho del río y de su entorno. Entre los principales se encuentran las condiciones hidráulicas del río, el tipo y distribución de sedimentos, la forma del cauce y la existencia de estructuras artificiales. Estos factores pueden aumentar o disminuir la magnitud y velocidad del proceso erosivo, impactando así en la estabilidad de las infraestructuras cercanas. Por esta razón, es esencial considerar cada uno de ellos en el diseño de obras hidráulicas para garantizar su seguridad y durabilidad (López, 2017).

2.2.2.1 Condiciones hidráulicas del río

Las condiciones hidráulicas del río representan uno de los factores más determinantes en el proceso de socavación. Aspectos como la velocidad del flujo, el caudal, la profundidad del agua y la turbulencia influyen directamente en la capacidad del río para erosionar su lecho. Cuando se presentan caudales elevados y velocidades altas, la energía del agua se incrementa, facilitando la remoción de sedimentos y acelerando la socavación. Además, las crecidas, los eventos climáticos extremos y las variaciones

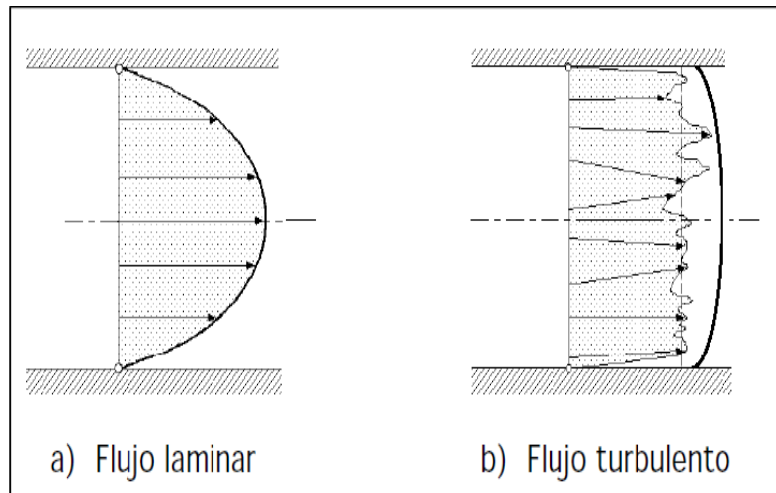
estacionales del caudal son factores clave que agravan este fenómeno (López, 2017).

e) Velocidad y régimen de flujo

La velocidad y el régimen del flujo son parámetros fundamentales en la dinámica fluvial, ya que determinan la capacidad del agua para erosionar y transportar sedimentos. Un flujo rápido, con alta turbulencia, posee mayor energía cinética, lo que incrementa significativamente la socavación tanto en el lecho del río como en las estructuras próximas. El régimen de flujo, ya sea laminar o turbulento, también influye en cómo se distribuyen las fuerzas del agua. En ríos con pendiente pronunciada o durante crecidas, el flujo tiende a ser turbulento, favoreciendo los procesos erosivos (Sánchez, 2017).

Figura 2

Régimen de flujo



Fuente. (Sánchez, 2017)

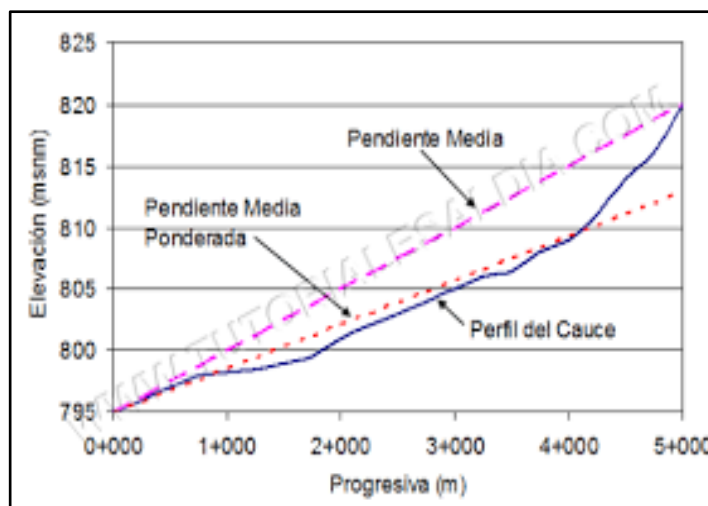
f) Pendiente del cauce

La pendiente del cauce es un factor clave en la dinámica de los ríos, ya que influye directamente en la velocidad del flujo y, en consecuencia, en su capacidad para erosionar. Cuanto mayor es la pendiente, más energía adquiere el agua, lo que genera una socavación más intensa tanto en el lecho como en las riberas. Esto es especialmente importante en tramos de ríos con pendientes elevadas, donde los procesos

de erosión son más agresivos y pueden afectar la estabilidad de estructuras cercanas. Además, la pendiente también influye en el transporte y sedimentación de materiales a lo largo del cauce (Sánchez, 2017).

Figura 3

Cálculo de la pendiente máxima del cauce



Fuente. (Sánchez, 2017)

2.2.2.2 Características geomorfológicas del lecho

g) Tipo de sedimentos y granulometría

Las características geomorfológicas del lecho del río, especialmente el tipo de sedimentos y su granulometría, juegan un papel fundamental en el proceso de socavación. Sedimentos con granulometría fina, como limos y arenas, son fácilmente erosionables por su bajo peso específico y escasa cohesión (García Torres, 2018).

En contraste, los materiales más gruesos, como las gravas y piedras, ofrecen mayor resistencia a la acción del agua. La granulometría, entendida como el tamaño y la distribución de los sedimentos, es un aspecto clave en los estudios de estabilidad de cauces y diseño de obras hidráulicas (García Torres, 2018).

h) Erosión natural y artificial del cauce

La erosión natural del cauce. Es un proceso geomorfológico provocado por el flujo del agua, que transporta sedimentos y modifica gradualmente el fondo del

río. Este proceso está influenciado por factores como la velocidad del flujo, el tipo de sedimento y la pendiente del cauce (Vargas Cárdenas, 2020).

La erosión artificial. Se produce a partir de actividades humanas, como la construcción de represas, canales y otras obras hidráulicas que alteran las condiciones naturales del río. Estas intervenciones pueden acelerar el proceso de erosión en determinadas zonas. Tanto la erosión natural como la artificial pueden comprometer la estabilidad de las estructuras cercanas al cauce (Vargas Cárdenas, 2020).

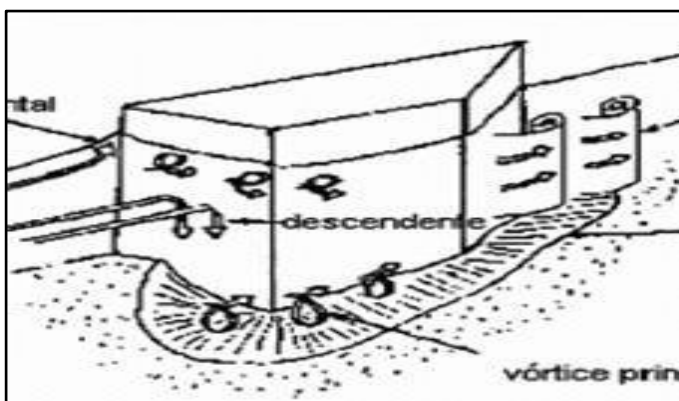
2.2.2.3 Influencia de las estructuras hidráulicas en el proceso de socavación

i) Interacción de pilas y estribos con el flujo

Las pilas y estribos modifican el comportamiento natural del flujo en los ríos, generando zonas de alta turbulencia y vórtices en su base. Esta alteración intensifica la erosión del sedimento, provocando un fenómeno conocido como socavación local. Este tipo de socavación se vuelve más severo en sectores donde el caudal es elevado y la velocidad del agua es mayor, lo cual acelera el desgaste del material que rodea las pilas y estribos. Para reducir estos efectos, se aplican medidas de protección como enrocados o revestimientos, los cuales ayudan a estabilizar la estructura (García García, 2020).

Figura 4

Erosión de pilares y estribos en puentes



Fuente. (García García, 2020)

j) Efecto del encauzamiento y obras de control

Las obras de encauzamiento y control juegan un papel clave en la reducción de la socavación y la erosión, especialmente en zonas que presentan mayor vulnerabilidad. Este tipo de intervenciones busca dirigir el flujo del río hacia trayectorias más seguras, disminuyendo así el riesgo de afectación a las infraestructuras cercanas. No obstante, es fundamental que estas obras se ejecuten de manera adecuada, ya que un mal diseño puede provocar un aumento en la velocidad del flujo en ciertos puntos, intensificando la socavación. Algunas de las técnicas más comunes incluyen la construcción de muros, diques y revestimientos que protejan las márgenes del río (Martínez Sánchez, 2018).

Figura 5

Obras de encausamiento



Fuente. (Martínez Sánchez, 2018)

2.2.3 TEORÍAS Y MODELOS PARA EL CÁLCULO DE LA SOCACACIÓN

2.2.3.1 Modelos empíricos para la socavación general

En el estudio de la socavación general, es común utilizar modelos empíricos que se basan en datos experimentales y relaciones estadísticas. Estos modelos permiten estimar el comportamiento del flujo y la profundidad de socavación sin necesidad de realizar simulaciones complejas (Morales, 2017).

k) Fórmula de Lacey

La fórmula de Lacey es un modelo empírico que permite calcular la profundidad de socavación en canales fluviales. Se

basa en la relación entre la velocidad crítica del flujo y la capacidad del agua para transportar sedimentos, dependiendo principalmente del caudal y de la pendiente. Esta herramienta es bastante útil cuando se analizan ríos con comportamiento estable, ya que brinda una estimación razonable de la profundidad de socavación (Morales J. , 2019).

La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$d = \left(\frac{V}{\sqrt{S}} \right)^2$$

Donde:

d es la profundidad de socavación,

V es la velocidad crítica del flujo, y

S es la pendiente del lecho.

l) Fórmula de Blench

La fórmula de Blench también es un modelo empírico que se utiliza para calcular la socavación en canales, especialmente cuando el lecho está compuesto por materiales finos o partículas sueltas. Esta fórmula tiene en cuenta el caudal y la velocidad del flujo, además de incorporar factores relacionados con el transporte de sedimentos (Guzmán, 2016).

La fórmula de Blench es:

$$d = \frac{Q}{(g \cdot D \cdot S)}$$

Donde:

- d es la profundidad de socavación,
- Q es el caudal
- g es la aceleración debida a la gravedad,
- D es el diámetro medio de los sedimentos, y
- S es la pendiente del lecho del río.

m) Modelo de Laursen

El modelo de Laursen representa una alternativa más avanzada para calcular la socavación, ya que considera tanto

la energía hidráulica del flujo como la variabilidad del caudal. A diferencia de otros modelos, este permite obtener estimaciones más precisas, especialmente en ríos donde el caudal no es constante. Utiliza la relación entre el caudal, la velocidad del flujo y la energía cinética para estimar la profundidad de socavación en puntos específicos del lecho (Flores Paredes, 2019).

La fórmula es:

$$d = \frac{(Q^2)}{(g \cdot D \cdot S)}$$

Donde:

- d es la profundidad de socavación,
- Q es el caudal
- g es la gravedad,
- D es el diámetro del sedimento, y
- S es la pendiente.

2.2.3.2 Modelos para la socavación en estribos

Los modelos destinados a calcular la socavación en estribos se enfocan en estimar la profundidad de erosión en las bases laterales de los puentes. Estos modelos consideran aspectos como el comportamiento del flujo y las características del lecho del río. En la ingeniería hidráulica, representan una herramienta esencial para anticipar y prevenir daños estructurales provocados por la socavación acelerada en estas zonas críticas (Ramírez Espinoza, 2019):

n) Fórmula de Melville y Coleman

Es ampliamente utilizada para estimar la profundidad de socavación en estribos. Este modelo considera factores como el ángulo del flujo de entrada, el tamaño de las partículas del lecho y la geometría del estribo. Se formula como (Ramírez Espinoza, 2019):

$$Z_{sc} = K_f K_y K_\theta D$$

Donde:

Z_{sc} es la profundidad de socavación,

Kf es un factor relacionado con el caudal
 Ky depende de la forma del estribo
 Kθ ajusta el ángulo de entrada del flujo, y
 D es el diámetro medio de las partículas.

o) Fórmula de Sheppard y Miller

Se enfoca en la influencia de la velocidad del flujo y la turbulencia en la socavación en estribos, proponiendo un enfoque más empírico basado en pruebas de campo. La ecuación principal se expresa como (Ramírez Espinoza, 2019):

$$Z_s = C \cdot \left(\frac{V}{V_c} \right)^n$$

Donde:

Zs es la profundidad de socavación,

C es un coeficiente empírico

V velocidad del flujo

Vc es la velocidad crítica para la erosión, y

n es un exponente ajustado experimentalmente.

p) Fórmula de Artamonov

Esta fórmula permite determinar no solamente la profundidad de socavación al pie de los estribos sino también al pie de espigones (Ramírez Espinoza, 2019).

$$Z_s = K_\theta \cdot K_Q \cdot K_m \cdot h$$

Donde:

Zs es la profundidad de socavación,

Kθ es un coeficiente que depende del ángulo que forma el eje de la obra con la corriente

KQ es un coeficiente que depende de la relación entre el gasto teórico interceptado por el estribo y el caudal total que escurre por la sección transversal

Km es un coeficiente que depende del talud que tienen los lados del estribo, y

h es un tirante de agua en la zona cercana al espigón o estribo antes de la socavación.

2.2.4 CUENCA HIDROGRÁFICA

Una cuenca hidrográfica es un área delimitada por divisorias naturales de aguas, donde toda precipitación converge hacia un punto común de salida, generalmente un río o lago. Este sistema comprende el ciclo hidrológico, influenciado por la interacción entre la precipitación, escorrentía, infiltración y la evapotranspiración (Morales J. , 2019).

2.2.4.1 Componentes de una Cuenca Hidrográfica

Una cuenca hidrográfica está compuesta por varios elementos clave que determinan su dinámica hidrológica.

Figura 6

Partes de una cuenca hidrográfica



Fuente. (Morales J. , 2019)

q) Divisoria de Aguas

La divisoria de aguas es la línea que delimita la cuenca hidrográfica, separando el flujo de agua que cae dentro de la cuenca de las áreas vecinas. Esta línea se encuentra en las partes más altas del terreno y es esencial para determinar el área de captación de precipitación. La correcta identificación de la divisoria es fundamental en la gestión de recursos hídricos y estudios hidrológicos (Morales J. , 2019).

r) Cauce Principal

El cauce principal es el canal natural por donde fluye el agua desde la cuenca hasta un cuerpo receptor, como puede ser un río, lago o embalse. A lo largo de su trayecto, se le van sumando afluentes menores que incrementan su caudal. Su capacidad para transportar agua y sedimentos depende de

las características geomorfológicas de la cuenca (Morales J. , 2019).

s) Zonas de Recarga

Las zonas de recarga son aquellas partes de la cuenca donde el agua de la lluvia se infiltra en el suelo y alimenta los acuíferos subterráneos. Estas zonas son fundamentales dentro del ciclo hidrológico, ya que permiten que las aguas subterráneas se repongan y estén disponibles durante los periodos de sequía (Morales J. , 2019).

t) Zonas de Descarga

Las zonas de descarga son los lugares por donde el agua, luego de atravesar la cuenca, sale hacia un río o cuerpo de agua mayor. Pueden estar formadas por ríos, lagos o humedales, y su función es clave en la regulación del flujo del agua dentro de la cuenca (Morales J. , 2019).

u) Geomorfología de la Cuenca

La geomorfología de la cuenca, que abarca elementos como la pendiente del terreno y la densidad de la red de drenaje, influye directamente en la velocidad con la que ocurre la escorrentía y en la capacidad de la cuenca para manejar grandes volúmenes de agua (Morales J. , 2019).

2.2.4.2 Parámetros Geomorfológicos de la Cuenca Hidrográfica

Los parámetros geomorfológicos de una cuenca hidrográfica permiten describir su configuración física, que influye en los procesos hidrológicos y el comportamiento del flujo de agua. Entre estos parámetros se encuentran (Hernández, 2017):

v) Área de la cuenca

El área de la cuenca hidrográfica es el parámetro que define la extensión superficial que abarca la cuenca. Representa la cantidad de territorio que contribuye a captar agua de precipitación, la cual es eventualmente canalizada hacia el punto de salida de la cuenca. Cuanto mayor es el

área, mayor será el volumen potencial de escorrentía que se generará (Hernández, 2017).

w) Pendiente media

La pendiente media de una cuenca influye directamente en la velocidad de la escorrentía. Cuanto mayor sea la pendiente, más rápida será la escorrentía, lo que puede aumentar la erosión del suelo y el transporte de sedimentos hacia el cauce principal. La pendiente media también es clave para evaluar el tiempo de respuesta de una cuenca ante eventos de precipitación (Hernández, 2017).

Fórmula:

$$S = \frac{h_{max} - h_{min}}{L}$$

donde:

- S es la pendiente media
- h max y h min son las altitudes máxima y mínima de la cuenca
- L es la longitud del cauce principal.

x) Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal es la distancia entre el punto más alejado de la cuenca y su desembocadura en el cuerpo de agua receptor. Este parámetro geomorfológico influye en el tiempo de concentración de la cuenca, que es el tiempo necesario para que el agua generada por la precipitación en la parte más distante de la cuenca llegue al punto de salida. La longitud afecta la capacidad de amortiguamiento de los caudales y el transporte de sedimentos (Hernández, 2017).

y) Relación de forma

Es un indicador de la forma geométrica de la cuenca y su influencia en el comportamiento hidrológico. Una cuenca alargada tiende a tener un tiempo de respuesta más lento frente a lluvias intensas, mientras que una cuenca compacta puede tener una respuesta más rápida. Este parámetro se

usa para predecir la velocidad de los eventos de escorrentía y posibles inundaciones (Hernández, 2017).

z) Densidad de drenaje

La densidad de drenaje se refiere a la longitud total de los canales de agua en una cuenca dividida por el área de la misma. Es un parámetro geomorfológico importante que sirve para medir qué tan bien conectada está la red de drenaje dentro de una cuenca. Cuando la densidad de drenaje es alta, el sistema es más eficiente para transportar tanto agua como sedimentos, pero esto también implica un mayor riesgo de erosión y sedimentación (Hernández, 2017).

Fórmula:

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

donde:

- D_d es la densidad de drenaje
- L_t es la longitud total de los canales
- A es el área de la cuenca.

aa) Curvatura del cauce

La curvatura del cauce representa qué tan sinuoso es un río dentro de una cuenca. Cuando un río tiene mayor sinuosidad, su velocidad de flujo suele ser menor, lo cual influye en su capacidad para transportar sedimentos y en la velocidad con la que se produce la erosión en las márgenes. Este parámetro es relevante al analizar la socavación lateral, ya que en las curvas de los ríos la energía del flujo se concentra en las orillas externas, provocando una mayor erosión en esos puntos (Hernández, 2017).

2.3 DEFINICIONES CONCEPTUALES

Caudales máximos: Son los mayores flujos de agua que pueden presentarse durante eventos extremos de lluvia. Son esenciales para diseñar con seguridad infraestructuras como defensas fluviales y puentes (Gutiérrez Valverde, 2018).

Dimensiones de puente proyectado: Corresponden a la longitud, el ancho y la altura del puente, determinados en función de las condiciones hidráulicas y estructurales del sitio donde se construirá (Gutiérrez Valverde, 2018).

HEC-HMS: Es un programa que permite simular los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca. Sirve para modelar lluvias y los caudales resultantes, ayudando en el diseño de obras de control y sistemas de drenaje (Torres Salinas, 2020).

Lecho de río: Es la superficie por donde circula el agua dentro de un cauce. Está formado por sedimentos con diferentes tamaños de grano, los cuales varían según el caudal y la pendiente del río (Torres Salinas, 2020).

Parámetro geomorfológico: Se refiere a las características físicas y topográficas de una cuenca, como su forma, longitud y pendiente, las cuales influyen en cómo se comporta el escurrimiento del agua (Guzmán, 2016).

Pendiente de cuenca: Es el ángulo de inclinación que presenta el terreno dentro de una cuenca, el cual determina tanto la dirección como la velocidad con que fluye el agua (Morales, 2017).

Periodo de retorno: Es el tiempo promedio que transcurre entre eventos hidrológicos de magnitud similar. Se usa para estimar la frecuencia de fenómenos como lluvias intensas o inundaciones en una cuenca (Sánchez Martínez, 2021).

Precipitación máxima: Es la cantidad más alta de lluvia acumulada durante un determinado periodo. Este dato se utiliza en el diseño de infraestructuras hidráulicas para prever los caudales máximos que podrían generarse (Rojas Fernández, 2020).

Propuesta de método óptimo: Se trata del desarrollo de un método técnico que integra herramientas analíticas y modelos computacionales con el objetivo de mejorar la precisión en el cálculo de la socavación, lo que permite garantizar una mayor durabilidad en las obras hidráulicas (Flores Paredes, 2019).

Socavación en estribos: Es el tipo de erosión que ocurre específicamente en las bases laterales de los puentes. Esta erosión es provocada por la velocidad del agua y la turbulencia en los puntos donde el flujo impacta directamente sobre las estructuras de soporte (Rojas Fernández, 2020).

Socavación general: Es la erosión generada por el flujo del agua sobre el lecho del río. Este proceso afecta de manera generalizada la base de estructuras cercanas como pilas y estribos de puentes (Vargas Cárdenas, 2020).

2.4 HIPÓTESIS

❖ HIPOTESIS GENERAL

HG: Si se mejora el diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco, entonces se incrementará la seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas.

❖ HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

HE1: Si se analizan las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco, entonces se comprenderá mejor su influencia en la profundidad de socavación en estribos.

HE2: Si se desarrolla un método mejorado para el cálculo de la profundidad de socavación en estribos incorporando variables representativas del comportamiento del lecho del río Huamuco, entonces se obtendrán estimaciones más precisas de la socavación.

HE3: Si se diseña una solución hidráulica optimizada para reducir los efectos de la socavación en estribos, entonces se mejorará la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco.

HE4: La propuesta de una nueva fórmula de cálculo preponderado de acuerdo a las características y propiedades que considere cada método aplicado permitirá establecer un valor más seguro en cuanto a la estimación de la socavación en la zona de estudio.

2.5 VARIABLES

2.5.1 VARIABLE 1

Diseño hidráulico y cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco.

2.5.2 VARIABLE 2

Seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas.

2.6 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES (DIMENSIONES E INDICADORES)

Tabla 1

Operacionalización de variables

VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN	INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS
Diseño hidráulico y cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco (Variable 1)	Diseño hidráulico	Parámetros hidráulicos (caudal, velocidad, profundidad)	Númérica (m^3/s , m/s , m)	Modelación hidráulica, revisión de planos y normativas
	Cálculo de socavación	de Profundidad de socavación en estribos	Númérica (m)	Modelos empíricos y software de análisis hidráulico
	Características del lecho del río	Granulometría, tipo de sedimentos, estabilidad del lecho	Categórica y numérica (mm , clasificación de suelos)	Análisis de muestras de sedimentos, ensayos de laboratorio
Seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas (Variable 2)	Seguridad estructural	Resistencia de estribos ante socavación	Númérica (factor de seguridad)	de Modelación estructural, inspección técnica
	Eficiencia hidráulica	Pérdidas de carga, capacidad de evacuación	Númérica (m , m^3/s)	Simulación hidráulica, medición en campo
	Impacto de la socavación	Grado de afectación a la infraestructura	Categórica (leve, moderado, severo)	Inspección visual, estudios de estabilidad

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

3.1.1 ENFOQUE

La investigación pertenecerá al enfoque cuantitativo, ya que buscará comprobar de manera objetiva la relación entre la selección del método adecuado para calcular la profundidad de socavación y la precisión con que se reflejan las características del lecho del río Huamuco. Este enfoque permitirá medir, analizar y comparar variables cuantificables, como la profundidad de socavación y los datos reales del lecho, utilizando métodos numéricos y estadísticos (Hernández Sampieri, 2014). A través de mediciones precisas y del uso de modelos hidráulicos, se analizarán los resultados obtenidos para comprobar si la hipótesis es correcta o no. Se optará por un enfoque cuantitativo, ya que este permite validar de forma empírica y estadística las variables que intervienen, asegurando que los resultados puedan repetirse y aplicarse en otras cuencas con características similares.

3.1.2 ALCANCE O NIVEL

Pertenecerá al alcance descriptivo, porque busca detallar las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco, con el fin de comprender cómo estas influyen en los procesos de socavación que afectan a los estribos de las infraestructuras hidráulicas. Este nivel de estudio permite caracterizar, observar y medir los fenómenos fluviales. El objetivo es representar con exactitud las condiciones que afectan la estabilidad de las estructuras mediante la recopilación de datos de campo, el análisis geomorfológico y la modelación hidráulica. El resultado de este nivel descriptivo consiste en una perspectiva técnica y minuciosa del entorno hidráulico, que se utilizará como una base sólida para investigaciones futuras y recomendaciones técnicas en el campo de los estudios hidrodinámicos. El alcance descriptivo tiene como finalidad especificar las propiedades, las características y los perfiles de procesos, objetos o cualquier otro fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de

manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren, esto es, su objetivo no es indicar cómo se relacionan éstas (Hernández Sampieri, 2014).

3.1.3 DISEÑO

El diseño de la investigación es no experimental, ya que se centrará en observar y analizar las condiciones actuales del lecho del río Huamuco sin modificar ninguna de las variables involucradas. Esto permitirá estudiar tanto la socavación general como la que ocurre en los estribos, a partir del análisis y la recopilación de datos empíricos. Para ello, se aplicarán métodos de cálculo recomendados por el MTC, como HEC-RAS y Laursen, en combinación con modelos computacionales, con el fin de comparar y evaluar su precisión en relación con las condiciones geomorfológicas e hidrodinámicas específicas del río. Se utilizarán registros históricos, datos obtenidos en campo y simulaciones numéricas como base para identificar cuál es el método más adecuado para calcular la socavación en este caso particular, asegurando que los resultados representen con fidelidad las condiciones reales de la zona. (Hernández Sampieri, 2014). Se captarán las variaciones en las estimaciones de profundidad y su concordancia con los datos reales del lecho del río de forma simultánea, lo que proporcionará un análisis instantáneo de la relación entre las variables.

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

3.2.1 POBLACIÓN

En metodología de investigación, la población se refiere al conjunto total de elementos que comparten una característica en común y que son objeto de estudio (Hernández Sampieri, 2014).

En este caso, la población incluirá los cortes transversales del río Huamuco, que une a los poblados de Santa Rosa de lo Alto Yanajanca y La Morada en la provincia de Marañón, en Huánuco.

3.2.2 MUESTRA

La muestra es una parte representativa de la población, seleccionada para realizar observaciones y análisis (Hernández Sampieri, 2014).

En esta investigación, la muestra podría consistir en los cortes transversales 0+900 del río Huamuco, que une a los poblados de Santa Rosa de lo Alto Yanajanca y La Morada en la provincia de Marañón, en Huánuco; Dicha muestra se consideró debido a que el puente existente en la zona de estudio tiene peligro de colapsar por la crecida del río Huamuco.

Figura 7

Problemática de la zona de estudio



Fuente. (Diario AHORA, 2024)

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1 PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS

3.3.1.1 Técnicas

Las técnicas que se utilizarán para recolectar los datos en esta investigación serán la observación directa, que consistirá en realizar un análisis in situ del lecho del río Huamuco, con el objetivo de registrar sus características geomorfológicas y sedimentológicas. También se llevará a cabo la entrevista a expertos en hidráulica y sedimentología, con el fin de obtener información clave sobre los métodos usados para calcular la socavación. Finalmente, se realizará una revisión documental de estudios anteriores, informes técnicos y normativas que brinden datos útiles sobre la socavación en ríos con condiciones similares. Este conjunto de técnicas permitirá abordar el tema desde una

perspectiva integral, facilitando la identificación del método más adecuado.

3.3.1.2 Instrumentos

Para la recolección de datos se emplearán estaciones totales y GPS, los cuales permitirán tomar mediciones precisas del lecho del río y conocer su configuración con mayor detalle. También se utilizarán sondas de profundidad para medir la profundidad de socavación en diferentes puntos del río. Para el análisis de datos y simulaciones, se empleará software especializado como HEC-HMS y ArcGIS, que facilitarán la modelación y evaluación de los métodos seleccionados. Estos instrumentos permitirán la obtención de datos precisos y confiables para la investigación.

3.3.2 PARA LA PRESENTACIÓN DE DATOS

Se utilizó los siguientes instrumentos:

Tabla 2

Instrumentos de recolección de datos

1. Identificar los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Huamuco					
Parámetro	Método de Obtención	Valor Calculado	Fuente de Datos	Observaciones	
Área de la cuenca (km²)	Análisis SIG		Cartografía, imágenes satelitales		
Longitud del cauce (km)	Mediciones geográficas		Mapas topográficos		
Pendiente media (%)	Análisis de curvas de nivel		Modelos digitales de elevación (DEM)		
Forma de la cuenca	Índice de compacidad, relación axial		SIG y datos de campo		
2. Calcular el período de retorno en años para la vida útil del proyecto					
Estación Hidrológica	Variable	Período de Registro	Método de Análisis	Período de Retorno (años)	Observaciones
	Caudal máximo		Método de Gumbel/Log-Pearson		Validar calidad de registros

Precipitación máxima	Análisis estadístico	Homogeneidad de datos históricos
-------------------------	-------------------------	--

3. Estimar la precipitación máxima en milímetros para el período de retorno establecido

Período de Retorno (años)	Estación Meteorológica	Método de Estimación	Precipitación Máxima (mm)	Observaciones
		Gumbel/Log- Pearson		Considerar variabilidad climática

4. Generar los caudales máximos de diseño en m³/s utilizando HEC-HMS

Escenario de Simulación	Período de Retorno (años)	Precipitación Máxima (mm)	Caudal Máximo (m³/s)	Observaciones
				Ajustar parámetros del modelo

5. Proponer una estimación inicial de las dimensiones del puente proyectado

Parámetro	Unidad	Valor Propuesto	Fuente de Información	Observaciones
Longitud del puente	m		Resultados geomorfológicos e hidráulicos	Determinar en función del ancho del río
Ancho del puente	m		Normas de diseño	Basado en tipo de tráfico
Altura libre hidráulica	m		Caudales máximos y niveles del río	Considerar márgenes de seguridad

3.3.3 PARA EL ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Las técnicas para el procesamiento y análisis de la información en esta investigación incluirán el uso de análisis estadístico, que permitirá evaluar la precisión de los diferentes métodos seleccionados para calcular la profundidad de socavación general y en estribos. Se aplicarán técnicas de comparación de datos, utilizando software estadístico para determinar la correlación entre las estimaciones de profundidad y las mediciones reales obtenidas en el campo. Además, se implementará

modelación numérica a través de herramientas como HEC-HMS para simular el comportamiento del flujo y la socavación en el lecho del río Huamuco, facilitando la identificación del método más efectivo. Estas técnicas permitirán generar conclusiones fundamentadas sobre la relación entre los métodos aplicados y la precisión de los resultados, contribuyendo a una mejor comprensión de la dinámica del lecho del río.

CAPÍTULO IV

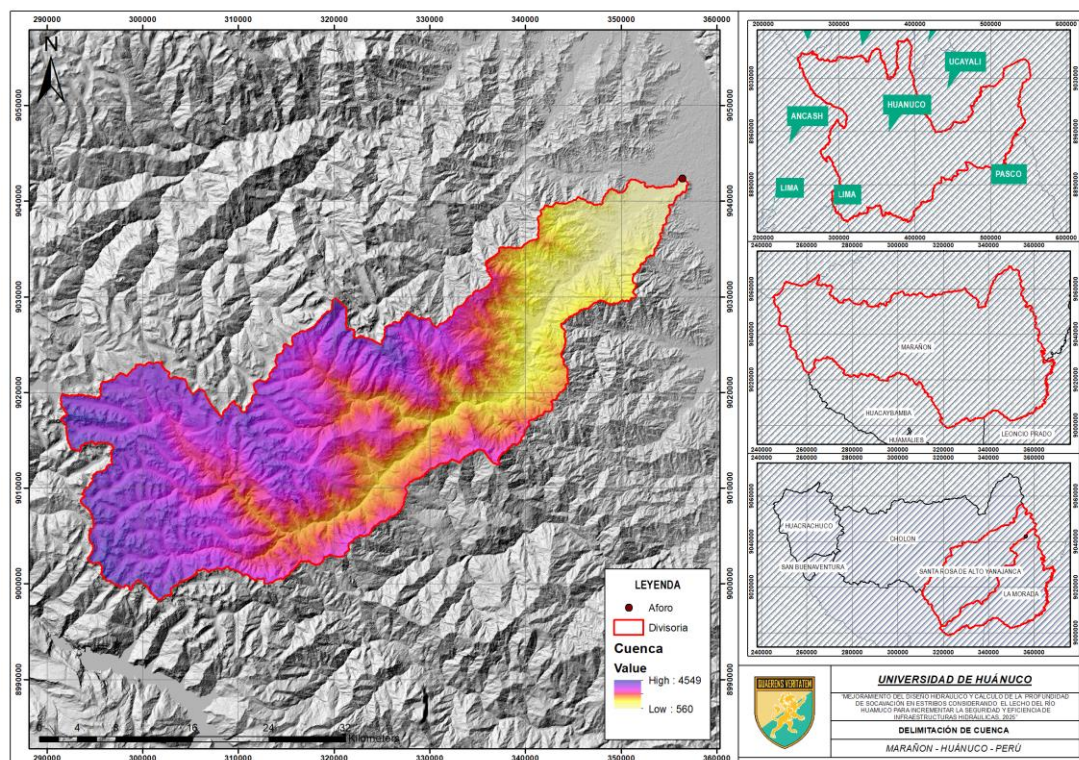
RESULTADOS

4.1 PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS DE LA CUENCA

Figura 8

Delimitación de cuenca

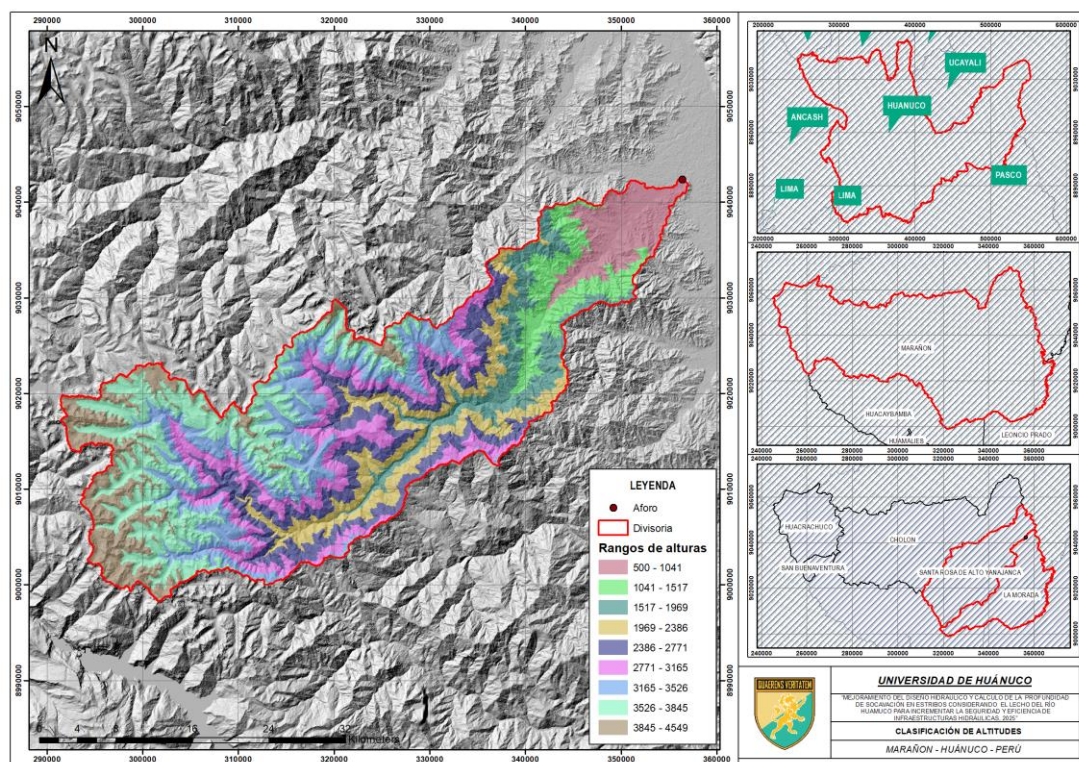


Nota. Límites de la cuenca hidrológica.

Para la determinación de los límites de la cuenca se identificó la ubicación al puente de interés en la investigación, con ello se pudo identificar que la cuenca se presenta entre las alturas de 560 a 4549 msnm, con ello se caracterizó que la cuenca se encuentra en una zona con una potencial capacidad de erosión de acuerdo a su distribución de alturas.

Figura 9

Clasificación de alturas

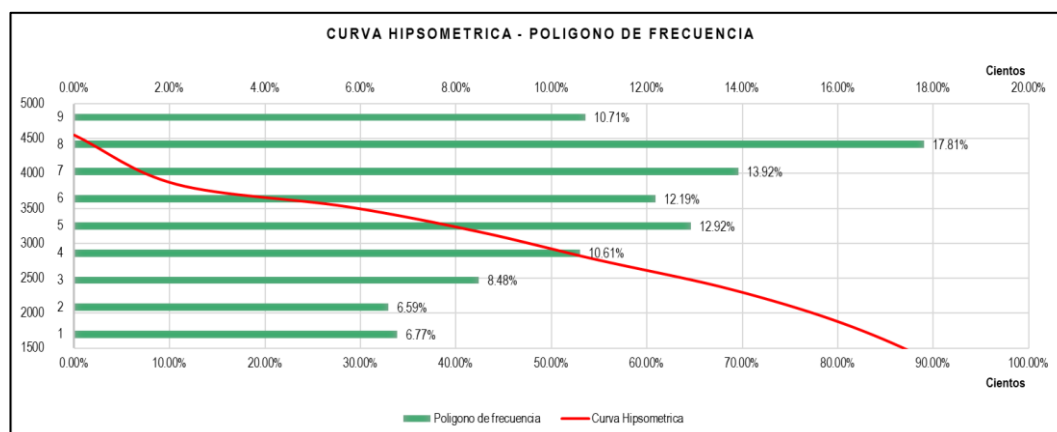


Nota. Reclasificación altitudinal por rangos.

Con la finalidad de identificar las características topográficas de la cuenca y caracterizar la información hipsométrica y el polígono de alturas correspondiente se reclasificaron las alturas en 9 rangos, abarcando toda la altitud en la cuenca.

Figura 10

Curva Hipsométrica y polígono de alturas



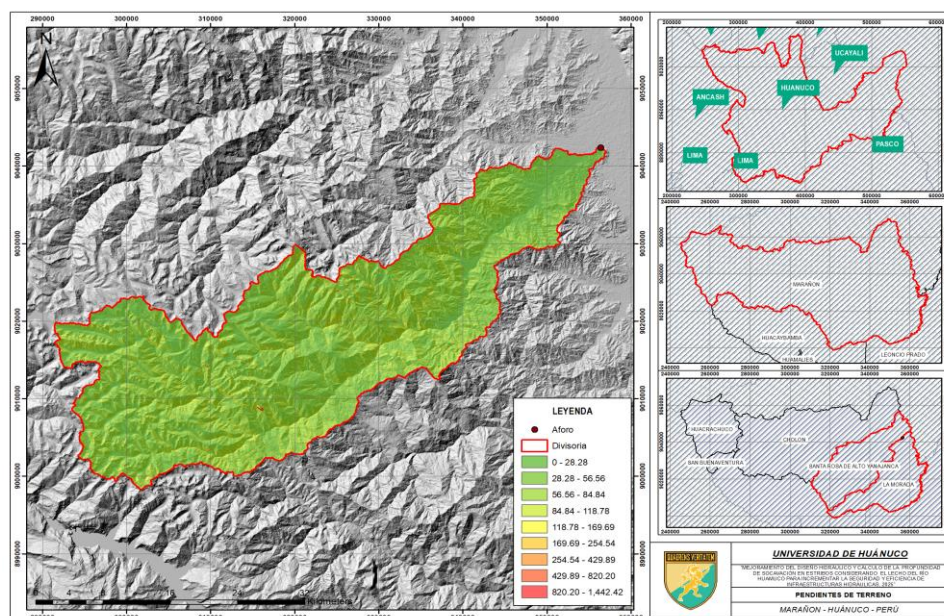
Nota. Curva hipsométrica y distribución de alturas.

En la clasificación altitudinal aplicada a la cuenca de interés se pudo determinar que esta se encuentra en un estado maduro, con la

distribución altitudinal los polígonos de frecuencia representan un alto grado de capacidad erosiva.

Figura 11

Caracterización de pendientes

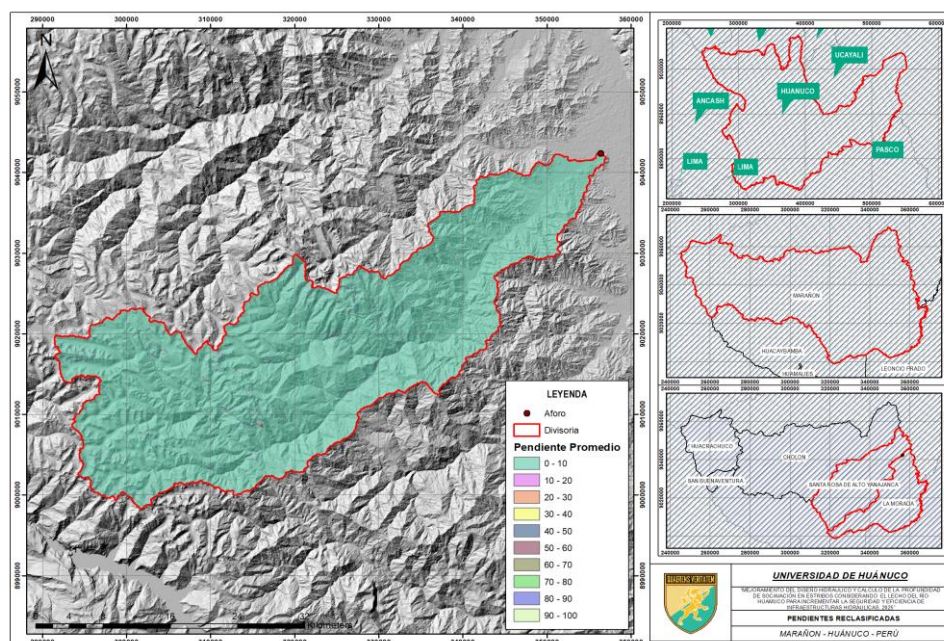


Nota. Pendientes de terreno.

Con la clasificación altitudinal se pudo determinar que la variación de las pendientes es leve en las partes bajas de la cuenca, mientras que para las partes altas las variaciones de pendiente son moderadas.

Figura 12

Reclasificación de pendientes

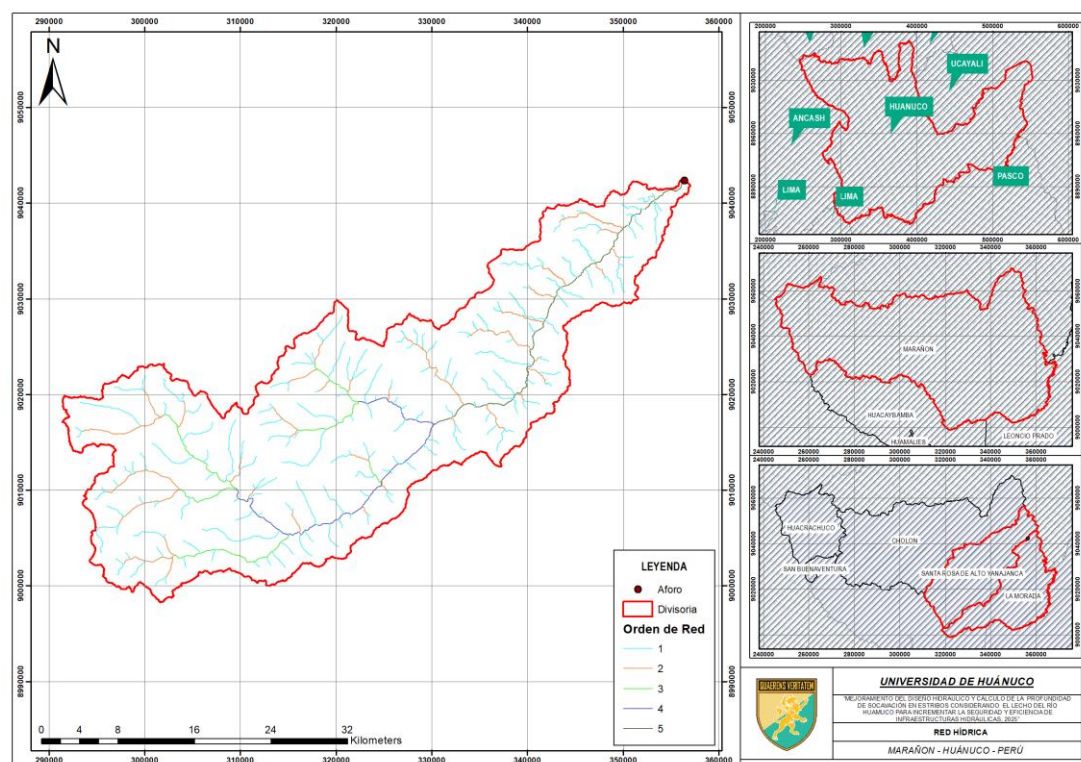


Nota. Modelo reclasificado de pendientes porcentuales.

En la reclasificación porcentual de las pendientes se pudo identificar que en promedio la cuenca se encuentra entre las pendientes de 0% a 10% en gran parte de la cuenca analizada.

Figura 13

Caracterización de la red hídrica



Nota. Red hídrica reclasificada.

Con la identificación de las depresiones y los cauces topográficos formados en el DEM se pudo determinar que la cuenca presenta una red hídrica de 5° grado en cada uno de los recorridos que conforma a la cuenca.

Tabla 3

Parámetros geomorfológicos de la cuenca

Categoría	Parámetro	Valor	Interpretación específica según el valor
Geometría de la cuenca	Área de la cuenca	1126.27 km ²	Se trata de una cuenca de gran extensión, lo que implica un mayor volumen de escorrentía potencial y mayor tiempo de respuesta ante eventos de lluvia.
	Perímetro	315.375 km	Un perímetro elevado indica un contorno irregular, lo que puede influir en la complejidad del flujo y la dispersión del agua.
	Ancho medio	21.50 km	Representa una cuenca relativamente ancha, lo que puede

			dispersar el flujo superficial y reducir su velocidad.
	Longitud máxima	73.66 km	La longitud es considerable, lo cual puede generar un tiempo de concentración elevado si la pendiente no es muy pronunciada.
	Altitud mínima	560 msnm	Ubicada en una zona baja, probablemente cercana al punto de salida de la cuenca, donde se concentran los escurrimientos.
	Altitud máxima	4549 msnm	Zona de cabecera con alta capacidad de generación de escorrentía por pendientes pronunciadas y posibles precipitaciones intensas.
Altimetría	Altitud media	2912.55 msnm	Indica que gran parte de la cuenca se encuentra en zona altoandina, con clima frío y potencial de erosión alta.
	Altitud más frecuente (moda)	3685.50 msnm	La mayor parte del terreno se concentra en altitudes muy elevadas, lo cual sugiere presencia de laderas inclinadas y baja cobertura vegetal.
	Altitud de frecuencia media	2783.79 msnm	Acentúa la alta montaña como característica dominante, lo que influye en la generación de caudales intensos.
Coordenadas del centroide	Coordenada X	322,751.17 m	Representa la ubicación Este del centro geométrico de la cuenca en coordenadas UTM, útil para integración en SIG.
	Coordenada Y	9,019,075.00 m	Coordenada Norte del centroide UTM; permite ubicar la cuenca con precisión espacial.
	Coordenada Z (altitud centroide)	2912.55 msnm	Refuerza que el centro de masa se encuentra en altura, lo cual implica riesgos de escorrentías concentradas en eventos de lluvia.
Pendiente	Pendiente media de la cuenca	5.12%	Pendiente moderada que favorece la escorrentía superficial con una velocidad media, permitiendo acumulaciones de caudal aguas abajo.
	Longitud del cauce principal	45.07 km	Se trata de un cauce extenso, lo que implica mayor oportunidad para la acumulación de aguas de escorrentía a lo largo de su recorrido.
Hidrografía	Orden de la red hídrica	5 (adimensional)	Una red de orden 5 señala una jerarquía hidrológica compleja, con múltiples afluentes contribuyendo al cauce principal.
	Longitud total de la red hídrica	625.37 km	El alto desarrollo de la red favorece una rápida colecta de escorrentía desde diferentes partes de la cuenca.
	Pendiente media de la red hídrica	19.11%	Una pendiente bastante pronunciada, lo que sugiere que el flujo en la red es rápido y puede producir erosión significativa en el cauce.

Nota. Caracterización geométrica de la cuenca.

La cuenca analizada presentó una extensión considerable de 1126.27 km², con una longitud de 73.66 km y un ancho promedio de 21.50 km, lo que la caracterizó como una cuenca grande, con una red hídrica compleja (orden 5) y bien desarrollada, alcanzando una longitud total de 625.37 km. Su altitud media fue de 2912.55 msnm, destacando una altitud máxima de 4549 msnm y una altitud más frecuente de 3685.50 msnm, lo que indicó que la mayor parte del área se encontraba en zonas altoandinas. La pendiente media de la cuenca fue de 5.12%, lo cual favoreció una escorrentía relativamente rápida, mientras que la red hídrica presentó una pendiente más acentuada de 19.11%, sugiriendo flujos con alta energía y potencial erosivo. Además, el cauce principal tuvo una longitud de 45.07 km, lo que permitió un transporte eficiente de caudales hacia aguas abajo. En conjunto, estos parámetros reflejaron que la cuenca tenía una capacidad significativa para generar escorrentía concentrada, especialmente durante eventos de lluvia intensa, implicando un alto potencial de crecidas rápidas y procesos de erosión.

Tabla 4

Parámetros de forma

Nombre del Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Interpretación
Factor de forma	F	0.29	S/N	Cuenca alargada, lo que implica un mayor tiempo de concentración y menor riesgo de avenidas bruscas.
Índice de Gravelius (Compacidad)	K	2.63	S/N	Valor alto, indica una cuenca poco compacta, asociada a una respuesta más lenta ante lluvias.
Rectángulo equivalente (Lado mayor)	L	150.19	km	Indica una cuenca de gran longitud, coherente con su forma alargada.
Rectángulo equivalente (Lado menor)	I	7.5	km	Representa el ancho medio de la cuenca, muy pequeño en comparación con el largo.
Densidad de drenaje	Dd	0.56	u/km ²	Baja densidad de drenaje, lo que indica una red hidrográfica poco desarrollada y mayor infiltración.
Índice de pendiente	Ip	0.24	S/N	Pendiente baja, lo que favorece la infiltración y reduce la velocidad del escurrimiento.

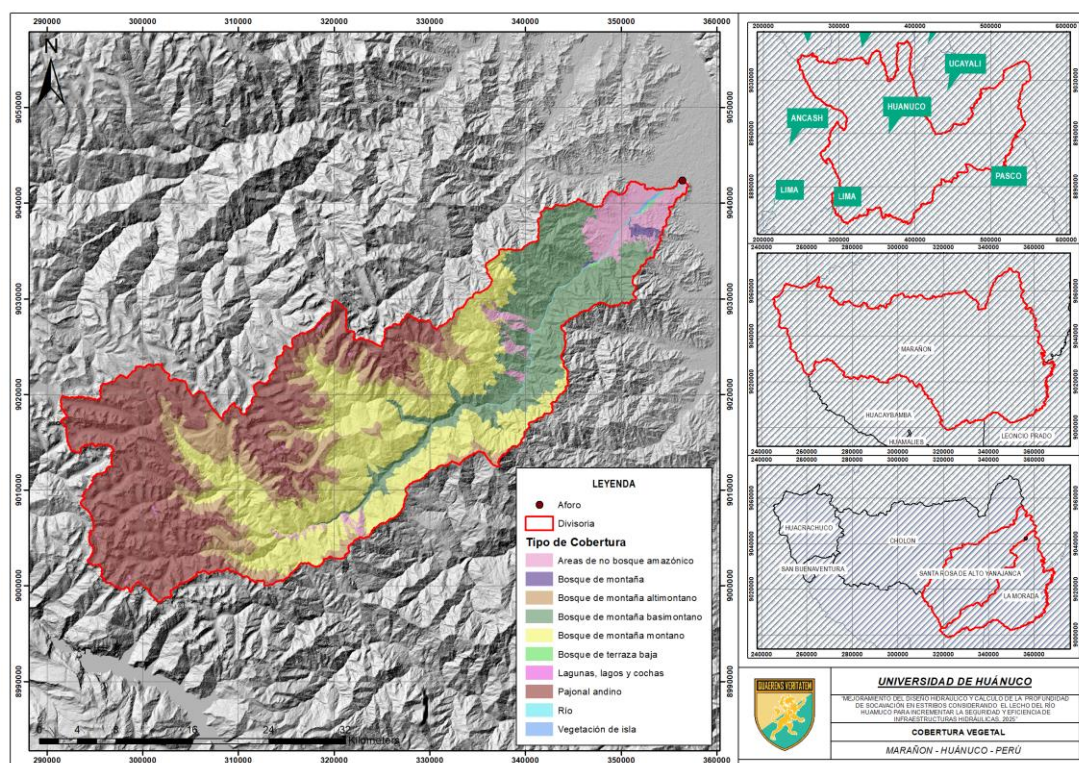
Nota. Caracterización numérica de la cuenca.

La cuenca presentó características geomorfológicas que evidenciaron un comportamiento hidrológico moderado. El factor de forma de 0.29 indicó que la cuenca era alargada, lo cual implicaba un

mayor tiempo de concentración y una menor susceptibilidad a inundaciones súbitas. El índice de Gravelius fue de 2.63, valor elevado que confirmó una baja compacidad y, por tanto, una menor respuesta inmediata ante eventos de lluvia intensa. Asimismo, el rectángulo equivalente mostró una marcada diferencia entre el lado mayor (150.19 km) y el menor (7.50 km), reforzando la morfología alargada. La densidad de drenaje de 0.56 u/km² evidenció una red de drenaje poco densa, lo que sugiere mayor capacidad de infiltración. Finalmente, el índice de pendiente fue bajo (0.24), lo que indicaba pendientes suaves que también contribuyeron a una menor velocidad del escurrimiento superficial.

Figura 14

Cobertura vegetal de la cuenca



Nota. Tipos de cobertura vegetal de la superficie de la cuenca.

Del modelo obtenido de la base de datos del MINAM se pudo obtener que 10 tipos de características diferentes en la cuenca, con ello se pudo caracterizar el tipo de suelo presente en la cuenca.

Tabla 5*Tipos de cobertura vegetal en la cuenca*

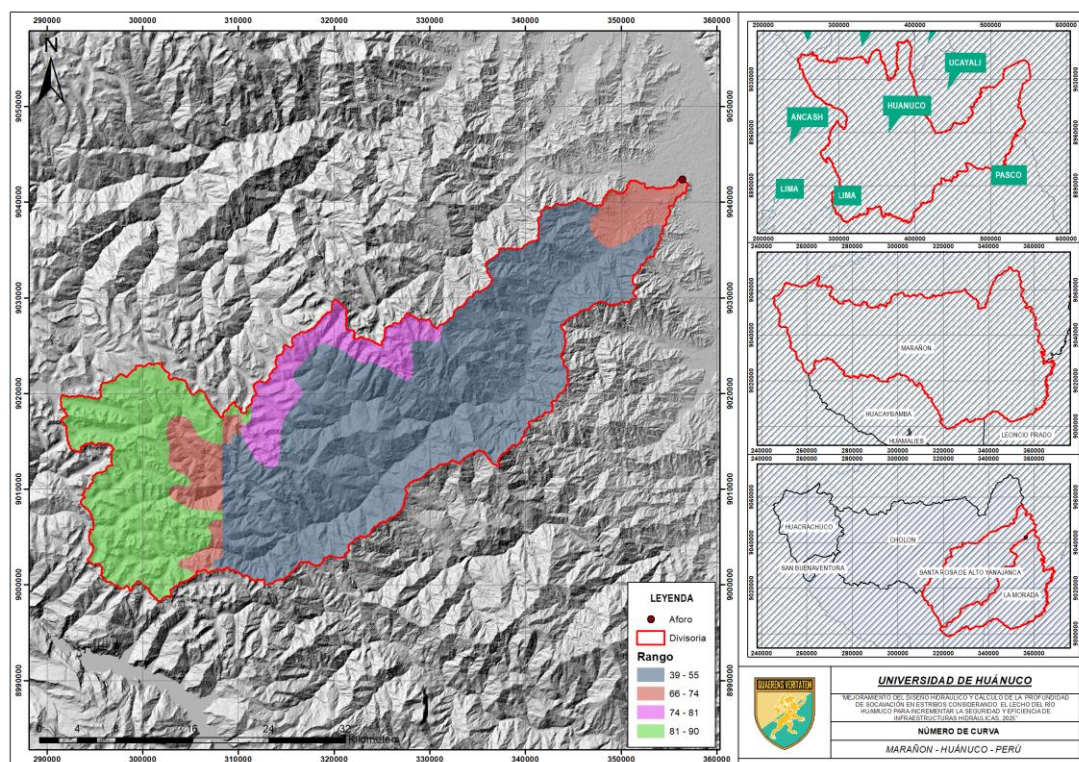
Cobertura Vegetal	Área (km ²)	% del Área Total	Pendiente Promedio (%)	Interpretación
Pajonal andino	370.57	32.84%	5.83%	Es la cobertura dominante; se ubica en zonas con pendientes suaves.
Bosque de montaña montano	337.56	29.92%	49.91%	Ocupa casi un tercio del área; se desarrolla en zonas con fuertes pendientes.
Bosque de montaña basimontano	195.97	17.37%	56.28%	Presente en laderas empinadas; ocupa una proporción importante del territorio.
Bosque de montaña altimontano	152.93	13.55%	27.99%	Se localiza en zonas altas y con pendientes moderadas.
Áreas sin cobertura boscosa amazónica	60.84	5.39%	32.65%	Son zonas sin cobertura forestal en áreas de pendientes medias.
Bosque de montaña	3.64	0.32%	15.15%	Presente en proporción reducida; en sectores de baja pendiente.
Ríos	3.78	0.34%	17.57%	Corresponde a cuerpos de agua en zonas con pendientes moderadas.
Lagunas, lagos y cochas	1.1	0.10%	15.39%	Son cuerpos de agua ubicados en pendientes suaves.
Bosque de terraza baja	1.01	0.09%	57.80%	Cobertura mínima en áreas con pendientes muy altas.
Vegetación de isla	0.86	0.08%	50.74%	Ocupa un área muy reducida en zonas de fuerte pendiente.

Nota. Modelo de cobertura vegetal.

El análisis de coberturas vegetales mostró que el pajonal andino fue la cobertura dominante, ocupando el 32.84% del área en zonas de baja pendiente (5.83%), seguido del bosque de montaña montano (29.92%) y el bosque basimontano (17.37%), ambos en áreas de pendientes elevadas (49.91% y 56.28%, respectivamente). Otras coberturas como cuerpos de agua, vegetación de isla y bosque de terraza baja ocuparon menos del 1% del territorio, aunque algunas se ubicaron en terrenos con pendientes pronunciadas, reflejando una marcada relación entre vegetación y topografía.

Figura 15

Número de curva de cuenca



Nota. Tipo de número de curva.

De la misma manera que en la identificación de los diferentes tipos de cobertura vegetal se pudo determinar que en la información del MINAM la cuenca presenta 04 tipos de rangos de valores de número de curva.

Tabla 6

Estimación de número de curva promedio

Rango (CN)	Media CN	Área (km ²)	% Área	Área * Media	Interpretación
39 – 55	47	691.15	0.61%	32,484.01	Predominan suelos con baja escorrentía e infiltración alta; ocupan la mayor superficie.
66 – 74	70	99.83	0.09%	6,988.29	Suelos con escorrentía moderada; representan una pequeña proporción del área.
74 – 81	77.5	91.93	0.08%	7,124.30	Suelos con escorrentía media-alta, de limitada extensión en la cuenca.
81 – 90	85.5	245.34	0.22%	20,976.85	Áreas con alta escorrentía superficial y baja capacidad de infiltración; moderada extensión.
Promedio			59.89		Refleja condiciones generales de escorrentía media-baja en la cuenca.

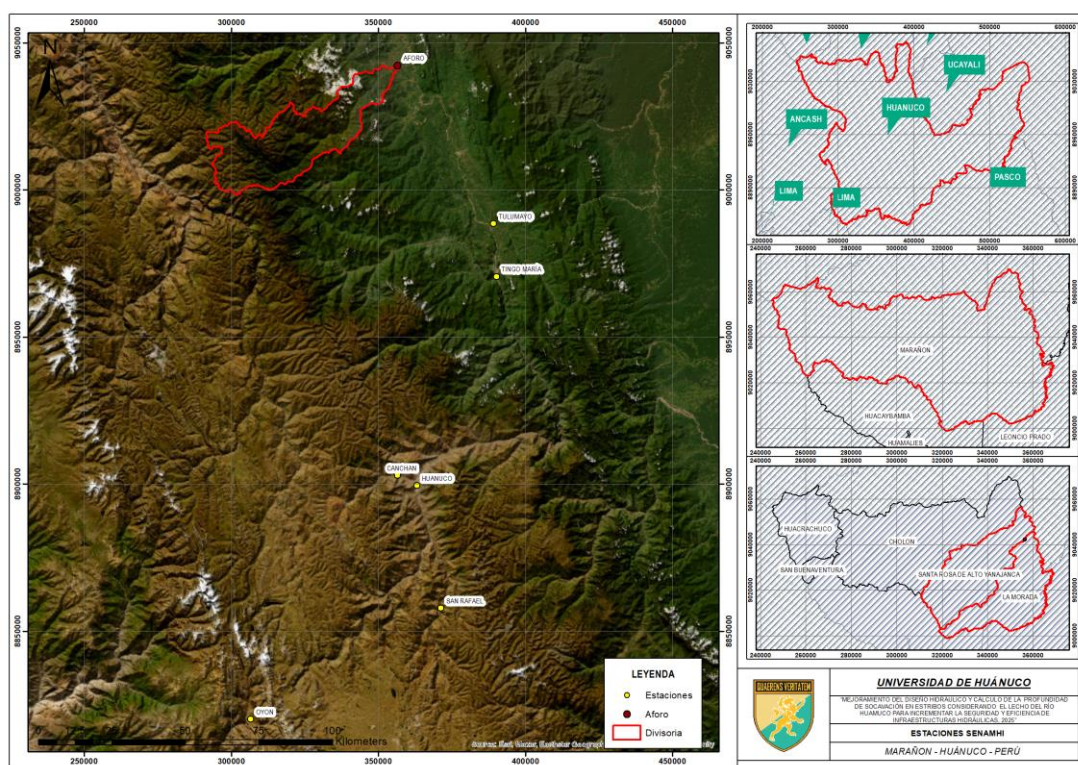
Nota. Valor promedio estimado del número de curva.

La estimación del número de curva mostró que la mayor parte del área de estudio correspondió a rangos de número de curva bajos, especialmente entre 39 y 55, con una media de 47.00 y una superficie de 691.15 ha, lo que indicó suelos con alta capacidad de infiltración y baja escorrentía. En menor proporción se hallaron áreas con números de curva entre 81 y 90 (245.34 km²), reflejando suelos con escorrentía alta y baja infiltración. Las otras categorías, con medias de 70.00 y 77.50, ocuparon superficies aún más reducidas. El número de curva promedio fue de 59.89, lo que permitió interpretar que en general predominaban condiciones de escorrentía baja a moderada en la cuenca analizada.

4.1.2 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA

Figura 16

Identificación de las estaciones meteorológicas



Nota. Identificación de estaciones SENAMHI.

En la identificación de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca de interés se pudo identificar que la más cercana y con características de suelo similares es la que corresponde a la estación Tulumayo, con dicha estación se modelaron los modelos hidráulicos del cauce.

Tabla 7

Registro de precipitaciones estación Tulumayo

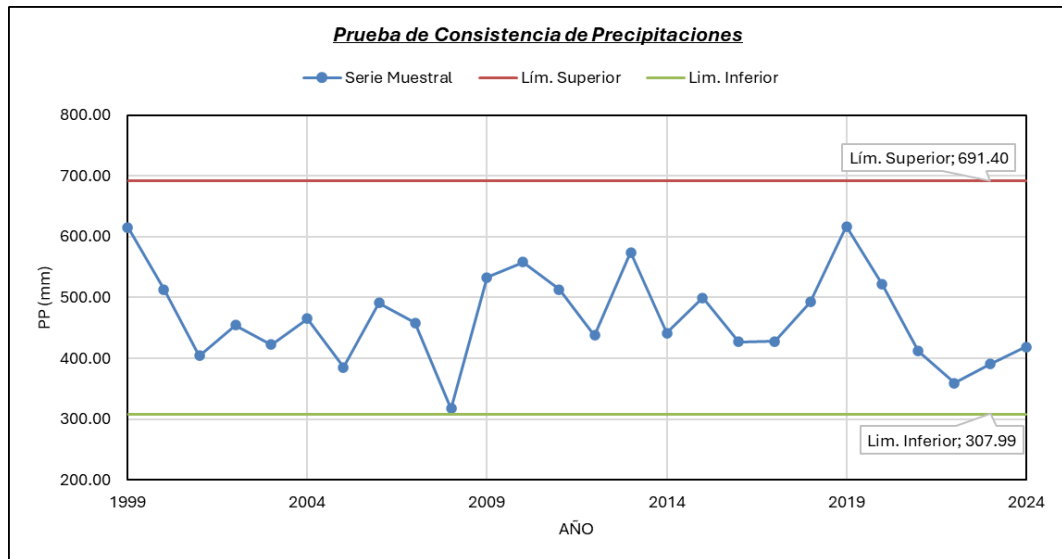
UNIDAD DE ATENCIÓN AL CIUDADANO Y GESTIÓN DOCUMENTAL															
ESTACIÓN: TULUMAYO/000469/DZ10					ALT: 612 MSNM					LONG: 76° 0' 33.97"					
					LAT: 9° 8' 49.4"					DPTO: HUÁNUCO					
PT10 1	PRECIPITACIÓN DIARIA (mm)			TOTAL											
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MAX	MIN	PRO M
1999	615.0 0	396.9 0	438.5 0	96.20	229.9 0	127.2 0	63.70	31.60	136.3 0	104.3 0	181.9 0	210.3 0	615.0 0	31.60	219.3 2
2000	310.4 0	342.2 0	513.1 0	221.3 0	118.9 0	276.9 0	119.3 0	137.6 0	72.60 0	137.7 0	94.60 0	300.3 0	513.1 0	72.60	220.4 1
2001	370.3 0	280.2 0	235.5 0	90.70	327.1 0	95.00	277.1 0	71.70	135.9 0	198.8 0	377.7 0	404.2 0	404.2 0	71.70	238.6 8
2002	372.8 0	454.1 0	295.1 0	251.8 0	239.7 0	77.80	286.7 0	136.7 0	61.70 0	187.1 0	373.7 0	357.8 6	454.1 0	61.70	257.9 2
2003	277.0 0	393.7 0	309.7 0	422.1 0	171.5 0	228.6 0	74.30	180.9 0	228.1 0	189.3 0	268.6 0	404.8 0	422.1 0	74.30	262.3 8
2004	317.2 0	169.7 0	316.6 0	113.6 0	140.5 0	97.80	390.6 0	72.00	124.6 0	191.7 0	465.2 0	239.6 0	465.2 0	72.00	219.9 3
2005	266.5 0	322.8 0	384.7 0	175.3 0	69.60	272.3 0	18.80	65.20	162.3 0	267.6 0	141.1 0	380.4 0	384.7 0	18.80	210.5 5
2006	250.7 0	431.3 0	247.9 0	157.9 0	151.0 0	234.5 0	77.80	169.0 0	109.7 0	267.1 0	418.7 0	491.4 0	491.4 0	77.80	250.5 8
2007	400.2 0	183.6 0	222.4 0	221.2 0	192.5 0	38.00	124.3 0	59.50	55.20 0	252.1 0	249.6 0	458.3 0	458.3 0	38.00	204.7 4
2008	214.8 0	268.4 0	317.3 0	202.2 0	117.5 0	143.9 0	269.3 0	69.60	118.4 0	242.5 0	112.9 0	281.2 0	317.3 0	69.60	196.5 0
2009	320.0 0	407.5 0	284.8 0	206.4 0	372.6 0	168.7 0	148.5 0	125.9 0	123.5 0	136.1 0	300.8 0	533.1 0	533.1 0	123.5 0	260.6 6
2010	191.7 0	557.9 0	261.6 0	240.0 0	100.4 0	48.30	122.1 0	30.50	31.50 0	109.1 0	282.4 0	264.2 0	557.9 0	30.50	186.6 4
2011	389.7 0	513.5 0	201.1 0	174.5 0	131.7 0	129.9 0	158.5 0	31.10	194.6 0	245.5 0	192.3 0	309.8 0	513.5 0	31.10	222.6 8
2012	365.8 0	437.3 0	257.9 0	287.3 0	148.0 0	213.3 0	40.70	57.20	80.90 0	168.4 0	321.3 0	272.5 0	437.3 0	40.70	220.8 8
2013	275.9 0	574.1 0	445.0 0	169.5 0	181.6 0	139.3 0	87.90	191.0 0	123.2 0	332.2 0	274.9 0	214.8 0	574.1 0	87.90	250.7 8
2014	441.8 0	244.0 0	359.8 0	107.3 0	209.7 0	104.1 0	177.2 0	44.90	273.1 0	151.1 0	288.2 0	398.4 0	441.8 0	44.90	233.3 0
2015	499.4 0	260.2 0	326.3 0	147.5 0	372.3 0	157.0 0	209.1 0	99.30	52.70 0	177.7 0	242.8 0	384.8 0	499.4 0	52.70 0	244.0 9
2016	347.1 0	427.0 0	240.7 0	208.9 0	125.6 0	108.7 0	44.20 0	102.3 0	68.20 0	135.3 0	388.8 0	338.2 0	427.0 0	44.20 0	211.2 5
2017	427.7 0	387.6 0	239.6 0	238.5 0	208.0 0	197.0 0	50.10 0	111.9 0	175.4 0	218.6 0	357.6 0	426.9 0	427.7 0	50.10 0	253.2 4
2018	350.5 0	189.5 0	227.2 0	179.3 0	107.7 0	150.2 0	10.00 0	179.5 0	95.30 0	387.4 0	492.7 0	309.3 0	492.7 0	10.00 0	223.2 2
2019	362.8 0	204.6 0	497.1 0	135.9 0	124.7 0	144.7 0	124.4 0	28.10 0	51.80 0	266.6 0	249.0 0	616.9 0	616.9 0	28.10 0	233.8 8
2020	521.6 0	298.6 0	310.4 9	189.0 5	181.8 6	144.6 3	129.7 7	75.50 0	119.3 0	94.10 0	244.8 0	335.4 0	521.6 0	75.50 0	220.4 3
2021	366.0 0	146.7 0	311.8 0	264.4 0	158.9 0	166.9 0	112.4 0	120.0 0	103.5 0	180.9 0	412.1 0	281.4 0	412.1 0	103.5 0	218.7 5
2022	327.2 0	352.9 0	358.8 0	167.9 0	182.4 0	153.5 0	73.30 0	144.2 0	165.6 0	243.6 0	133.5 0	283.1 0	358.8 0	73.30 0	215.5 0
2023	239.8 0	306.9 0	206.0 0	87.10	161.9 0	71.60	158.1 0	45.60	119.6 0	143.9 0	364.6 0	390.3 0	390.3 0	45.60 0	191.2 8
2024	418.9 0	342.0 5	263.8 0	159.5 0	202.9 0	70.60	25.80	78.50	23.60 0	229.5 0	319.9 0	416.9 0	418.9 0	23.60 0	212.6 6
MAX	615.0 0	574.1 0	513.1 0	422.1 0	372.6 0	276.9 0	390.6 0	191.0 0	273.1 0	387.4 0	492.7 0	616.9 0			
MIN	191.7 0	146.7 0	201.1 0	87.10	69.60	38.00	10.00	28.10	23.60	94.10	94.60	210.3 0			
PRO M	355.4 2	342.0 5	310.4 9	189.0 5	181.8 6	144.6 3	129.7 7	94.59	115.6 4	202.2 4	290.3 7	357.8 6			

Nota. Registro general de precipitaciones.

Los registros de precipitación se obtuvieron en solicitud dirigida al SENAMHI, de ello se tuvieron un total de 25 registros anuales de precipitación, de ellos se obtuvieron los valores máximos, mínimos y promedios.

Figura 17

Prueba de consistencia

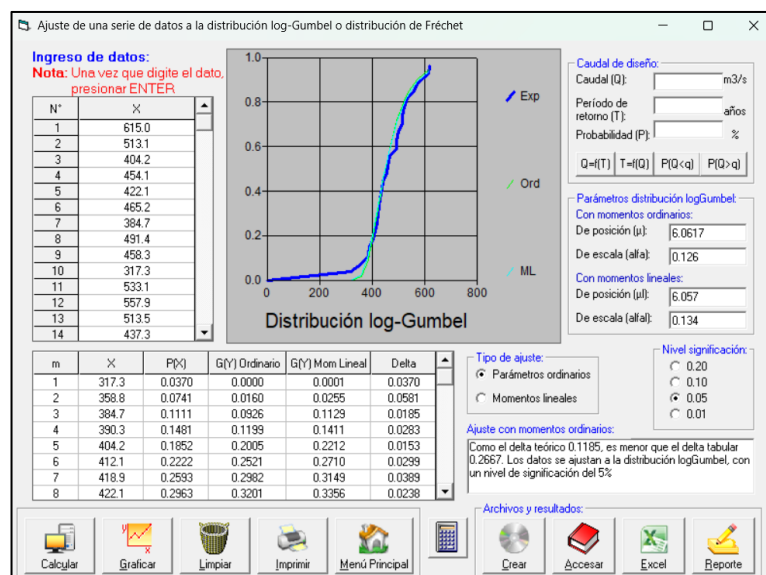


Nota. Aplicación Outlier en estación.

Con la identificación de los valores de precipitación se determinaron los valores máximos y mínimos, para los cuales los valores son de 691.40 mm como máximo y 307.99 mm como mínimo, de ello se pudo verificar que los valores críticos de precipitación se encuentran dentro de los rangos aceptables demostrando la consistencia de los valores de precipitación.

Figura 18

Análisis de Distribución Log-Gumbel



Nota. Modelo de distribución Log-Gumbel.

De las precipitaciones máximas identificadas en la estación Tulumayo, se aplicó la prueba de bondad por diferentes distribuciones, con la finalidad de determinar la distribución con un mejor ajuste con la cual se puedan proyectar los valores de precipitación en diferentes periodos de retorno, para el caso de la Distribución Log-Gumbel el valor de ajuste es de 0.1185.

Tabla 8

Prueba de bondad de ajuste

PRUEBA DE BONDAD	
NOMBRE	VARIACIÓN
Distribución Normal	0.0771
Distribución Log-Normal 2P	0.0588
Distribución Log-Normal 3P	0.0684
Distribución Gamma 2P	0.0621
Distribución Gamma 3P	0.0611
Distribución Gumbel	0.0970
Distribución Log-Gumbel	0.1185
Distribución Log-Normal 2P	0.0588

Nota. Valores de ajuste para precipitaciones máximas.

La prueba de bondad en las precipitaciones máximas aplicables a la muestra se pudo determinar que el menor valor de diferencia es de 0.0588 correspondiente a la distribución Log-Normal 2P, con dicha distribución se estimaron los valores de precipitación en diferentes periodos de retorno.

Tabla 9

Valores de precipitación en diferentes periodos de retorno

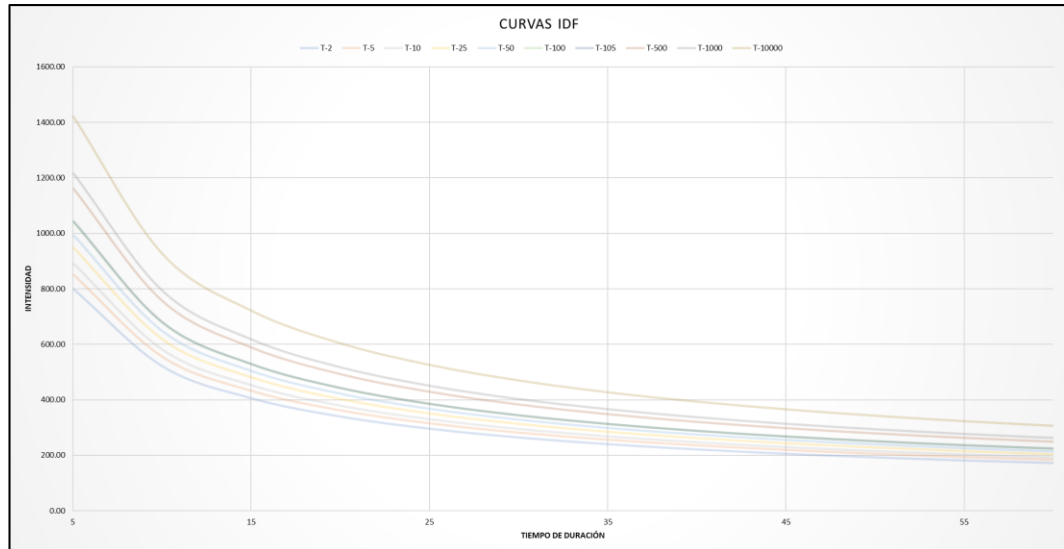
PRECIPITACIONES MÁXIMAS			
PERIODO DE RETORNO	PP	PROBABILIDAD DE NO EXCEDENCIA	PP AJUSTADA (1.13)
2	461.46	0.50000	521.4498
5	528.67	0.80000	597.3971
10	567.66	0.90000	641.4558
25	612.39	0.96000	692.0007
50	643.13	0.98000	726.7369
100	672.1	0.99000	759.4730
105	674.08	0.99048	761.7104
500	734.77	0.99800	830.2901
1000	760.38	0.99900	859.2294
10000	841.68	0.99990	951.0984

Nota. Valores de precipitación predichas.

Con la distribución óptima determinada se procedió a realizar el cálculo de los diferentes valores de precipitación, para un periodo de retorno de 50 años el valor de precipitación es de 643.13 mm, con dichos valores se pudo determinar los valores de la curva IDF.

Figura 19

Modelo de curva IDF para cuenca

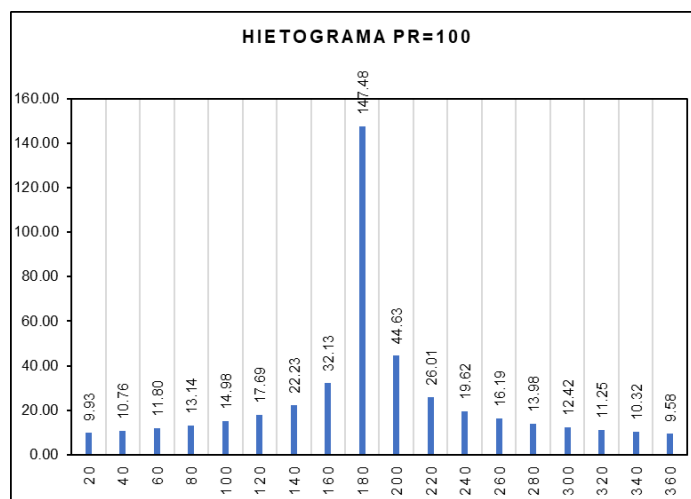


Nota. Modelo de estimación de curva IDF para la cuenca.

Con los valores en diferentes periodos de retorno estimados para la cuenca facilitaron la interpolación para los valores de intensidad en diferentes periodos de retorno.

Figura 20

Hietograma de diseño PR 100 años



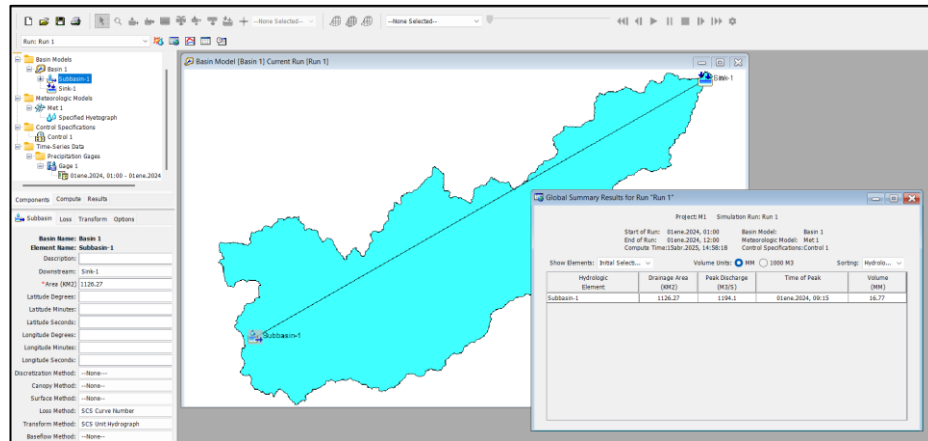
Nota. Hietograma de diseño 100 años.

Con la caracterización geomorfológica de la cuenca se pudo determinar que la cuenca de interés presenta un tiempo de

concentración de 6 horas, con ello se pudo estimar el hietograma de diseño, teniendo un valor pico de 147.48 mm/h, en un tiempo de 180 min siendo la mitad del tiempo de concentración estimado.

Figura 21

Modelo Hec-HMS PR 100 años

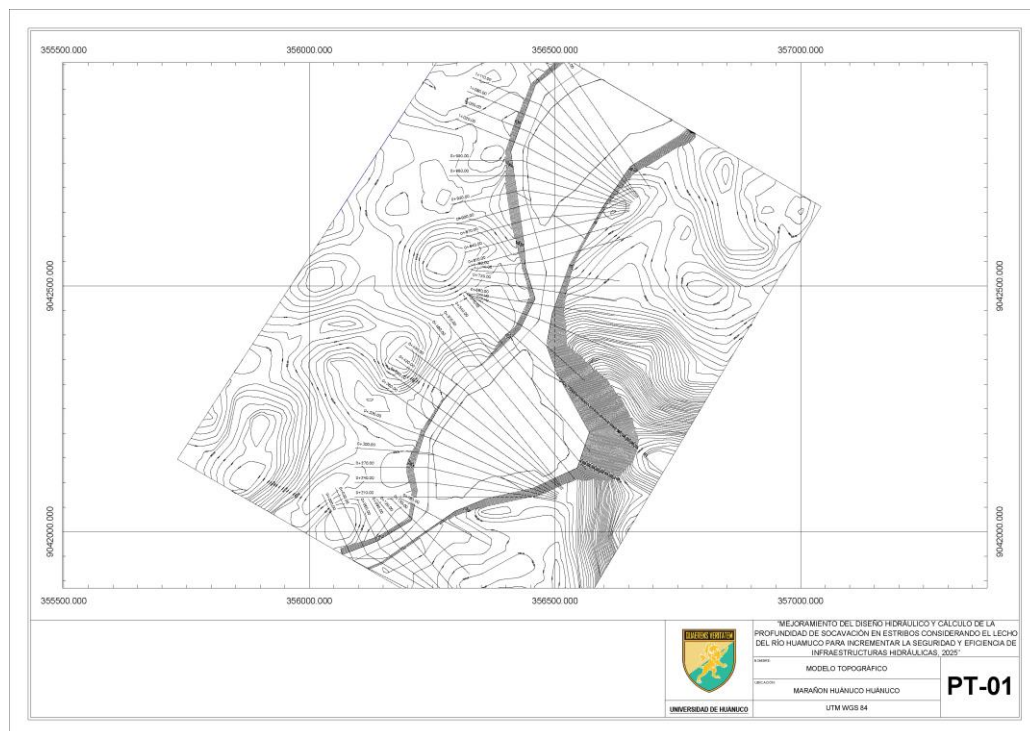


Nota. Interfaz de aplicación para caudal.

Con los valores del hietograma de diseño y con la caracterización geomorfológica de la cuenca se pudo determinar que el valor de caudal es de 1194.10 m³/s. Con ello se realizaron los modelos hidráulicos correspondientes para el cauce del río.

Figura 22

Modelo topográfico de la zona de interés

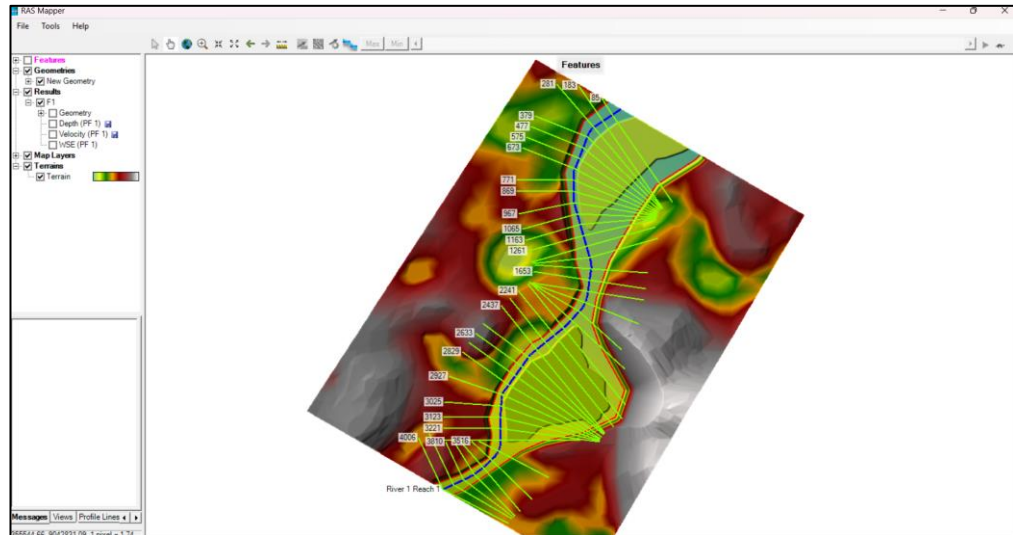


Nota. Modelo topográfico de la zona de interés.

Para la realización del modelo topográfico de la zona de interés se realizó a partir de la aplicación de una estación total con la cual se levantó un aproximado de 900 m a lo largo del cauce del río Huamuco.

Figura 23

Modelo hidráulico HEC-RAS

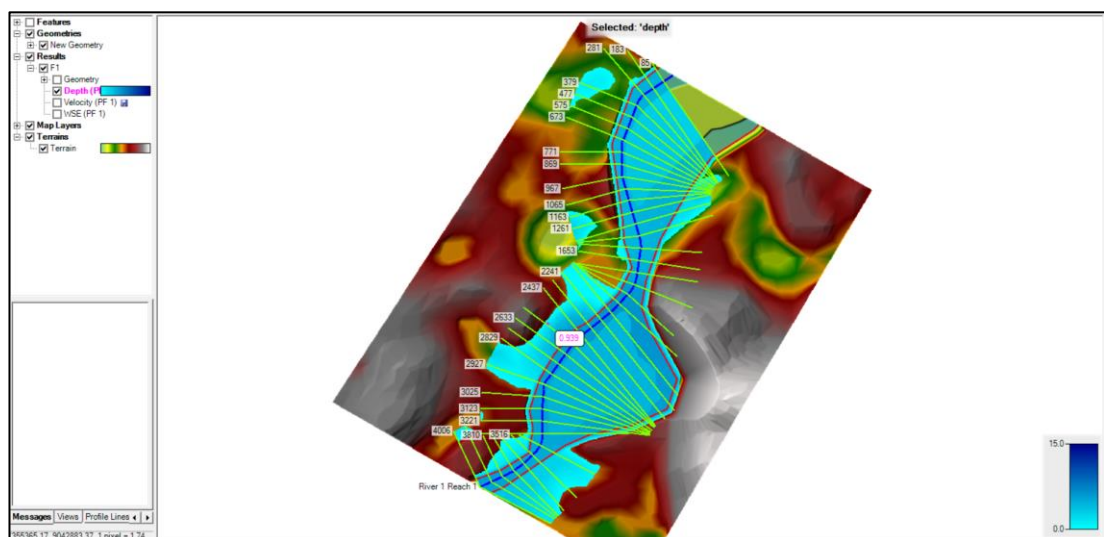


Nota. Modelo inicial para el procesamiento hidráulico.

Con el modelo topográfico obtenido en la zona de interés se pudo obtener el modelo DEM para el procesamiento en el software HEC-RAS, dicho modelo sirvió de base para la simulación del caudal en la zona de interés para un periodo de retorno de 100 años.

Figura 24

Resultado de simulación – Tirantes

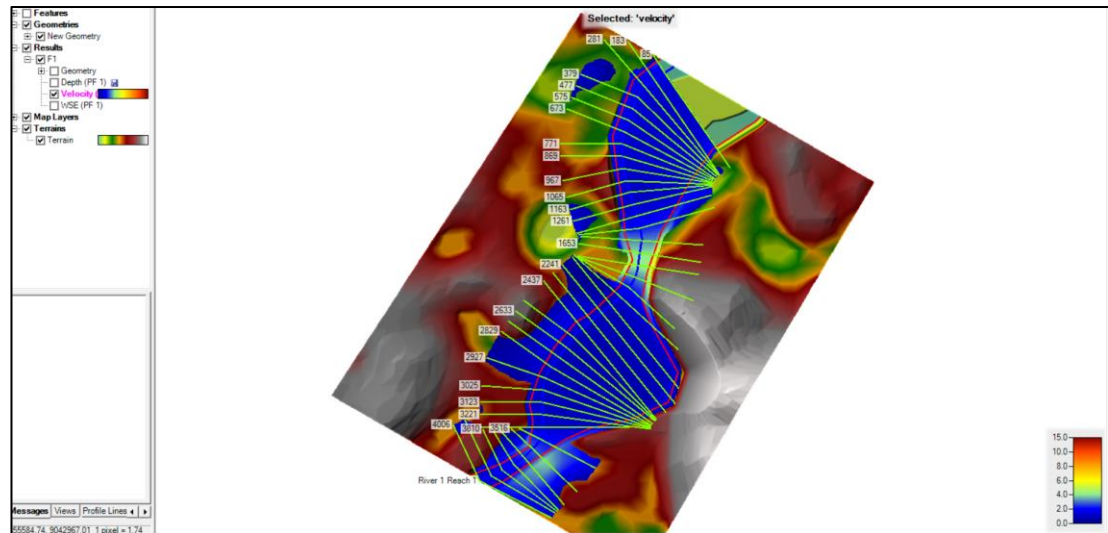


Nota. Modelo de caudales.

Con el ingreso de la información hidrológica al software HEC-RAS se pudo procesar la información tal que se determinaron los valores de tirante basado en el modelo DEM de la zona, llegando hasta los 5 m en las zonas más críticas.

Figura 25

Modelo de velocidades HEC-RAS



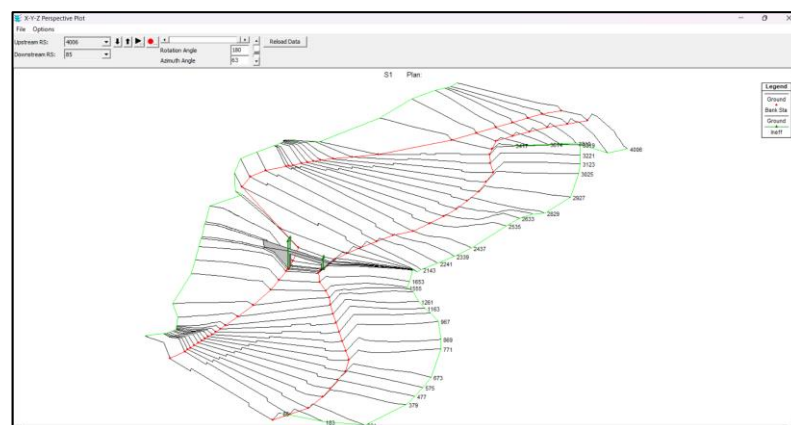
Nota. Información visual de intensidad de velocidad.

Con el modelo HEC-RAS se pudo determinar el espectro de velocidades en la zona de interés, obteniendo así que la zona con una alta concentración de velocidad es la contracción que une los márgenes del río Huamuco el cual comprende a la ubicación espacial del puente analizado, presentado así que llega hasta los 6.00 m/s, con ello se inició el modelo de socavación.

4.1.3 MODELOS DE SOCAVACIÓN APLICADOS

Figura 26

Modelamiento HEC-RAS para la socavación

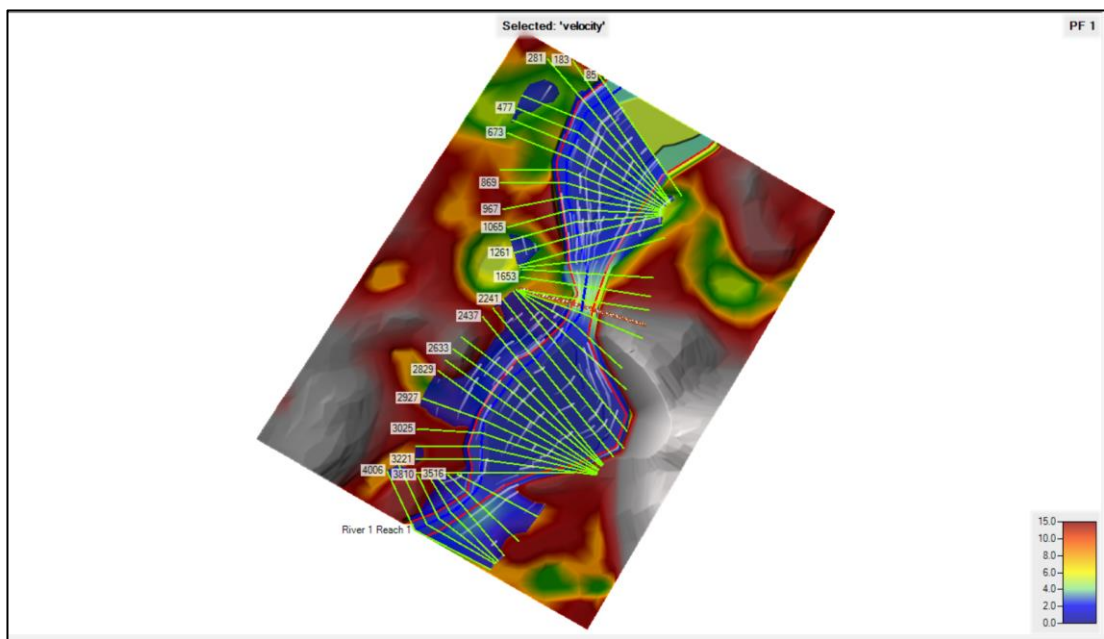


Nota. Modelo incluido al puente.

El modelo hidráulico para la socavación se basa en la aplicación de los modelos de desgaste sobre una estructura, en el caso de la presente investigación se hizo el modelo del puente teniendo en cuenta las dimensiones de los estribos y de la luz de dicho puente, con ello se modela un ejemplo simplificado con el periodo de inundación de 100 años.

Figura 27

Modelo de velocidad de flujo

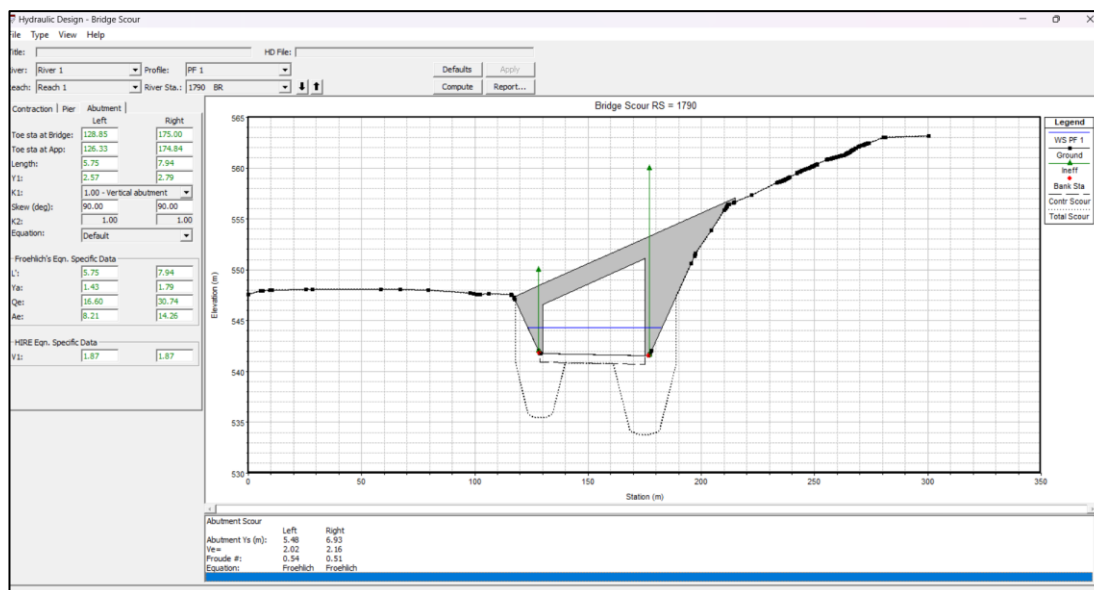


Nota. Modelo de flujo .

Con la ejecución del modelo de inundación en el software HEC-RAS se pudo determinar que la velocidad de flujo para la zona en donde se encuentra los estribos del puente llega hasta los 8 m/s con ello se iniciaron los procesos de estimación de socavación.

Figura 28

Resultados socavación modelo HEC-RAS



Nota. Modelo de socavación.

Con el modelo hidráulico realizado y con la estimación de velocidades en diferentes tramos del cauce del río Huamuco se pudo determinar que los valores de socavación son de 5.48 m en el estribo izquierdo y de 6.93 m en el estribo derecho.

Tabla 10

Socavación por diferentes metodologías

Método	Socavación izquierda (m)	Socavación derecha (m)	Socavación modelada izquierda (m)	Socavación modelada derecha (m)	Variación (%) Izq	Variación (%) Der.
Liu, Chang y Skinner	7.50	7.74			36.82%	11.68%
Artamonov	5.14	6.80			6.17%	1.82%
Laursen	NP	NP	5.48	6.93	NP	NP
Froehlich	14.26	14.79			160.19%	113.35%
Melville	9.69	10.00			76.82%	44.31%
HIRE	35.34	36.96			544.86%	433.38%

Nota. Estimación de socavación por metodologías.

Con el modelo HEC-RAS y con las características hidráulicas del río Huámuco se pudo determinar que el modelo aplicable que mejor se ajusta al simulado con el software HEC-RAS es el modelo de Artamonov con valores de 5.14 m para el estribo izquierdo y 6.80 para el estribo derecho.

4.1.4 PLANTEAMIENTO DE MEJORA HIDRÁULICA

Tabla 11

Parámetros hidráulicos considerados

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Descripción
Velocidad media del flujo	V	4.2	m/s	Velocidad estimada del agua en la sección crítica
Profundidad media del flujo	h	5	m	Profundidad promedio del flujo en zona de estribos
Peso específico de la roca	γ_s	2.65	t/m ³	Valor típico para roca densa (roca angular)
Peso específico del agua	γ_w	1	t/m ³	Valor estándar para agua dulce
Coeficiente de estabilidad	Ks	0.86	—	Valor para roca angular según bibliografía técnica
Aceleración de la gravedad	g	9.81	m/s ²	Constante universal

Nota. Valores hidráulicos del modelo.

Los parámetros hidráulicos determinan las condiciones de diseño del colchón de enrocado. Se ha considerado una velocidad media del flujo de 4.2 m/s y una profundidad media de 5.0 m, lo que representa un régimen de corriente significativo. La roca utilizada tiene un peso específico de 2.65 t/m³, mientras que el agua presenta su valor estándar de 1.0 t/m³. Se ha empleado un coeficiente de estabilidad de 0.86, adecuado para enrocado angular, y se ha utilizado la aceleración gravitacional de 9.81 m/s² en los cálculos. Estos parámetros han permitido dimensionar el diámetro medio del enrocado en 1.48 m, garantizando la resistencia del colchón frente al arrastre hidráulico.

Tabla 12

Estimación del enrocado

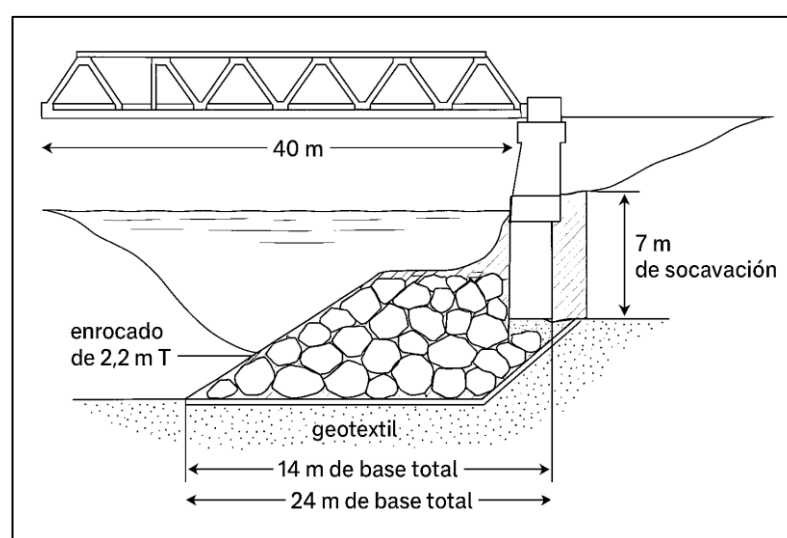
Parámetro	Valor	Unidad	Observación
Diámetro medio del enrocado (D_{50})	1.48	m	Determinado por fórmula de Isbash
Espesor del colchón (T)	2.2	m	$1.5 \times D_{50}$
Longitud aguas arriba	14	m	$2 \times$ profundidad de socavación (7 m)
Longitud aguas abajo	14	m	Igual que aguas arriba

Ancho lateral desde el estribo	5	m	A cada lado del estribo
Ancho total del colchón	24	m	Incluye ancho del estribo + protección lateral
Profundidad de la zanja de anclaje	1.5	m	Recomendado para evitar desplazamientos por socavación
Tipo de material de filtro	Geotextil	—	Para evitar migración de finos

Nota. Dimensionamiento de colchón antisocavante.

Figura 29

Esquema de modelo de enrocado



Nota. Modelo esquematizado.

El colchón antisocavante propuesto tiene un diámetro medio de las rocas (D_{50}) de 1.48 metros, con un espesor mínimo de 2.2 metros, calculado como 1.5 veces el diámetro medio. El colchón se extiende 14 metros aguas arriba y 14 metros aguas abajo del estribo, con un ancho de 5 metros en cada lado, resultando en un ancho total de 24 metros. Además, la zanja de anclaje tiene una profundidad de 1.5 metros para asegurar el sistema y evitar desplazamientos, garantizando una protección efectiva contra la socavación del puente modular.

4.2 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS Y PRUEBA DE HIPÓTESIS

Hg: Si se mejora el diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco, entonces se incrementará la seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas.

Tabla 13

Estimación del enrocado

Parámetro	Valor	Unidad	Observación
Diámetro medio del enrocado (D_{50})	1.48	m	Determinado por fórmula de Isbash
Espesor del colchón (T)	2.2	m	$1.5 \times D_{50}$
Longitud aguas arriba	14	m	$2 \times$ profundidad de socavación (7 m)
Longitud aguas abajo	14	m	Igual que aguas arriba
Ancho lateral desde el estribo	5	m	A cada lado del estribo
Ancho total del colchón	24	m	Incluye ancho del estribo + protección lateral
Profundidad de la zanja de anclaje	1.5	m	Recomendado para evitar desplazamientos por socavación
Tipo de material de filtro	Geotextil	—	Para evitar migración de finos

Nota. Dimensionamiento de colchón antisocavante.

El colchón de enrocado fue diseñado con un diámetro medio de piedra (D_{50}) de 1.48 m, determinado mediante la fórmula de Isbash. Su espesor fue de 2.2 m, equivalente a 1.5 veces el D_{50} , asegurando la estabilidad frente al arrastre hidráulico. La longitud de protección aguas arriba y aguas abajo fue de 14 m en cada sentido, considerando el doble de la profundidad estimada de socavación (7 m). Lateralmente, se dispuso una protección de 5 m a cada lado del estribo, lo que resultó en un ancho total del colchón de 24 m, incluyendo el estribo y la protección lateral. Para su anclaje, se ejecutó una zanja de 1.5 m de profundidad. Como material filtrante, se utilizó geotextil, con el fin de evitar la migración de finos y garantizar la estabilidad del sistema. Con la aplicación de diversas metodologías para la estimación de la socavación se pudo determinar las profundidades críticas de socavación, con ello se pudo plantear la estructuración de colchones antisocavante con la

finalidad de asegurar la estabilidad de los estribos del puente analizado, con ello se pudo verificar que la hipótesis general es verdadera en su planteamiento.

He₁: Si se analizan las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco, entonces se comprenderá mejor su influencia en la profundidad de socavación en estribos.

Tabla 14

Parámetros de forma

Nombre del Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Interpretación
Factor de forma	F	0.29	S/N	Cuenca alargada, lo que implica un mayor tiempo de concentración y menor riesgo de avenidas bruscas.
Índice de Gravelius (Compacidad)	K	2.63	S/N	Valor alto, indica una cuenca poco compacta, asociada a una respuesta más lenta ante lluvias.
Rectángulo equivalente (Lado mayor)	L	150.19	km	Indica una cuenca de gran longitud, coherente con su forma alargada.
Rectángulo equivalente (Lado menor)	I	7.5	km	Representa el ancho medio de la cuenca, muy pequeño en comparación con el largo.
Densidad de drenaje	Dd	0.56	u/km ²	Baja densidad de drenaje, lo que indica una red hidrográfica poco desarrollada y mayor infiltración.
Índice de pendiente	Ip	0.24	S/N	Pendiente baja, lo que favorece la infiltración y reduce la velocidad del escurrimiento.

Nota. Caracterización numérica de la cuenca.

La cuenca presentó características geomorfológicas que evidenciaron un comportamiento hidrológico moderado. El factor de forma de 0.29 indicó que la cuenca era alargada, lo cual implicaba un mayor tiempo de concentración y una menor susceptibilidad a inundaciones súbitas. El índice de Gravelius fue de 2.63, valor elevado que confirmó una baja compacidad y, por tanto, una menor respuesta inmediata ante eventos de lluvia intensa. Asimismo, el rectángulo equivalente mostró una marcada diferencia entre el lado mayor (150.19 km) y el menor (7.50 km), reforzando la morfología alargada. La densidad de drenaje de 0.56 u/km² evidenció una red de drenaje poco densa, lo que sugiere mayor capacidad de infiltración. Finalmente, el índice de pendiente fue bajo (0.24), lo que indicaba pendientes suaves que también contribuyeron a una menor velocidad del escurrimiento superficial. Con la caracterización hidráulica y morfológica del río Huamuco y de su

respectiva cuenca se pudo analizar de manera más precisa su comportamiento frente a crecidas críticas de caudal, con lo obtenido se pudo verificar que la hipótesis específica planteada es verdadera.

He₂: Si se desarrolla un método mejorado para el cálculo de la profundidad de socavación en estribos incorporando variables representativas del comportamiento del lecho del río Huamuco, entonces se obtendrán estimaciones más precisas de la socavación.

Tabla 15

Socavación por diferentes metodologías

Método	Socavación izquierda (m)	Socavación derecha (m)	Socavación modelada izquierda (m)	Socavación modelada derecha (m)	Variación (%) Izq	Variación (%) Der.
Liu, Chang y Skinner	7.50	7.74			36.82%	11.68%
Artamonov	5.14	6.80			6.17%	1.82%
Laursen	NP	NP	5.48	6.93	NP	NP
Froehlich	14.26	14.79			160.19%	113.35%
Melville	9.69	10.00			76.82%	44.31%
HIRE	35.34	36.96			544.86%	433.38%

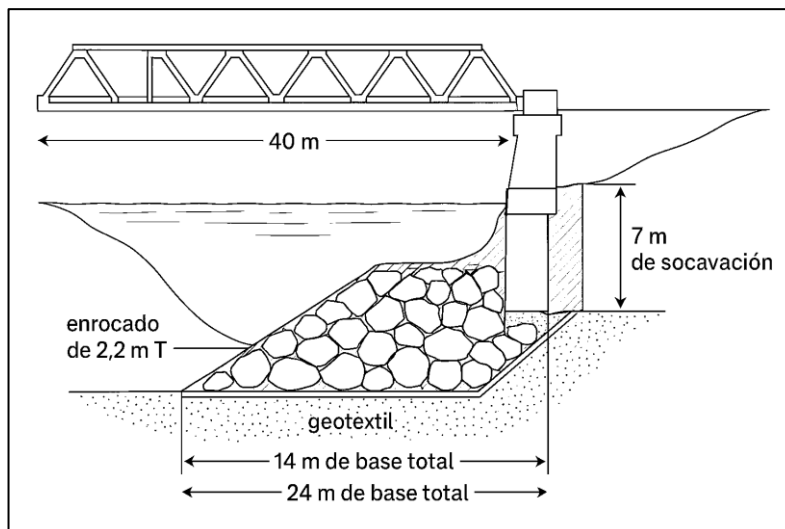
Nota. Estimación de socavación por metodologías.

Con el modelo HEC-RAS y con las características hidráulicas del río Huámucó se pudo determinar que el modelo aplicable que mejor se ajusta al simulado con el software HEC-RAS es el modelo de Artamonov con valores de 5.14 m para el estribo izquierdo y 6.80 para el estribo derecho. La estimación incluyendo valores representativos del cauce en las diferentes metodologías se pudo determinar que el método más preciso y que guarda una mejor relación con el simulado es la metodología de Artamonov, con ello se pudo verificar que al aplicar características del cauce en la estimación de la socavación esta se ajusta de mejor manera, con ello se valida la hipótesis específica planteada.

He₃: Si se diseña una solución hidráulica optimizada para reducir los efectos de la socavación en estribos, entonces se mejorará la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco.

Figura 30

Esquema de modelo de enrocado



Nota. Modelo esquematizado.

El colchón antisocavante propuesto tiene un diámetro medio de las rocas (D_{50}) de 1.48 metros, con un espesor mínimo de 2.2 metros, calculado como 1.5 veces el diámetro medio. El colchón se extiende 14 metros aguas arriba y 14 metros aguas abajo del estribo, con un ancho de 5 metros en cada lado, resultando en un ancho total de 24 metros. Además, la zanja de anclaje tiene una profundidad de 1.5 metros para asegurar el sistema y evitar desplazamientos, garantizando una protección efectiva contra la socavación del puente modular. Con ello se verifica que al plantear una medida de contención de socavación se mejoran la estabilidad de las infraestructuras del puente del río Huamuco.

He4: La propuesta de una nueva fórmula de cálculo preponderado de acuerdo con las características y propiedades que considere cada método aplicado permitirá establecer un valor más seguro en cuanto a la estimación de la socavación en la zona de estudio.

Tabla 16

Socavación por diferentes metodologías

Método	Socavación izquierda (m)	Socavación derecha (m)	Socavación modelada izquierda (m)	Socavación modelada derecha (m)	Variación (%) Izq	Variación (%) Der.
Liu, Chang y Skinner	7.50	7.74	5.48	6.93	36.82%	11.68%
Artamonov	5.14	6.80			6.17%	1.82%
Laursen	NP	NP			NP	NP

Froehlich	14.26	14.79		160.19%	113.35%
Melville	9.69	10.00		76.82%	44.31%
HIRE	35.34	36.96		544.86%	433.38%

Nota. Estimación de socavación por metodologías.

En la aplicación de las diversas metodologías se pudo determinar que la óptima para su estimación es la que mejor se ajusta con el modelo simulado en el software HEC-RAS, con ello se pudo validar que la última hipótesis específica es verdadera.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Quito (2020) propuso el uso de enrocados como una medida de protección para los estribos del puente, una estrategia que también implementamos en nuestra investigación con un colchón de enrocado diseñado con un D_{50} de 1.48 m y un espesor de 2.2 m ($1.5 \times D_{50}$). Ambos estudios coinciden en que el uso de enrocados es una medida efectiva para mitigar los efectos de la socavación, ya que proporciona una barrera física que protege los estribos del arrastre hidráulico y mejora la estabilidad de las infraestructuras frente a la erosión. En lo que respecta a las características hidráulicas y morfológicas del río Huamuco, nuestra investigación determinó que la cuenca tiene una forma alargada, con un factor de forma de 0.29 y un índice de Gravelius de 2.63, lo cual refleja una baja compacidad y una respuesta más lenta ante eventos de lluvias intensas. Estos hallazgos coinciden con lo reportado por Quito (2020), quien también resaltó la importancia de conocer las características del cauce para mejorar el diseño hidráulico. Ambos estudios destacan lo fundamental que es realizar un análisis detallado de la morfología del río en las etapas iniciales del diseño, con el fin de predecir y reducir los efectos de la socavación. En relación con el cálculo de la profundidad de socavación, ambos trabajos coinciden en la relevancia de utilizar modelos matemáticos que permitan simular las condiciones del cauce y anticipar los efectos de la socavación. En nuestro caso, se empleó el modelo de Artamonov, que permitió estimar una profundidad de socavación de 5.14 m en el estribo izquierdo y 6.80 m en el estribo derecho, con un margen de ajuste del 6 %. Por su parte, Quito (2020) también aplicó simulaciones computacionales y modelos matemáticos para determinar la profundidad máxima de socavación en el río Rímac. Ambos estudios evidencian que el uso de modelos numéricos avanzados es esencial para realizar predicciones precisas y optimizar el diseño de estructuras hidráulicas en contextos donde el caudal es altamente variable. Los resultados obtenidos en nuestra investigación son coherentes con los de Quito (2020), sobre todo en cuanto al uso de enrocados para proteger los estribos y la aplicación de modelos matemáticos que permitan estimar con exactitud la

socavación. Ambos trabajos concluyen que un diseño estructural optimizado, basado en un análisis profundo de las características del cauce y el uso de medidas de protección adecuadas, es clave para garantizar la seguridad y durabilidad de las obras hidráulicas en ríos con gran variabilidad de caudal.

Chegne (2023) por su parte, utilizó el modelo numérico HEC-RAS para simular el flujo y predecir la socavación local, una herramienta que también fue utilizada en nuestra investigación para calcular la profundidad de socavación en los estribos del río Huamuco. Ambos estudios coinciden en que los modelos numéricos son fundamentales para comprender la dinámica de la socavación y anticipar los efectos de eventos extremos, como las avenidas de caudal, sobre las infraestructuras hidráulicas. En nuestra investigación, el modelo de Artamonov fue aplicado para estimar la profundidad de socavación en los estribos del puente, lo cual guarda similitud con la aplicación de HEC-RAS por parte de Chegne. Esta coincidencia resalta la utilidad de los modelos numéricos para lograr predicciones precisas de fenómenos de socavación en diferentes entornos.

Ambos estudios analizaron los efectos que generan las avenidas extremas sobre las infraestructuras hidráulicas. En el caso del trabajo realizado por Chegne (2023), se estudió la socavación local durante eventos de máximas avenidas en el río Yaminchad, encontrando que estos eventos causaban una socavación considerable alrededor de los estribos. De forma similar, en nuestra investigación, los caudales calculados para un periodo de retorno de 100 años, que abarcan situaciones de avenidas extremas, evidenciaron un impacto significativo en la profundidad de socavación en los estribos del río Huamuco. Esta coincidencia entre ambos estudios respecto a la importancia de considerar condiciones extremas, resalta la necesidad de incluir estos eventos en el diseño de infraestructuras hidráulicas y en los análisis de riesgo por socavación.

Chegne (2023) propuso reforzar las bases del puente y construir obras complementarias de defensa ribereña como medidas de protección frente a los efectos de la socavación. En nuestra investigación, se planteó una solución similar, basada en la implementación de un colchón antisocavante con enrocado para proteger los estribos y reducir la erosión. Ambos enfoques reflejan la importancia de aplicar medidas estructurales específicas para

resguardar las infraestructuras ante los daños causados por la socavación, especialmente en zonas donde hay una alta probabilidad de avenidas extremas. Los resultados obtenidos en ambos estudios coinciden en la necesidad de utilizar modelos numéricos para anticipar los fenómenos de socavación en ríos con alta variabilidad de caudal, así como en la importancia de aplicar medidas estructurales de protección para reducir sus efectos. La utilización de herramientas como HEC-RAS y el modelo de Artamonov, junto con las simulaciones de flujo, demuestran ser métodos efectivos para evaluar y mejorar el diseño de infraestructuras hidráulicas en condiciones extremas de caudal. La implementación de medidas estructurales, como enrocados y colchones antisocavantes, en ambos estudios es clave para garantizar la estabilidad y durabilidad de las infraestructuras en el largo plazo.

CONCLUSIONES

De la mejora del diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación se pudo concluir, se planteó un colchón de enrocado con un D_{50} de 1.48 m, calculado con la fórmula de Isbash. Su espesor fue de 2.2 m ($1.5 \times D_{50}$), y se definió una longitud de protección de 14 m aguas arriba y aguas abajo, considerando el doble de la profundidad de socavación estimada en 7 m.

Del análisis de las características hidráulicas y morfológicas se pudo concluir, que la cuenca era alargada, con un factor de forma de 0.29 y un índice de Gravelius de 2.63, lo que indicó baja compacidad y menor respuesta ante lluvias intensas. El rectángulo equivalente mostró una marcada diferencia entre sus lados (150.19 km y 7.50 km), reforzando esta morfología. La densidad de drenaje fue de 0.56 u/km², sugiriendo buena infiltración, y el índice de pendiente fue bajo (0.24).

Del desarrollo del método óptimo para la profundidad de socavación se pudo concluir, que el modelo aplicable que mejor se ajusta al simulado con el software HEC-RAS es el modelo de Artamonov con valores de 5.14 m para el estribo izquierdo y 6.80 para el estribo derecho. La estimación incluyendo valores representativos del cauce en las diferentes metodologías se pudo determinar que el método más preciso y que guarda una mejor relación con el cauce del río.

Del diseño de la solución hidráulica se pudo concluir, para la presente investigación se optó por el diseño de un colchón antisocavante el cual optimice la estabilidad de los elementos estructurales del puente teniendo en cuenta cada una de las características identificadas en la caracterización hidráulica.

De la propuesta de la aplicación de la fórmula de socavación se pudo concluir, que la óptima para su estimación es la que mejor se ajusta con el modelo simulado en el software HEC-RAS, con ello se pudo validar que la última hipótesis específica es verdadera, siendo el modelo de Artamonov el óptimo con un ajuste mínimo del 6% en promedio siendo el menor de todos los modelos analizados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda implementar este diseño de colchón antisocavante en futuros proyectos hidráulicos similares, especialmente en zonas con condiciones hidráulicas comparables, a fin de mejorar la seguridad estructural de los estribos y cumplir con el objetivo general de optimizar el diseño hidráulico frente a la socavación.

Se recomienda que en futuras evaluaciones de diseño hidráulico se incluyan análisis morfológicos detallados del lecho fluvial, pues estos permiten entender la dinámica de escurrimiento y anticipar zonas vulnerables a socavación, en concordancia con el objetivo específico de analizar las características hidráulicas y morfológicas del río Huamuco.

Se recomienda priorizar el uso del modelo de Artamonov en proyectos de infraestructura hidráulica en el río Huamuco y otros similares, ya que permite una estimación más precisa de la profundidad de socavación, contribuyendo al objetivo de desarrollar métodos mejorados para su cálculo.

Se recomienda replicar este tipo de solución hidráulica en diseños de infraestructura donde se evidencie riesgo por socavación en estribos, alineándose con el objetivo de diseñar soluciones estructurales que incrementen la eficiencia y seguridad de las obras hidráulicas.

Se recomienda formalizar la aplicación de la fórmula de Artamonov como método preponderante en manuales técnicos para estimación de socavación en estribos, cumpliendo con el objetivo de proponer una fórmula de cálculo adaptada a las condiciones hidráulicas locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade Ortega, A. F. (2023). *Evaluación de la socavación en el Puente de la Calle 10 de Agosto - Azogues*. Azogues: Universidad Católica de Cuenca.
- Asociación Peruana de Ingeniería Civil. (2021). *Estudio de Fallas en Infraestructuras Viales por Socavación*. Lima.
- Autoridad Nacional del Agua. (2022). *Evaluación de Eficiencia Hidráulica en Canales de Riego*. Lima: ANA - Ministerio de Agricultura y Riego.
- Canales Pichen, M. L. (2021). *Evaluación de riesgos existentes por erosión fluvial en el estribo izquierdo del Puente Colpa Alta - 2019*. Huánuco: Universidad Nacional Hermilio Valdizán.
- Chegne Salazar, R. (2023). *Predicción de la socavación local en el puente Yaminchad para máximas avenidas, utilizando un modelo numérico, San Pablo-Cajamarca, 2022*. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca Facultad de Ingeniería.
- Diario AHORA. (19 de Enero de 2024). Obtenido de <https://ahora.com.pe/puente-sobre-río-huamuco-en-peligro-de-colpasar-por-intensas-lluvias/>
- Flores Paredes. (2019). *Modelos de Cálculo de Socavación en Canales Fluviales*. Lima: Editorial Andina.
- García García. (2020). *Hidráulica de Ríos y Socavación*. Lima: Editorial Universitaria.
- García Torres. (2018). *Dinámica Fluvial y Erosión del Terreno*. Arequipa: Editorial Hidrotécnica.
- Gutiérrez Valverde, P. (2018). *Diseño Hidráulico de Obras de Drenaje*. Lima: Editorial Ingeniería Civil.
- Guzmán. (2016). *Teoría de la Socavación en Ríos Fluviales*. Arequipa: Editorial Técnica.
- Hernández. (2017). *Geomorfología y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Lima: Editorial Universitaria.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México: McGraw-Hill.

- López. (2017). *Factores Hidráulicos en la Erosión Fluvial*. Lima: Ediciones Hidrotécnicas.
- Martínez Sánchez, C. (2018). *Control Hidráulico y Socavación en Ríos*. Lima: Ediciones Hidrotécnicas.
- Matamoros Castro, F. (2020). *Diseño hidráulico y estructural de espigones frente a la socavación de los estribos del Puente Matapuquio Pariahuanca - Junín*. Huancayo: Universidad Peruana los Andes.
- Melville, B. W., & Coleman, S. E. (2000). *Bridge Scour*. Oxford, Reino Unido: Water Resources Publications.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2020). *Informe técnico sobre la vulnerabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco*. Lima, Perú: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Morales. (2017). *Modelos Empíricos en Hidráulica Fluvial*. Lima: Editorial Técnica.
- Morales, J. (2019). *Hidrología de cuencas: Principios y aplicaciones*. Lima: Editorial Universitaria.
- Quito Crispin, D. (2020). *Evaluación de la socavación total para la optimización de diseño del puente solidaridad en el distrito San Juan de Lurigancho, 2017*. Lima : Universidad Cesar Vallejo.
- Ramírez Espinoza, C. (2019). *Hidráulica Fluvial y Métodos de Socavación*. Arequipa: Editorial Andina.
- Ramos. (2018). *Hidráulica Fluvial y Socavación*. Lima: Editorial Técnica.
- Robles Cabrera, A. (2022). *Determinación del grado de socavación producido por el Río Higuera a los estribos del puente Daniel Alomía Robles, Huánuco - 2021*. Huánuco: Universidad De Huánuco.
- Rojas Fernández, L. (2020). *Estudio Hidrológico de Cuencas en el Perú*. Huancayo: Editorial Técnica Andina.
- Sáenz Rojas, G. (2023). *Influencia de la socavación en la estabilidad de los estribos en el puente la esperanza del río Huallaga, Huánuco*. Huánuco: Universidad De Huánuco.
- Sánchez. (2017). *Hidráulica Fluvial y Control de Erosión*. Lima: Editorial Hidráulica.
- Sánchez Martínez, A. (2021). *Hidrología Aplicada: Análisis de Riesgos*. Arequipa: Editorial Universidad del Sur.

- Torres Salinas, R. (2020). *Simulación Hidrológica con HEC-HMS*. Trujillo: Editorial Ingeniería Ambiental.
- Vargas Cárdenas, J. (2020). *Procesos de Erosión y Dinámica Fluvial*. Lima: Ediciones Hidráulicas.
- Vega. (2019). *Socavación y Seguridad Estructural en Obras Hidráulicas*. Lima: Editorial Universitaria.
- Zhuang, Y., Li, H., & Liu, W. (2015). *Scour around bridge piers and abutments: Modeling and prediction*. *Journal of Hydraulic Engineering*. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000918](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000918)

COMO CITAR ESTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Atencio Vilca, A. R. (2025). *Mejoramiento del diseño hidráulico y cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando el lecho del río Huamuco para incrementar la seguridad y eficiencia de infraestructuras hidráulicas, 2025* [Tesis de pregrado, Universidad de Huánuco]. Repositorio Institucional UDH. <http://...>

ANEXOS

ANEXO 1

RESOLUCIÓN DE APROBACIÓN DEL PROYECTO DE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO Facultad de Ingeniería

RESOLUCIÓN N° 0471-2025-D-FI-UDH

Huánuco, 19 de marzo de 2025

Visto, el Oficio N° 0297-2025-C-PAIC-FI-UDH, mediante el cual el Coordinador Académico de Ingeniería Civil, remite el dictamen de los jurados revisores, del Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: **"MEJORAMIENTO DEL DISEÑO HIDRÁULICO Y CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS CONSIDERANDO EL LECHO DEL RÍO HUAMUCO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD Y EFICIENCIA DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS, 2025"**, presentado por el (la) Bach. **Ailton Rai ATENCIO VILCA**.

CONSIDERANDO:

Que, mediante Resolución N° 006-2001-R-AU-UDH, de fecha 24 de julio de 2001, se crea la Facultad de Ingeniería, y;

Que, mediante Resolución de Consejo Directivo N° 076-2019-SUNEDU/CD, de fecha 05 de junio de 2019, otorga la Licencia a la Universidad de Huánuco para ofrecer el servicio educativo superior universitario, y;

Que, mediante Resolución N° 2149-2024-D-FI-UDH, de fecha 01 de octubre de 2024, perteneciente al Bach. **Ailton Rai ATENCIO VILCA** se le designó como ASESOR(A) de Tesis al Mg. William Paolo Taboada Trujillo, docente adscrito al Programa Académico de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería, y;

Que, según Oficio N° 0297-2025-C-PAIC-FI-UDH, del Coordinador Académico quien informa que los JURADOS REVISORES del Trabajo de Investigación (Tesis) intitulado: **"MEJORAMIENTO DEL DISEÑO HIDRÁULICO Y CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS CONSIDERANDO EL LECHO DEL RÍO HUAMUCO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD Y EFICIENCIA DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS, 2025"**, presentado por el (la) Bach. **Ailton Rai ATENCIO VILCA**, integrado por los siguientes docentes: Mg. Yelen Lisseth Trujillo Ariza (Presidente), Mg. Ingrid Delia Dignarda Arteaga Espinoza (Secretario) y Mg. Leonel Marlo Aguilar Alcantara (Vocal), por lo que se declaran APTO por mayoría para ser ejecutado el Trabajo de Investigación (Tesis), y;

Estando a las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

SE RESUELVE:

Artículo Primero. - APROBAR, el Trabajo de Investigación (Tesis) y su ejecución intitulado: **"MEJORAMIENTO DEL DISEÑO HIDRÁULICO Y CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS CONSIDERANDO EL LECHO DEL RÍO HUAMUCO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD Y EFICIENCIA DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS, 2025"**, presentado por el (la) Bach. **Ailton Rai ATENCIO VILCA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero(a) Civil, del Programa Académico de Ingeniería Civil, de la Universidad de Huánuco.

Artículo Segundo. - El Trabajo de Investigación (Tesis) deberá ejecutarse hasta un plazo máximo de 1 año de su Aprobación. En caso de incumplimiento podrá solicitar por única vez la ampliación del mismo (6 meses).

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
[Firma]
Ing. Ethel Juvenal Muñoz Lazo
SECRETARÍA ACADÉMICA



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
[Firma]
Mg. Bertha Campos Ruiz
DECANO

Distribución:

Fac. de Ingeniería - PAIC - Asesor - Exp. Graduando - Informado - Archivo.
SCB/EJM/vls.

ANEXO 2

RESOLUCIÓN DE NOMBRAMIENTO DE ASESOR

UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO *Facultad de Ingeniería*

RESOLUCIÓN N° 2149-2024-D-FI-UDH

Huánuco, 01 de octubre de 2024

Visto, el Oficio N° 1471-2024-C-PAIC-FI-UDH presentado por el Coordinador del Programa Académico de Ingeniería Civil y el Expediente N° 510830-0000008778, del Bach. **Ailton Rai ATENCIO VILCA**, quien solicita Asesor de Tesis, para desarrollar el trabajo de investigación (Tesis).

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo a la Nueva Ley Universitaria 30220, Capítulo V, Art 45º inc. 45.2, es procedente su atención, y;

Que, según el Expediente N° 510830-0000008778, presentado por el (la) Bach. **Ailton Rai ATENCIO VILCA**, quien solicita Asesor de Tesis, para desarrollar su trabajo de investigación (Tesis), el mismo que propone al Mg. William Paolo Taboada Trujillo, como Asesor de Tesis, y;

Que, según lo dispuesto en el Capítulo II, Art. 27 y 28 del Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad de Huánuco vigente, es procedente atender lo solicitado, y;

Estando a Las atribuciones conferidas al Decano de la Facultad de Ingeniería y con cargo a dar cuenta en el próximo Consejo de Facultad.

SE RESUELVE:

Artículo Primero. - DESIGNAR, como Asesor de Tesis del Bach. **Ailton Rai ATENCIO VILCA** al Mg. William Paolo Taboada Trujillo, Docente del Programa Académico de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería.

Artículo Segundo. - El interesado tendrá un plazo máximo de 6 meses para solicitar revisión del Trabajo de Investigación (Tesis). En todo caso deberá de solicitar nuevamente el trámite con el costo económico vigente.

REGÍSTRESE, COMUNÍQUESE Y ARCHÍVESE



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
FACULTAD DE INGENIERÍA
[Firma]
Ing. Ethel Inés Manzano Lozano
SECRETARIA DOCENTE



UNIVERSIDAD DE HUÁNUCO
[Firma]
Mg. Bertha Campos Ríos
DECANA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Distribución:

Fac. de Ingeniería - PAIC - Asesor - Mat. y Reg. Acad. - Intercedente - Archivo.
BLCKEJML/nte.

ANEXO 3

MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla 17

Matriz de Consistencia

TÍTULO: “MEJORAMIENTO DEL DISEÑO HIDRÁULICO Y CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE SOCAVACIÓN EN ESTRIBOS CONSIDERANDO EL LECHO DEL RÍO HUAMUCO PARA INCREMENTAR LA SEGURIDAD Y EFICIENCIA DE INFRAESTRUCTURAS HIDRÁULICAS, 2025”

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
Problema General: ¿Cómo se puede mejorar el diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco para incrementar la seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas?	Objetivo general Mejorar el diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación en estribos, considerando las características del lecho del río Huamuco, para incrementar la seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas.	Hipótesis general Si se mejora el diseño hidráulico y el cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco, entonces se incrementará la seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas.	Técnicas: Observación directa. Entrevista de manera opcional. Revisión documental.
Problemas Específicos: ¿De qué manera las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco influyen en la profundidad de socavación en estribos?	Objetivos específicos Analizar las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco para determinar su influencia en la profundidad de socavación en estribos.	Hipótesis específicas HE1: Si se analizan las características hidráulicas y morfológicas del lecho del río Huamuco, entonces se comprenderá mejor su influencia en la profundidad de socavación en estribos.	Instrumento: Estaciones totales y GPS. Software especializado como HEC-HMS y ArcGIS.
¿Cómo se puede desarrollar un método mejorado para el cálculo de la profundidad de socavación en estribos, incorporando variables representativas del comportamiento del lecho del río Huamuco?	Desarrollar un método mejorado para el cálculo de la profundidad de socavación en estribos, incorporando variables representativas del comportamiento del lecho del río Huamuco.	HE2: Si se desarrolla un método mejorado para el cálculo de la profundidad de socavación en estribos incorporando variables representativas del comportamiento del lecho del río Huamuco, entonces se obtendrán estimaciones más precisas de la socavación.	
¿Qué tipo de solución hidráulica optimizada puede reducir los efectos de la socavación en	Diseñar una solución hidráulica optimizada que reduzca los efectos de la socavación en		

estribos y mejorar la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco? ¿Cómo se puede formular un nuevo cálculo preponderado de acuerdo a las características y propiedades que considere cada método aplicado para la estimación de la socavación?		estribos y mejore la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco. Proponer una nueva fórmula de cálculo preponderado de acuerdo a las características y propiedades que considere cada método aplicado para la estimación de la socavación.	HE3: Si se diseña una solución hidráulica optimizada para reducir los efectos de la socavación en estribos, entonces se mejorará la estabilidad de las infraestructuras hidráulicas en el río Huamuco. HE4: La propuesta de una nueva fórmula de cálculo preponderado de acuerdo a las características y propiedades que considere cada método aplicado permitirá establecer un valor más seguro en cuanto a la estimación de la socavación en la zona de estudio.
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN Enfoque Cuantitativo. Alcance o Nivel Descriptivo. Diseño No experimental.		POBLACIÓN Y MUESTRA Población Los cortes transversales del río Huamuco, que une a los poblados de Santa Rosa de lo Alto Yanajanca y La Morada en la provincia de Marañón, en Huánuco. Muestra Los cortes transversales 0+900 del río Huamuco, que une a los poblados de Santa Rosa de lo Alto Yanajanca y La Morada en la provincia de Marañón, en Huánuco.	VARIABLES Variable 1: Diseño hidráulico y cálculo de la profundidad de socavación en estribos considerando las características del lecho del río Huamuco. Variable 2: Seguridad y eficiencia de las infraestructuras hidráulicas.

ANEXO 4

INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Figura 31

Ubicación de área de investigación



Tabla 18*Clasificación de alturas*

Min	Max	Promedio	Áreas (Km²)	Área Acumulada	Área Sobre la Curva	Áreas en %	Área Sobre la Curva (%)
560	1041	800.5	76.42	76.42	1051.82	6.77	93.23
1041	1517	1279	74.35	150.77	977.48	6.59	86.64
1517	1969	1743	95.70	246.47	881.78	8.48	78.15
1969	2386	2177.5	119.68	366.14	762.10	10.61	67.55
2386	2771	2578.5	145.74	511.89	478.87	12.92	54.63
2771	3165	2968	137.49	649.38	478.87	12.19	42.44
3165	3526	3345.5	157.10	806.48	321.77	13.92	28.52
3526	3845	3685.5	200.92	1007.41	120.84	17.81	10.71
3845	4549	4197	120.84	1128.25	0.00	10.71	0.00

Tabla 19*Clasificación de red hídrica*

Hidrografía de la cuenca					
Orden	Cantidad	Longitud (Km)	Coincidencias (A)	Pendiente prom (B)	A *B
1	190	355.51	29033	21.58	626665.05
2	37	130.27	10567	16.32	172401.15
3	6	53.21	4314	18.87	81385.47
4	2	41.32	3182	16.48	52439.94
5	1	45.07	3538	9.75	34483.62
Longitud Total		625.37	50634.00		967375.24
Pendiente promedio				19.11	

Tabla 20*Clasificación de pendiente de cuenca*

PENDIENTE DE LA CUENCA				
Pendientes		Promedio (A)	Ocurrencia (B)	A * B
Min	Max			
0	10	5	7144156	35720780
10	20	15	71426	1071390
20	30	25	4067	101675
30	40	35	728	25480
40	50	45	252	11340
50	60	55	120	6600
60	70	65	37	2405
70	80	75	34	2550
80	90	85	27	2295
90	100	95	24	2280
Total			7220871.00	36946795.00
Pendiente promedio de la Cuenca			5.12	

Figura 32

Distribución Normal

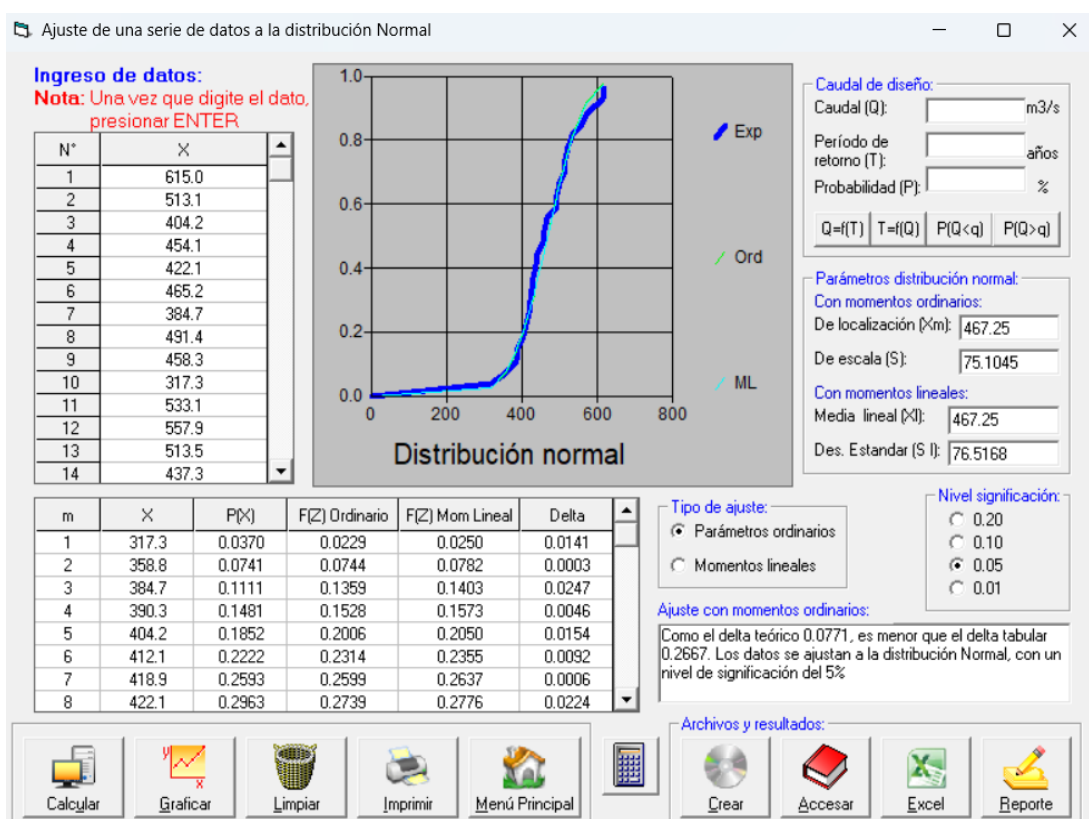


Figura 33

Distribución Log-Normal 2P

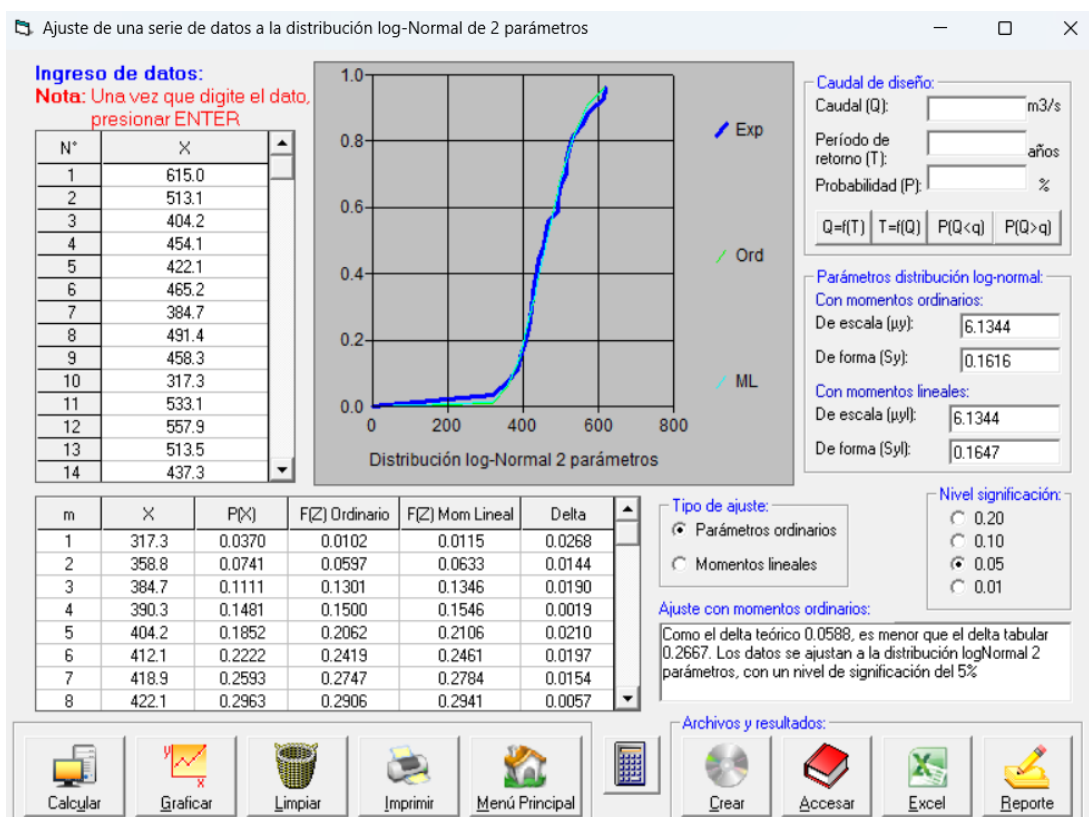


Figura 34

Distribución Log-Normal 3P

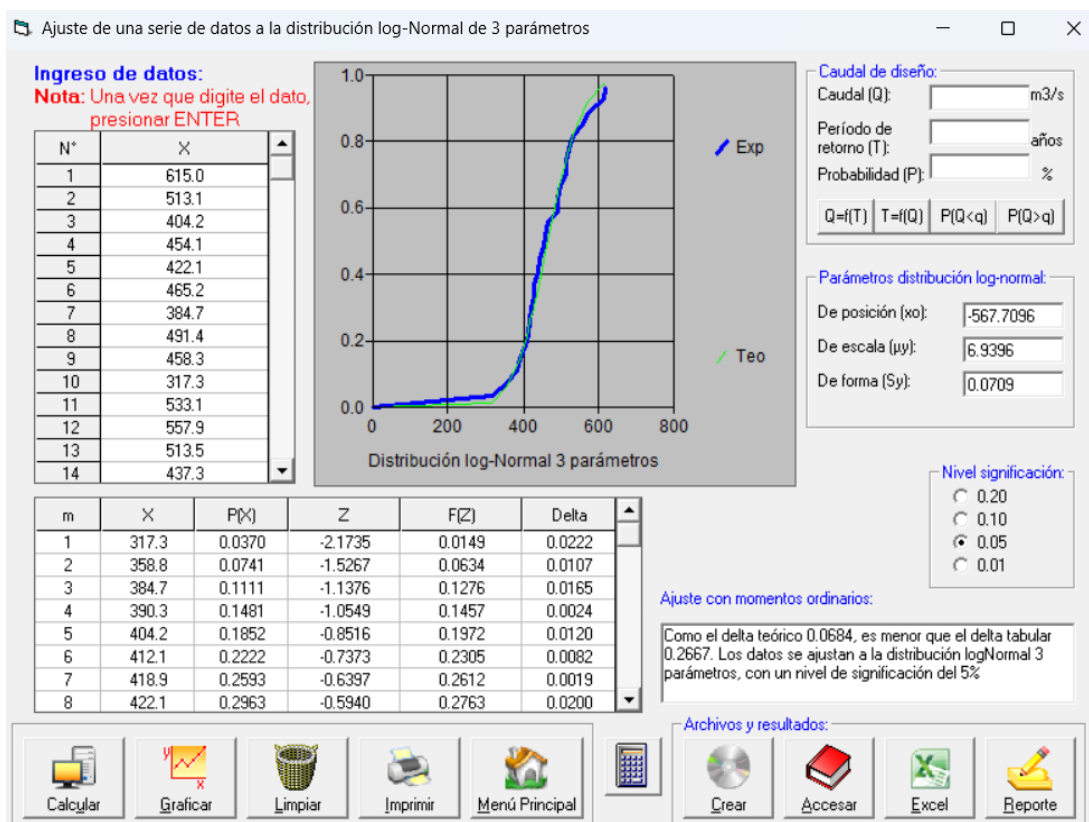


Figura 35

Distribución Gamma 2P

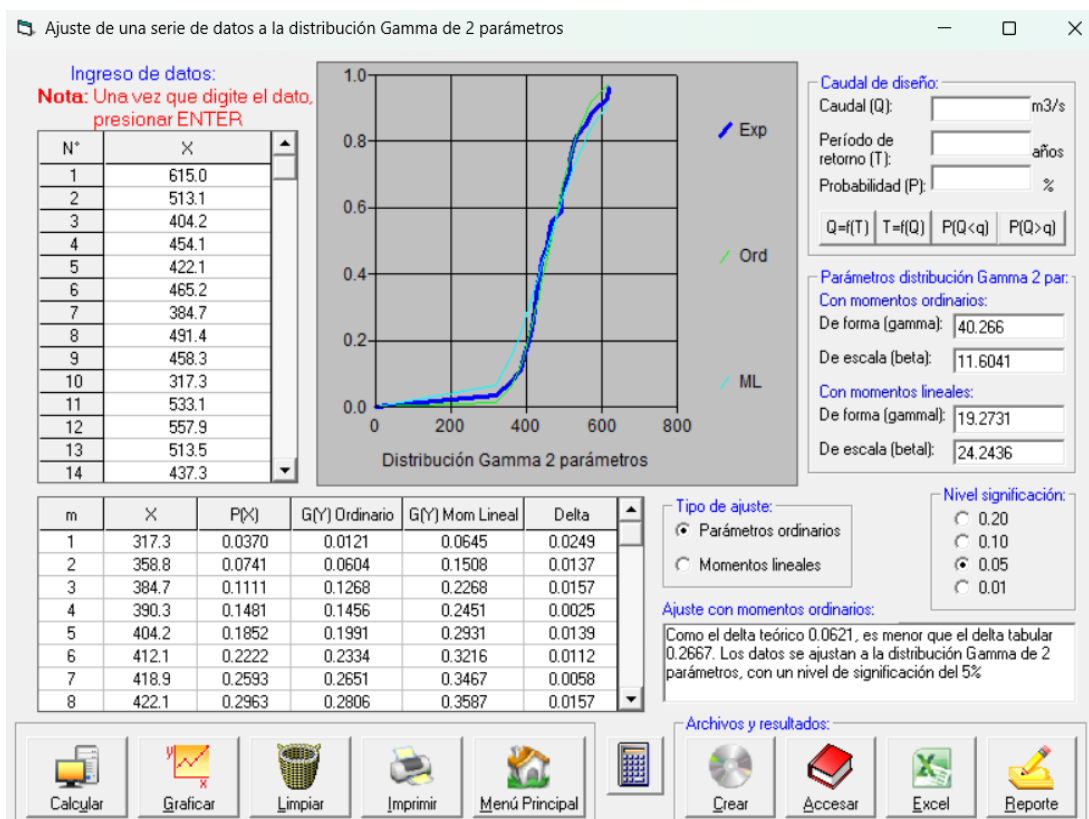


Figura 36

Distribución Gamma 3P

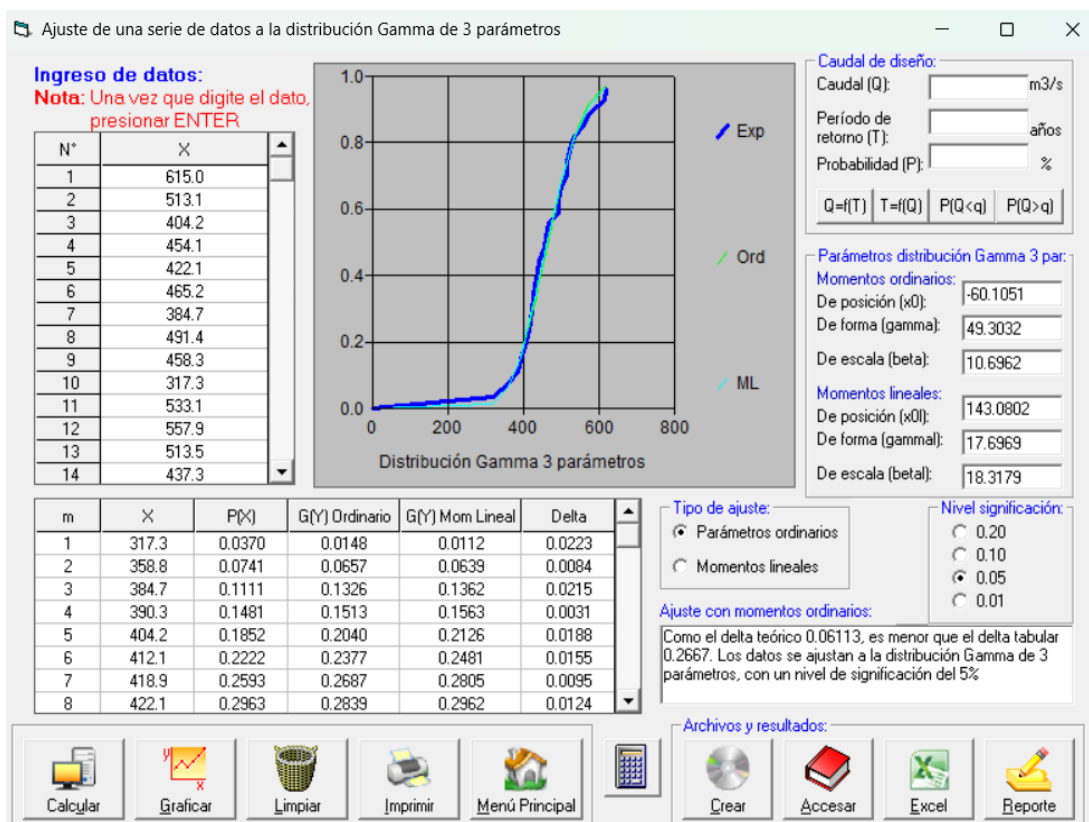


Figura 37

Distribución Gumbel

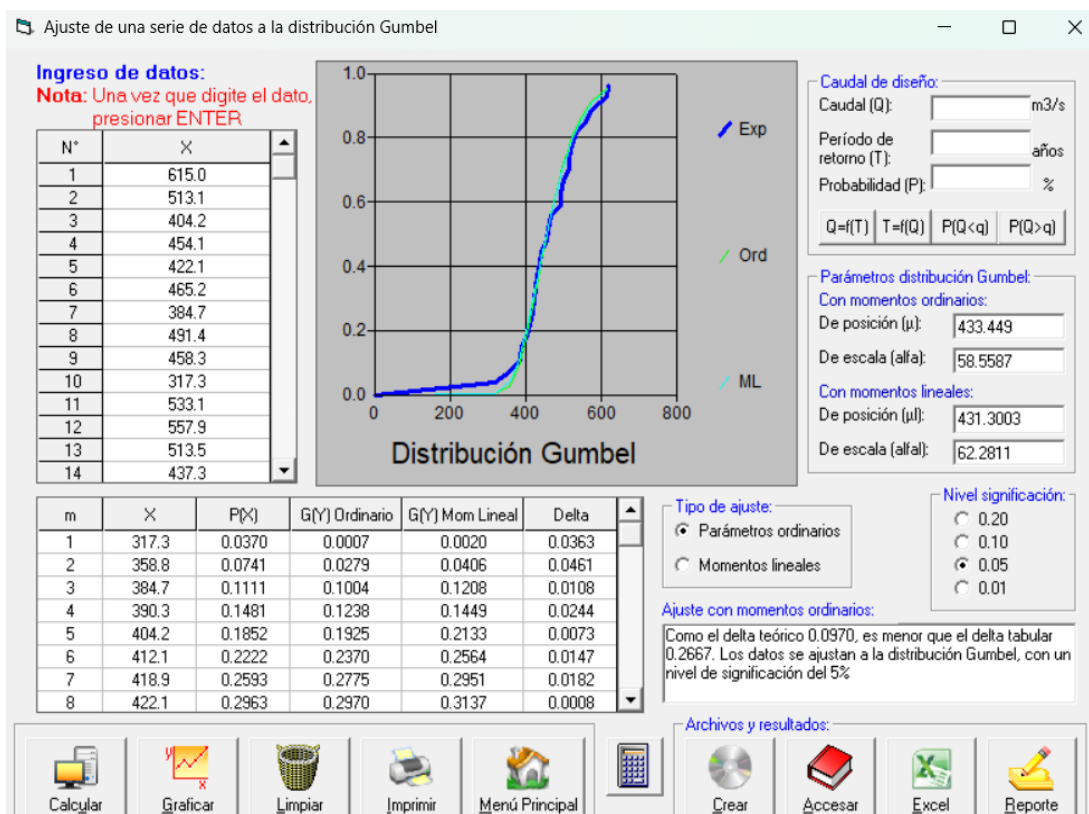


Tabla 21

Modelo de valores IDF

CUADRO DE INTENSIDADES PARA DIFERENTES PERIODOS DE DURACIÓN												
AÑOS	DURACIÓN EN MINUTOS											
T	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
T-2	801.02	521.72	405.98	339.80	295.99	264.42	240.37	221.32	205.76	192.78	181.74	172.22
T-5	852.11	554.99	431.87	361.47	314.86	281.28	255.70	235.43	218.89	205.07	193.33	183.20
T-10	892.90	581.56	452.55	378.77	329.94	294.75	267.94	246.70	229.37	214.89	202.59	191.97
T-25	949.84	618.64	481.41	402.93	350.98	313.55	285.03	262.43	243.99	228.60	215.51	204.22
T-50	995.32	648.26	504.46	422.22	367.78	328.56	298.68	275.00	255.67	239.54	225.83	213.99
T-100	1042.97	679.30	528.61	442.43	385.39	344.29	312.98	288.16	267.91	251.01	236.64	224.24
T-105	1046.41	681.54	530.35	443.89	386.66	345.42	314.01	289.11	268.80	251.84	237.42	224.98
T-500	1162.60	757.21	589.24	493.18	429.60	383.78	348.87	321.21	298.64	279.80	263.78	249.96
T-1000	1218.26	793.47	617.45	516.79	450.16	402.15	365.58	336.59	312.94	293.20	276.41	261.93
T-10000	1423.01	926.82	721.22	603.65	525.82	469.74	427.02	393.16	365.54	342.47	322.87	305.95

Tabla 22

Tormenta de diseño PR 100 años

TORMENTA DE DISEÑO										
PERIODO DE RETORNO	100 años	DURACIÓN DE TORMENTA	6.00 hrs	360 min	INTENSIDAD DE LLUVIA	74.022	P24hr (mm)	444.13	INTERVALO DE t (min)	20
INSTANTE (min)	INTENSIDAD (mm/h)	P. ACUMULADA (mm)	ΔP (mm)	INTENSIDAD PARCIAL (mm/h)	P ALTERNADA (mm)	ImPa ALTERNADA (mm)	P. ACUM (mm)			
20	442.434	147.478	147.478	442.434	9.93	29.799	9.933			
40	288.162	192.108	44.630	133.891	10.76	32.280	20.693			
60	224.239	224.239	32.130	96.391	11.80	35.387	32.489			
80	187.683	250.245	26.006	78.017	13.14	39.421	45.629			
100	163.485	272.476	22.231	66.694	14.98	44.935	60.607			
120	146.049	292.098	19.623	58.868	17.69	53.067	78.296			
140	132.766	309.788	17.689	53.067	22.23	66.694	100.528			
160	122.240	325.974	16.187	48.560	32.13	96.391	132.658			
180	113.651	340.952	14.978	44.935	147.48	442.434	280.136			
200	106.480	354.933	13.981	41.942	44.63	133.891	324.766			
220	100.384	368.073	13.140	39.421	26.01	78.017	350.772			
240	95.123	380.494	12.421	37.262	19.62	58.868	370.395			
260	90.528	392.289	11.796	35.387	16.19	48.560	386.581			
280	86.472	403.536	11.247	33.740	13.98	41.942	400.562			
300	82.859	414.296	10.760	32.280	12.42	37.262	412.983			
320	79.616	424.621	10.325	30.975	11.25	33.740	424.229			
340	76.686	434.554	9.933	29.799	10.32	30.975	434.554			
360	74.022	444.132	9.578	28.734	9.58	28.734	444.132			

ANEXO 5

PANEL FOTOGRÁFICO



Descripción: Se aprecia una vista panorámica del cauce del río Huamuco.



Descripción: Se aprecia el puente existente en el río Huamuco que conecta los distritos de Santa Rosa de Alto Yanajanca y La Morada.



Descripción: Se aprecia los estribos y panales del puente en el rio Huamuco, según las estaciones del año, las máximas avenidas llegan a entrar en contacto con los estribos del puente, creando socavación.



Descripción: Se aprecia la falta de piezas metálicas que conforman el camino del puente en el rio Huamuco. Y la socavación que se presenta en los estribos



Descripción: Se aprecia el cauce y orilla en el Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia la extensión y ancho del cauce en el Margen Izquierdo del Rio Huamuco. El punto señalado en el cauce sugiere una zona de posible socavación.



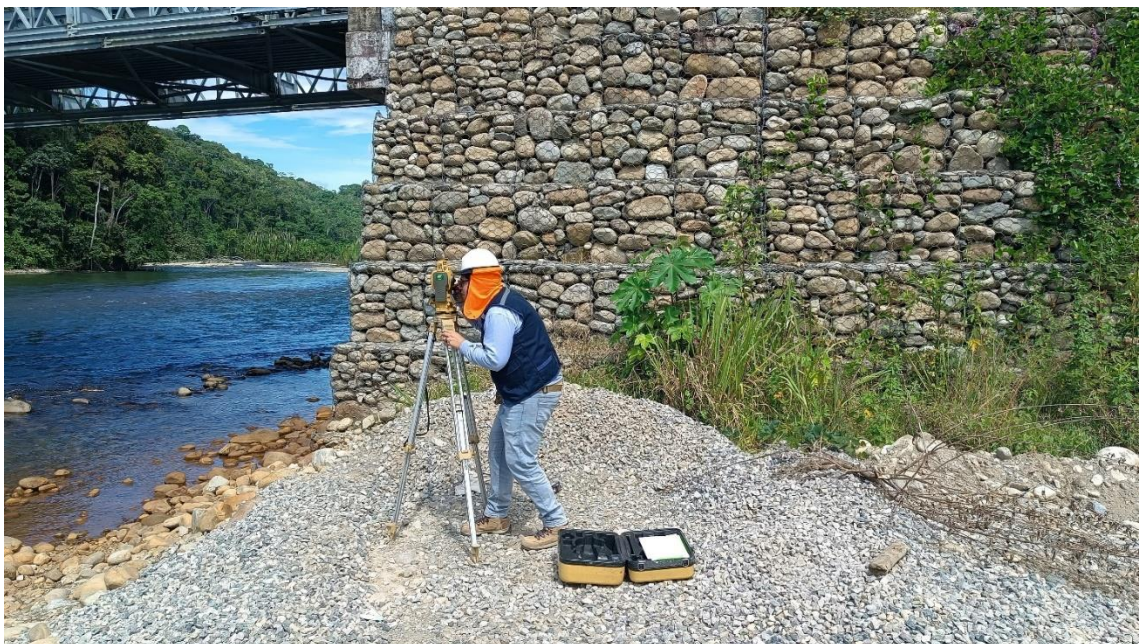
Descripción: Se aprecia un muro de gaviones que funciona como estribo del puente en el Margen Izquierdo del rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que el puente no se encuentra en uso, debido a no estar acabado, por la falta del camino.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se utilizó un prisma como parte del levantamiento topográfico del área a intervenir del Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Izquierdo del Río Huamuco.



Descripción: Se aprecia la toma de puntos de ubicación con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el Margen Izquierdo del Río Huamuco.



Descripción: Se aprecia la toma de puntos de ubicación con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia la toma de puntos de ubicación con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se utilizó un prisma como parte del levantamiento topográfico del área a intervenir del Margen Izquierdo del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia la calicata 1 del área a intervenir en el Margen Izquierdo del Rio Huamuco



Descripción: Se aprecia la calicata 4 del área a intervenir en el Margen Izquierdo del Rio Huamuco



Descripción: Se aprecia el puente existente en el Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia un muro de gaviones que funciona como estribo del puente en el Margen Derecho en el rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia el cauce y orilla del Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se utilizó un prisma como parte del levantamiento topográfico del área a intervenir del Margen Derecho del Río Huamuco.



Descripción: Se aprecia la toma de puntos de ubicación con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el Margen Derecho del Río Huamuco.



Descripción: Se aprecia la toma de puntos de ubicación con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia la calicata 2 del área a intervenir en el Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia que se realizó el levantamiento topográfico del área a intervenir para una mayor precisión, levantamiento del Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia la toma de puntos de ubicación con un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en el Margen Derecho del Rio Huamuco.



Descripción: Se aprecia la calicata 3 del área a intervenir en el Margen Derecho del Rio Huamuco.