

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE UNA DEFENSA RIBEREÑA PARA EL TRAMO
DEL PUENTE HUANCHUY DEL RÍO SECHÍN, DISTRITO Y
PROVINCIA DE CASMA, DEPARTAMENTO DE ÁNCASH**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Luis Alberto Chávez Guerra

Max Waldo Quispe Neira

ASESOR:

Manuel Enrique García Naranjo Bustos


Lima, 2026

Informe de Similitud

Yo, Manuel García Naranjo Bustos, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado Diseño de una Defensa Ribereña para el tramo del Puente Huanchuy del río Sechín, Distrito y Provincia de Casma, Departamento de Ancash, del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as): Max Waldo Quispe Neira, Luis Alberto Chávez Guerra, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 13/04/2026
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 21 de abril de 2026

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>García Naranjo Bustos, Manuel Enrique</u>	
DNI: 07832748	Firma 
ORCID: 0000 0003 1213 6987	<small>Manuel E. García Naranjo Bustos DNI 07832748 Registro CIP 21807</small>

Agradecimientos

El presente trabajo de Tesis lo dedico, en primer lugar, a Dios, quien ha permite que todo sea esto sea posible, por dirigir y guiar mi camino ante todos los obstáculos que se han presentado en el camino, por permitir que mi familia se encuentre unida y por mantener firme en mis objetivos.

Agradecer a mi madre Hermelinda Guerra Espinoza y mi hermana Gladys Chavez Guerra, quienes son la mayor motivación en mi vida, por apoyo constante y el amor incondicional y por siempre creer en mí, todo esto es gracias a ustedes.

Expresar mi más agradecimiento especial a nuestro asesor de tesis el Ingeniero Manuel Enrique García Naranjo Bustos, por la asesoría brindada y por su guía que nos brindó durante todo el transcurso del trabajo de investigación

A todos ellos, gracias por todo
Luis Alberto Chavez Guerra

A mi amigo y compañero de tesis, Luis Alberto Chávez Guerra, con quien compartí esta importante etapa de mi vida académica. Su compañerismo, compromiso y apoyo constante me recordaron la importancia de valorar el esfuerzo conjunto y la dedicación en nuestro crecimiento profesional.

A mis padres y hermanos, quienes han sido mi mayor fuente de motivación y fortaleza. Gracias por su apoyo incondicional, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por inspirarme a alcanzar este logro tan significativo.

Finalmente, a las amistades que he formado gracias al trabajo, cuyos consejos, experiencias y palabras de aliento me ayudaron a comprender con mayor claridad la importancia de la profesión y de seguir creciendo. Este título representa no solo un logro personal, sino también una puerta abierta hacia nuevas oportunidades en el ámbito laboral.

Max Waldo Quispe Neira

Resumen

La investigación planteó como objetivo general diseñar una defensa ribereña para el tramo del río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy, bajo una metodología de tipo aplicada con un nivel descriptivo. Por ello, dicho estudio abarcó un recorrido de 24 km aproximadamente (coordenadas 801843.410E/8952205.707N al inicio y 818536.592E/8966315.347N al fin) en la cuenca del río Sechín, debido a los elevados niveles de flujo del agua. Los resultados obtenidos del estudio de mecánica de suelos evidenciaron la presencia de alto nivel freático, indicios de procesos socavación y erosión hidráulica en el área de influencia del proyecto; asimismo, el análisis estratigráfico determinó el predominio de materiales granulares tales como gravas, arenas y bolones; de igual manera, los ensayos químicos realizados identificaron niveles moderados de cloruros y sulfatos que sugirieron el uso de materiales resistentes a la corrosión. El estudio topográfico aportó datos claves como los datos de la geometría del cauce, mientras que el estudio hidrológico detalló una cuenca aportante de 741.09km² y una longitud de cauce de 61.73km, con un tiempo de concentración de 5.15hrs y una precipitación mensual total de 266.70mm. El estudio hidráulico del área de estudio del río Sechín, mediante HEC-RAS, indicó un índice de sinuosidad de 1.45, con geomorfología meandriforme, y facilitó el cálculo de anchos estables para la planificación de obras de control de inundaciones. El análisis multicriterio para las defensas ribereñas eligió el enrocado como la opción más adecuada, con un puntaje total de 4.1, proyectando dos tipos de enrocados: el DIPR-020-MD, en la margen derecha con 855m de longitud, y el DIPR-021-MI, en la margen izquierda con 2057m. El modelado de las defensas ribereñas abarcó 2,912m entre ambos diques, con profundidades máximas de socavación de hasta 1.76m en el DIPR-020-MD y 1.12m en el DIPR-021-MI. El presupuesto total de construcción ascendió a S/ 7,741,393.12, distribuidos en diversas partidas, incluyendo obras provisionales (S/545,391.19), obras preliminares (S/1,772,114.84), movimiento de tierras (S/2,886,812.48) y transporte de material (S/1,998,956.04).

Palabras claves: Enrocado, defensa ribereña, modelamiento hidrológico, hidráulico, HEC-RAS, análisis multicriterio.

Abstract

This research aimed to design a riverbank protection structure for the section of the Sechín River located near the Huanchuy Bridge, in the district and province of Casma, Ancash region. The study followed an applied research methodology with a descriptive level. The analysis covered an approximate river reach of 24 km (coordinates 801843.410E / 8952205.707N at the upstream point and 818536.592E / 8966315.347N at the downstream point) within the Sechín River basin, an area characterized by high flow levels. The results obtained from the geotechnical investigation revealed the presence of a high groundwater table and evidence of scour processes and hydraulic erosion within the project's area of influence. Furthermore, the stratigraphic analysis indicated the predominance of granular materials such as gravels, sands, and boulders. Chemical soil tests also identified moderate concentrations of chlorides and sulfates, suggesting the use of corrosion-resistant materials. The topographic survey provided key information regarding the geometry of the river channel. The hydrological analysis determined a contributing watershed area of 741.09 km² and a channel length of 61.73 km, with a time of concentration of 5.15 hours and a total monthly precipitation of 266.70 mm. The hydraulic analysis, carried out using HEC-RAS, indicated a sinuosity index of 1.45, corresponding to a meandering geomorphology, and allowed the estimation of stable channel widths required for flood control planning. A multi-criteria decision analysis (MCDA) was conducted to evaluate different riverbank protection alternatives, identifying riprap protection as the most suitable option with a total score of 4.1. Two riprap structures were proposed: DIPR-020-MD, located on the right bank with a length of 855 m, and DIPR-021-MI, located on the left bank with a length of 2057 m. The hydraulic modeling of the proposed riverbank protection structures covered a total length of 2,912 m between both dikes, with maximum scour depths of 1.76 m for DIPR-020-MD and 1.12 m for DIPR-021-MI. Finally, the total estimated construction cost was S/ 7,741,393.12, distributed among several components including provisional works (S/ 545,391.19), preliminary works (S/ 1,772,114.84), earthworks (S/ 2,886,812.48), and material transportation (S/ 1,998,956.04).

Keywords: Rockfill, riparian defense, hydrological modelling, hydraulic, HEC-RAS, Multicriteria Analysis.

Índice de Contenido

Resumen	i
Abstract	ii
Índice de Contenido	iii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.2 Pregunta de investigación.....	3
1.2.1 Pregunta general.....	3
1.2.2 Preguntas de investigación específicas	3
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.....	3
1.3.2 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis.....	4
1.5 Justificación.....	4
CAPÍTULO II: ESTADO DE ARTE	6
CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO	10
3.1 Defensa Ribereña	10
3.1.1 Tipo de defensa ribereña	10
3.1.2 Diseño geométrico y estructural	25
3.2 Estudios fundamentales para el diseño de una defensa ribereña.....	26
3.2.1 Criterios generales de diseño	27
3.2.2 Modelamiento de defensa ribereña	38
3.2.3 Estudio Topográfico.....	39
3.2.4 Estudio de mecánicas de suelos	39
3.2.5 Estudio hidrológico	41
3.2.6 Estudio hidráulico	43
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA	45
CAPÍTULO V: CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	47
4.1 Estudios básicos de la investigación	52
4.1.1 Estudio topográfico	52

4.1.2 Estudio de mecánica de suelos.....	57
4.1.3 Estudio de canteras.....	63
4.1.4 Estudio hidrológico.....	77
4.1.5 Estudio hidráulico.....	96
CAPÍTULO VI: RESULTADOS.....	100
5.1 Identificación de tipo de defensa ribereña.....	100
5.2 Diseño de la defensa ribereña.....	107
5.3 Áreas inundables.....	111
5.3.1 Mancha de inundación antes del proyecto.....	111
5.3.2 Mancha de inundación después de la implementación de la Defensa Ribereña	117
5.4 Especificaciones técnicas.....	119
5.4.1 Especificaciones técnicas para operación y explotación de canteras.....	119
5.4.2 Especificaciones técnicas para construcción de defensas ribereñas.....	121
5.5 Presupuesto.....	128
5.6 Cronograma de obra.....	131
CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	132
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	134
7.1 Conclusiones.....	134
7.2 Recomendaciones.....	136
Referencias bibliográficas.....	138
7.3 Anexo.....	147

Índice de tablas

Tabla 1 Presupuesto de gaviones	13
Tabla 2 Tipos de geosintéticos	24
Tabla 3 Ubicación de coordenadas UTM	48
Tabla 4 Pendiente del Río Sechín.....	53
Tabla 5 Coeficientes de rugosidad asumidos en las simulaciones	55
Tabla 6 Resumen de ensayos de densidad de campo en el Sector 3 – Río Sechín	58
Tabla 7 Resumen de ensayos de densidad de campo en diques existentes del Sector 3 – Río Sechín.....	59
Tabla 8 Resumen de ensayos de Granulometría Global en el cauce del río	59
Tabla 9 Resumen de ensayos de Granulometría Global en el cauce del río	60
Tabla 10 Ensayos químicos realizados sobre muestras de suelo de cimentación	63
Tabla 11 Ensayos químicos realizados sobre muestras de suelo de cimentación	64
Tabla 12 Resumen de ensayos de laboratorio de las calicatas de la cantera ROCA CRS-3-1	65
Tabla 13 Resumen de ensayos de laboratorio de las calicatas de la cantera Grupo Frengo.....	67
Tabla 14 Resumen de ensayos de laboratorio de las calicatas de la cantera GRUPO FRENGO	70
Tabla 15 Evaluación de resultados de ensayos de la Cantera CRS-3-2.....	73
Tabla 16 Volumen de explotación de la Cantera CRS-3-2.....	74
Tabla 17 Ensayos de laboratorio realizados a las fuentes de agua en laboratorio.	74
Tabla 18 Características geométricas del DME C-24.....	75
Tabla 20 Parámetros geomorfológico de la cuenca Sector 3 – Río Sechín (Tramo 1 y 2).....	77
Tabla 21 Tiempo de concentración y tiempo de retardo.....	80
Tabla 22 Precipitación total mensual (mm).....	80
Tabla 23 Precipitaciones máximas en 24 horas.....	82
Tabla 24 Precipitaciones máximas – isoyetas – por subcuenca.....	83
Tabla 25 Perfil de tormenta TR100 para el modelo meteorológico	86
Tabla 26 Puntos de interés para estimación de caudales máximos. Sector 3 – Río Sechín (Tramo 1 y 2)	87
Tabla 27 Número de curva condición normal iniciales y calibrados -1	88
Tabla 28 Número de curva condición normal iniciales y calibrados -2.....	89
Tabla 29 Caudales FEN 2017	90
Tabla 30 Caudales máximos del estudio hidrológico.....	93
Tabla 31 Caudales máximos con efecto de cambio climático	94
Tabla 32 Producción de sedimentos para diferentes periodos de retorno	95
Tabla 33 Tipo de erosión según el modelo RUSLE, en la cuenca del río Casma	95
Tabla 34 Sectorización de la zona de estudio	97
Tabla 35 Resumen de cálculo ancho estable.....	99
Tabla 36 Definición de las alternativas de defensa ribereña	100
Tabla 37 Criterios para la evaluación de los tipos de defensa ribereña.....	101

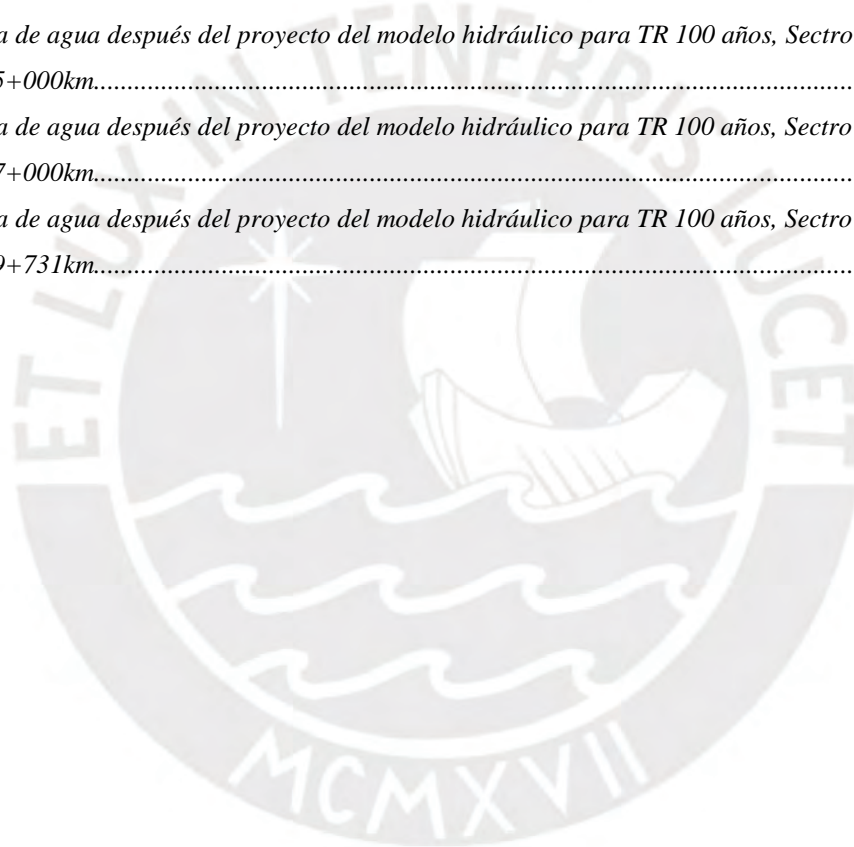
Tabla 38 Eficiencia hidráulica para la evaluación de los tipos de defensa ribereña	102
Tabla 39 Estabilidad estructural para la evaluación de los tipos de defensa ribereña	103
Tabla 40 Facilidad de construcción y mantenimiento para la evaluación de los tipos de defensa ribereña	103
Tabla 41 Viabilidad económica para la evaluación de los tipos de defensa ribereña	104
Tabla 42 Impacto ambiental para la evaluación de los tipos de defensa ribereña	104
Tabla 43 Resumen del análisis comparativo de los tipos de defensa ribereña	105
Tabla 44 Matriz de selección de los tipos de defensa ribereña	106
Tabla 45 Trazado en planta de las infraestructuras proyectadas	108
Tabla 46 Resumen del tipo de intervención del DIPR-020-MD	108
Tabla 47 Resumen del tipo de intervención del DIPR-021-MI	108
Tabla 48 Resumen de profundidad de socavación	109
Tabla 49 Resumen del cálculo del enrocado del DIPR-020-MD y DIPR-021-MI	111
Tabla 50 Presupuesto de la construcción de defensas ribereñas	129



Índice de figuras

Figura 1 Evaluación de riesgo a viviendas.....	2
Figura 2 Gavión tipo colchón.....	12
Figura 3 Simulación del diseño de un enrocado.....	20
Figura 4 Protección de la ribera con enrocado.....	22
Figura 5 Principales funciones de los geosintéticos.....	24
Figura 6 Diagrama de Flujo de Metodología.....	46
Figura 7 Ubicación geográfica de la Región Áncash.....	47
Figura 8 Ubicación del Geográfica de la Provincia de Casma y Regiones Limítrofes.	48
Figura 9 Ubicación del Río Sechín - Sector 3.....	49
Figura 10 Puente de Huanchuy.....	50
Figura 11 Ubicación geográfica del lugar de estudio.....	50
Figura 12 Clima en Casma.....	51
Figura 13 Temperatura promedio en Casma.....	52
Figura 14 Perfil Estratigráfico 6+000 a 20+000 Km (eje de río).....	61
Figura 15 Perfil Estratigráfico 20+000 a 24+000 Km (eje de río).....	62
Figura 16 Imagen satelital del acceso a la cantera ROCA-CRS-3-1.....	65
Figura 17 Imagen satelital del acceso a la cantera Grupo Fergo.....	66
Figura 18 Perfil estratigráfico de la cantera Cerro Fergo.....	67
Figura 19 Huso para conformación de dique Cantera Grupo Fergo.....	68
Figura 20 Imagen satelital del acceso a la cantera Huanchuy Bajo.....	69
Figura 21 Exploración de calicatas cantera Huanchuy Bajo.....	70
Figura 22 Imagen satelital del acceso a la cantera CRS-3-2.....	71
Figura 23 Imagen satelital del acceso a la cantera CRS-3-2.....	72
Figura 24 Plano en planta de la ubicación del DME C-24.....	76
Figura 25 Plano en planta de la ubicación del DME C-23.....	76
Figura 26 Plano en planta de la ubicación del DME C-40.....	77
Figura 27 Curva hipsométrica de la cuenca.....	78
Figura 28 Temperatura media mensual.....	80
Figura 29 Humedad relativa media mensual (%).....	81
Figura 30 Distribución de evaporación en la cuenca (mm).....	81
Figura 31 Velocidad del viento media mensual (m/s).....	82
Figura 32 Isoyetas $T_r=50, 100, 200$ y 500 años.....	84
Figura 33 Distribución de grilla IMERG.....	90
Figura 34 Hidrograma de caudales correspondientes al FEN 2017.....	91
Figura 35 Código Modelo Hidráulico.....	92
Figura 36 Mapa de erosión de la cuenca del río Casma.....	96
Figura 37 Sectorización del Sector 3 – Río Sechín.....	98

Figura 38 Socavación general del DIPR-20-MD	110
Figura 39 Socavación general del DIPR-21-MD	110
Figura 40 Mapa de calados del modelo base (m2) para TR 100 años, Sectro Sechín 17+000 km – 25+000km.....	112
Figura 41 Mapa de calados del modelo base (m2) para TR 100 años, Sectro Sechín 25+000 km – 29+731km.....	112
Figura 42 Mapa de sedimentos del modelo base (m2) para TR 100 años, Sectro Sechín 00+000 km – 25+000km.....	113
Figura 43 Mapa de sedimentos del modelo base (m2) para TR 100 años, Sectro Sechín 22+000 km – 25+000km.....	114
Figura 44 Mapa de velocidad del modelo base (m2) para TR 100 años, Sectro Sechín 08+000 km – 17+000km.....	116
Figura 45 Mapa de agua después del proyecto del modelo hidráulico para TR 100 años, Sectro Sechín 23+000 km – 25+000km.....	117
Figura 46 Mapa de agua después del proyecto del modelo hidráulico para TR 100 años, Sectro Sechín 25+000 km – 27+000km.....	118
Figura 47 Mapa de agua después del proyecto del modelo hidráulico para TR 100 años, Sectro Sechín 27+000 km – 29+731km.....	118



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

Uno de los retos contemporáneos dentro del ámbito de las ciudades sostenibles está vinculado a las políticas dirigidas a la gestión de riesgos de desastres, las cuales abordan la prevención, mitigación y preparación frente a situaciones de vulnerabilidad (León & Cáceres, 2023). En la actualidad, se considera una amenaza como cualquier factor que pueda representar un riesgo potencial, es decir, una eventualidad catastrófica que pueda afectar a la población. Por otro lado, la vulnerabilidad se refiere a la capacidad de sufrir daños o perjuicios (Guerrero et al., 2021). En este sentido, tanto las amenazas como el nivel de vulnerabilidad son aspectos inherentes a los procesos físicos terrestres y se encuentran estrechamente ligados a las alteraciones que los seres humanos han provocado en el medio ambiente.

Los desbordamientos de ríos representan uno de los desastres naturales más devastadores enfrentados por la humanidad, pues desde tiempos antiguos, las ciudades se ubicaban en las proximidades de los ríos para aprovechar su agua para consumo y actividades agrícolas. No obstante, esta cercanía a los cauces fluviales aumenta significativamente el riesgo de inundaciones durante periodos de crecidas (Fischer, 2021).

Las zonas de montaña del Perú generan desastres en las cuencas menos protegidas debido a las variaciones climáticas o la presencia del fenómeno del Niño, estas catástrofes, recurrentes cada temporada, resultan en un aumento significativo del caudal del río, lo que puede provocar desbordamientos y ocasionar daños tanto a la población cercana como a las áreas circundantes (Arriola et al., 2022). Este último fenómeno genera fuertes tormentas con elevadas tasas de precipitación, resultando en desbordamientos e inundaciones de ríos tanto en zonas urbanas como rurales. Esto se evidenció en 1983, 1998 y, más recientemente, en 2017, cuando el Perú experimentó las devastadoras consecuencias del Niño Costero que cobró la vida de numerosas personas y causó considerables daños materiales y agrícolas (Nuñez, 2022).

Estos eventos tienen como consecuencia pérdidas socioeconómicas que afectan no solo a la población local, sino a todo el país, ya que impactan en la producción agrícola, las infraestructuras como viviendas y otros sectores económicos (Nogueira et al., 2022). En el distrito de Casma, región Áncash, se presenta un total de 6423 familias expuestas a riesgo por inundación, con un total de 8628 áreas de exposición debido al posible desborde

del Río Sechín. En donde en la época del 2017 del fenómeno de El Niño Costero se vio afectado el centro poblado Casma la cual requiere rehabilitación. Actualmente presenta una zona de riesgo muy alto para un total de 5916 viviendas. (Figura 1)

Figura 1

Evaluación de riesgo a viviendas



Nota. Tomado de Sigrid (2022).

Un evento de esta magnitud tuvo lugar el 16 de marzo de 2017, cuando el desbordamiento del río causó el colapso del puente Sechín el cual cruza el cauce principal del río Sechín, dejando a cientos de personas varadas durante horas; este incidente resaltó la vulnerabilidad del río ante estos eventos, subrayando la necesidad de construir un sistema de defensas (De La Cruz et al., 2022).

Ante este escenario recurrente, la ciudad de Casma enfrenta año tras año una creciente preocupación debido a los impactos devastadores que el río ha demostrado tener. A pesar de las experiencias pasadas, aún no se ha implementado un plan de control integral que incluya soluciones técnicas para mitigar estos daños.

Por consiguiente, el propósito de este estudio es proporcionar una base técnica sólida que pueda contribuir a mejorar la toma de decisiones en la gestión de inundaciones. Esto implica la identificación de áreas susceptibles a inundaciones y la propuesta del diseño de una defensa ribereña con la finalidad de reducir los daños ocasionados por estos eventos.

1.2 Pregunta de investigación

1.2.1 Pregunta general

¿Cuál es el diseño de defensa ribereña para el tramo del puente Huanchuy del Río Sechín, distrito y provincia de Casma, departamento de Áncash?

1.2.2 Preguntas de investigación específicas

- ¿Qué determinaron los estudios básicos de la zona de estudio del río Sechin que comprende la ubicación del puente Huanchuy?
- ¿Cuál es el tipo de defensa ribereña que brinda la solución más eficaz para el tramo del Río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy?
- ¿Cuáles son las especificaciones técnicas de la defensa ribereña para el tramo del Río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy?
- ¿Cuál es el presupuesto y cronograma de obra de la propuesta seleccionada de la defensa ribereña para el tramo del Río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una defensa ribereña para el tramo del río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy, distrito y provincia de Casma, departamento de Áncash.

1.3.2 Objetivos específicos

Evaluar los estudios básicos de la zona de estudio del río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy.

Identificar los tipos de defensa ribereña y seleccionar la solución más eficaz para el tramo del río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy.

Diseñar el tipo de defensa ribereña seleccionada para el tramo del río Sechinn que comprende la ubicación del puente Huanchuy

Realizar las especificaciones técnicas de la defensa ribereña para el tramo del río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy.

Elaborar el presupuesto y cronograma de obra de la propuesta seleccionada de la defensa ribereña para el tramo del río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy.

1.4 Hipótesis

El diseño de una defensa ribereña en el tramo del río Sechín, en la zona del puente Huanchuy, permitirá reducir los procesos de socavación y erosión hidráulica, contribuyendo a la estabilidad del cauce, reduciendo el desborde del mismo y protegiendo la zona agrícola aledaña.

1.5 Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad de reducir la vulnerabilidad ante eventos de inundación en el tramo del río Sechín que comprende la ubicación del puente Huanchuy, donde el incremento de caudales durante periodos de lluvias intensas genera riesgos de erosión de márgenes, afectación a la infraestructura existente y posibles impactos en la seguridad de la población y las actividades económicas del sector.

En este contexto, el estudio propone el diseño de defensas ribereñas mediante una evaluación técnica de alternativas, en la cual se realizará una selección preliminar entre distintos tipos de estructuras de protección, tales como enrocados, diques o soluciones similares, con la finalidad de identificar la opción más eficiente, estable y económicamente viable para las condiciones hidráulicas y geomorfológicas del tramo de estudio.

Asimismo, la investigación se sustenta en el análisis hidrológico e hidráulico del río, empleando herramientas de modelamiento reconocidas en la ingeniería hidráulica. En particular, se utilizará el software HEC-HMS, el cual permite simular el proceso precipitación–escorrentía y estimar los caudales de diseño para diferentes periodos de retorno, mientras que los análisis complementarios del comportamiento del flujo permitirán sustentar el dimensionamiento de las obras de protección. El uso de estas herramientas ofrece ventajas como la capacidad de modelar escenarios hidrológicos complejos, evaluar eventos extremos y mejorar la precisión en la estimación de caudales, lo que contribuye a un diseño más confiable de las defensas ribereñas.

Por otro lado, el estudio se apoya en información técnica proveniente de estudios básicos previamente desarrollados, tales como levantamientos topográficos obtenidos mediante fotogrametría con dron, modelos digitales de elevación, información geológica y de mecánica de suelos, así como registros hidrometeorológicos de estaciones pluviométricas. La calidad y confiabilidad de esta data de entrada permite realizar análisis más precisos y sustentar adecuadamente las decisiones de diseño.

Finalmente, los resultados de esta investigación no solo permitirán proponer una solución técnica para la protección del tramo analizado del río Sechín, sino que también podrán servir como referencia metodológica para el desarrollo de proyectos de defensas ribereñas en otras cuencas con características similares, contribuyendo a mejorar la gestión del riesgo de inundaciones y la planificación de infraestructura hidráulica en el país.



CAPÍTULO II: ESTADO DE ARTE

Los asentamientos y las industrias a lo largo de los ríos suelen estar protegidos contra las inundaciones mediante diques y estructuras hidráulicas (Wang et al., 2023). En los Países Bajos, los sistemas de defensa se utilizan para proteger una gran parte del país contra las inundaciones. El nivel de seguridad de estos sistemas se evalúa periódicamente y existen políticas para cumplir con el estándar en 2050 para todas las defensas contra inundaciones (Klerk et al., 2024). Una forma común de determinar qué tan seguro es actualmente un sistema de defensa es analizando cómo se desempeña bajo carga. En el caso de una defensa pluvial podría ser una descarga alta del río (Van-Wesenbeeck et al., 2024).

Para poder realizar el diseño de una defensa ribereña se tiene que efectuar pasos de forma ordenada y sistematizada, ya que para ello se requiere hacer un estudio previo del lugar de estudio, como determinar la población que se encuentra cerca de la cuenca (Marijnissen et al., 2021). Según Uday y Jayalumar (2021) sugieren que antes de realizar el diseño se haga un análisis de las causas de las inundaciones, para luego identificar cual es el método apropiado para el estudio hidrológico e hidráulico. En donde determinaron en su caracterización de la cuenca de Narayanapura – India que presenta una profundidad de agua de 0.23 m, una velocidad de 0.12 m/s. Asimismo, Natarajan y Radhakrishnan (2020) mencionan que para poder definir bien el área de estudio se debe tener la topografía del lugar afectado la cual puede ser mediante mapas satelitales georreferenciados o un mediante un levantamiento topográfico. Como también Munna et al. (2021) mencionan que se puede realizar el levantamiento topográfico mediante el uso de DRONE que mediante un escaneo láser se toma el panorama del lugar de estudio. Además, Natarajan y Radhakrishnan (2020) indican que para estos mapas satelitales se exportan al programa Arcgis para tener una mejor visualización del panorama y definir las medidas de la cuenca (pendiente, área y perímetro). Por ejemplo, Dąbrowska, et al. (2018) aluden que en la cuenca de Gołuchów, presenta una pendiente de del terreno en la cuenca directa para la mayor parte del área de estudio no superan las 2,58 hectáreas de cultivo y los asentamientos rurales abarcan el 67% de su superficie, los bosques el 26%, las aguas el 5%, otras tierras constituyen el 2%.

Luego de tener la topografía se realiza el estudio de mecánica de suelos para determinar el tipo de suelo para tomarlo en cuenta en el análisis hidráulico y también en el diseño de la defensa ribereña. Seguido Kumar et al. (2021) determinan que para un

estudio hidrológico en donde se aplica el método de esorrentía el cual consiste en el análisis histórico de 10 años de precipitaciones y esorrentía anuales de la zona a investigar. Como también Natarajan y Radhakrishnan (2020) el cual indica que, para ejecutar un modelado hidrológico, primero se debe determinar los caudales hidráulicos con los tiempos de retorno para luego hacer la simulación de los eventos peligrosos tomados del análisis de histórico de datos. Coastabile et al. (2021) mencionan que en la cuenca de la ciudad de Ain Sefra se muestran caudales máximos obtenidos para las tormentas de 10, 100 y 1000 años son, respectivamente, 425,8, 904,3 y 1328,3 m³ /s.

Mattos et al. (2022) indican que se lleva a cabo el modelado utilizando los programas HEC-HMS y HEC-RAS, los cuales deben estar ajustados previamente. Posteriormente, se establece un modelo analítico que abarca el flujo superficial (esorrentía) y el enrutamiento del canal del río (propagación de ondas de inundación). Este modelo engloba diversos elementos hidrológicos, tales como la esorrentía, pérdidas, transformaciones, flujo base y la dirección del flujo en el río. El-Saoud y Othman (2022)mencionan que para la cuenca de Wadi Mehassar con los programas anteriormente mencionado obtuvieron volúmenes de incremento de caudal de 7,829. 930 m³ y 810 min para alcanzar su valor máximo durante un período de retorno de 100 años, profundidad de llanura aluvial (>1,5 m) domina hasta el 4,36 %, lo que constituye alrededor de 1,64 km². Fang et al. (2022) señalan que la simulación en el HEC-RAS de la cuenca hidrográfica de Xinluo, China, revela un impacto significativo en las inundaciones ribereñas, con una contribución promedio del 27.8% y 27.6%. En contraste, la cobertura del suelo y los factores meteorológicos contribuyeron en promedio con un 24.3% y un 20.3%, respectivamente. Después de realizar la simulación según Osei et al. (2021) exponen un área de inundación en la cual se determinan los grados de vulnerabilidad y las zonas afectadas. En donde la cuenca Tarkwa inunda el lugar de estudio en un 42.59% en un grado de vulnerabilidad muy alto. Asimismo, Niddi, Innocen y Ganiny (2022) muestran que la cuenca de Basin, Nigeria presenta una magnitud de riesgo muy alto a 13 establecimientos de salud y 15 escuelas, y bajo a 45 establecimientos de salud y 80 escuelas.

Luego de obtener las áreas de inundación, se llega a determinar finalmente el diseño de una defensa ribereña. En donde se toma en cuenta los estudios básicos anteriormente mencionados, los parámetros y normativas requeridas para un buen diseño de defensa ribereña.

Los pasos que se deben tomar en cuenta para su diseño que fue Primero, es

necesario especificar el perfil del dique en términos de geometría y los diferentes materiales, En segundo lugar, las cargas máximas anuales de precipitaciones se convirtieron en un evento de tormenta con una serie temporal de nivel del agua, altura de ola y período. Una vez evaluados los procesos de erosión, se calcula el caudal de desbordamiento y de acuerdo a ello bajo normativa se diseñó la estructura (Marijnissen et al., 2021).

Diversos estudios han empleado herramientas de modelamiento hidrológico e hidráulico para el análisis de inundaciones. Por ejemplo, Mattos et al. (2022) utilizaron los programas HEC-HMS y HEC-RAS para simular la escorrentía y el comportamiento hidráulico del cauce. De manera similar, El-Saoud y Othman (2022) aplicaron estas herramientas en la cuenca de Wadi Mehassar para estimar caudales máximos y zonas inundables. Estos modelos permiten representar el comportamiento hidrológico de una cuenca y evaluar escenarios de inundación, lo cual resulta fundamental para el diseño de estructuras de protección ribereña.

A partir de la revisión de los estudios previos, se observa que el análisis y diseño de defensas ribereñas se sustenta en la integración de diferentes estudios técnicos orientados a comprender el comportamiento hidrológico e hidráulico de una cuenca. Diversos autores coinciden en que el proceso inicia con la caracterización del área de estudio mediante información topográfica y geoespacial, la cual permite definir las condiciones geomorfológicas del cauce y delimitar la cuenca de aporte (Natarajan y Radhakrishnan, 2020; Munna et al., 2021). Sobre esta base, se desarrollan los análisis hidrológicos destinados a estimar caudales asociados a distintos periodos de retorno a partir de registros históricos de precipitación, los cuales posteriormente son utilizados en modelos de simulación hidráulica para evaluar el comportamiento del flujo y la extensión potencial de las zonas inundables (Kumar et al., 2021; Mattos et al., 2022). En este sentido, herramientas de modelamiento como HEC-HMS y HEC-RAS han sido ampliamente empleadas para representar los procesos de escorrentía y propagación de ondas de inundación en los cauces fluviales, permitiendo estimar caudales máximos y analizar escenarios de riesgo ante eventos extremos (El-Saoud y Othman, 2022; Fang et al., 2022). Asimismo, diversos estudios han incorporado evaluaciones de vulnerabilidad territorial con el propósito de identificar las áreas y la infraestructura expuestas a inundaciones, lo cual constituye un insumo clave para la planificación de medidas de mitigación (Osei et al., 2021; Niddi, Innocen y Ganiny, 2022). En conjunto, estas investigaciones evidencian que el diseño de obras de protección ribereña requiere un

enfoque integral que articule la caracterización física de la cuenca, el análisis hidrológico e hidráulico y la evaluación del riesgo, con el fin de definir soluciones estructurales adecuadas que contribuyan al control de inundaciones y a la reducción de la vulnerabilidad en las zonas ribereñas.

Si bien los estudios revisados demuestran la importancia de integrar análisis topográficos, hidrológicos e hidráulicos para la evaluación de zonas inundables y el diseño de estructuras de protección fluvial, gran parte de estas investigaciones se han desarrollado en cuencas con características hidrológicas y geomorfológicas distintas a las presentes en ríos de la costa peruana. En particular, las cuencas ubicadas en regiones áridas o semiáridas presentan dinámicas hidráulicas particulares, caracterizadas por eventos de crecida repentinos y elevados procesos de erosión en las márgenes del cauce. En este contexto, resulta necesario desarrollar estudios específicos que permitan evaluar el comportamiento hidráulico de ríos locales y proponer soluciones de protección ribereña acordes con las condiciones geomorfológicas, geotécnicas e hidrológicas del área de estudio. Bajo esta perspectiva, la presente investigación aborda el análisis del tramo del río Sechín ubicado en las inmediaciones del puente Huanchuy, con el propósito de proponer un diseño de defensa ribereña que contribuya a reducir los procesos de erosión y el riesgo de afectación a la infraestructura y a las zonas aledañas.

CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO

3.1 Defensa Ribereña

La Defensa Ribereña surgió como un enfoque estratégico destinado a salvaguardar las áreas adyacentes a los cursos de agua de los potenciales embates causados por las crecidas; esta estrategia se favoreció tanto de medios estructurales como no estructurales para su ejecución. Dentro del espectro de medidas estructurales, se contemplan la construcción de represas y embalses, así como la implementación de modificaciones en la configuración de los cauces fluviales (Fivash et al., 2021).

De igual forma, se consideraron obras de drenaje como parte integral de este sistema de protección. Estas acciones abarcaron un marco más amplio de gestión hídrica, donde la armonización entre la infraestructura física y las prácticas de manejo de agua son esenciales para fortalecer la resiliencia ante eventos extremos (Oberhagemann et al., 2020).

3.1.1 Tipo de defensa ribereña

3.1.1.1 Gaviones

Los gaviones son estructuras conformadas por cajones de malla hexagonal de doble torsión, los cuales se llenan a través de piedras de cantos rodados o piedras proveniente de canteras. Estas estructuras se caracterizan por ser monolíticas, semiflexibles, permeables y altamente resistentes, ofreciendo extender su vida útil. En ríos con caudales estables y pendientes constantes, los sedimentos fluviales tienden a depositarse dentro de los poros de los gaviones. En algunos casos, este proceso propicia el crecimiento espontáneo de plantas, lo que contribuye a la formación de un bloque sólido dentro de los gaviones. Este fenómeno aumenta significativamente la durabilidad de los gaviones, mejorando su capacidad para resistir las fuerzas hidráulicas y aumentando su vida útil de manera considerable (Nayono et al., 2020).

Gaviones caja

Los gaviones, con su forma de prismas rectangulares, son la opción ideal para la edificación de estructuras de protección, defensa y contención en las orillas de ríos y cuerpos de agua, funcionando principalmente por la fuerza de gravedad, su altura varía típicamente entre 0.50 y 1.00 metro, ofreciendo una versatilidad adaptable a diversas necesidades. La malla que los compone está tejida en un patrón hexagonal, logrado

mediante la torsión de dos hilos de alambre en tres giros, con una apertura estándar de 8 por 10 centímetros, una vez instalados y rellenos con piedras, estos gaviones se transforman en elementos estructurales flexibles, resistentes y drenantes, idóneos para aplicaciones como la protección de márgenes fluviales, canalizaciones y otros proyectos hidráulicos (Chikute & Sonar, 2021).

Gaviones saco

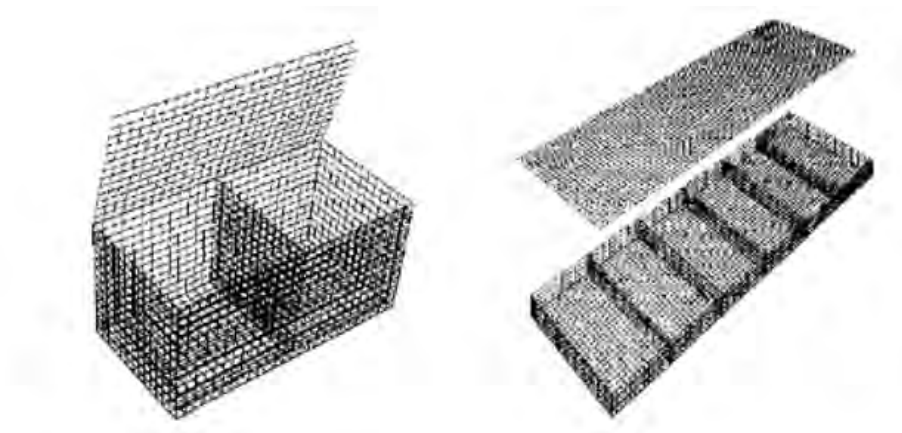
Son gaviones de forma cilíndrica, elaborados con malla hexagonal de doble torsión, destacan por su versatilidad en la construcción, son piezas fundamentales en proyectos sumergidos, pues permiten trabajar sin necesidad de erigir diques temporales y su instalación es sencilla gracias al empleo de maquinaria especializada, estos gaviones demuestran un excelente rendimiento incluso en suelos con capacidad de carga limitada, distribuyendo de manera efectiva las tensiones en el terreno y evitando asentamientos excesivos de la estructura. Por otro lado, los gaviones tipo saco, fabricados con alambres revestidos de aleación de aluminio-zinc y con una capa de protección adicional de material plástico, son ideales para situaciones de emergencia y proyectos hidráulicos que requieren intervención rápida, su diseño los hace perfectos para áreas donde el acceso es complicado debido al agua o a la baja capacidad de carga del suelo (Chikute & Sonar, 2021).

Gavión tipo colchón

Los gaviones prismáticos rectangulares, elaborados con malla hexagonal de doble torsión y una abertura de malla de 6 por 8 centímetros, destacan por su generosa superficie, su delgado perfil y su notable flexibilidad, con alturas que oscilan entre los 0.17 metros y los 0.30 metros, estos gaviones están diseñados específicamente para contrarrestar la socavación de estructuras longitudinales. Su instalación se lleva a cabo directamente sobre el terreno perfilado, ofreciendo una solución eficaz y confiable para proteger y fortalecer las márgenes de ríos y cuerpos de agua, esta versátil solución contribuye significativamente a preservar la integridad de infraestructuras adyacentes a cursos fluviales, garantizando su estabilidad y seguridad ante posibles erosiones (Craswell & Akib, 2020).

Figura 2

Gavión tipo colchón



Nota. Tomado de Chatpattananan et al. (2021)

Particularidades y parámetros destacados de los gaviones

Según Chatpattananan et al. (2021) se da a través de los siguientes puntos:

Eficiencia hidráulica

- Presentan permeabilidad, debido a su composición de malla y piedras, los gaviones son altamente permeables, lo que evita la acumulación de presiones hidrostáticas y contribuye a la estabilidad de las estructuras.

Estabilidad estructural

- Evidencian flexibilidad, permite a los gaviones deformarse fácilmente bajo presión sin perder eficiencia, lo que los hace ideales para adaptarse a condiciones cambiantes y soportar movimientos del terreno.

Costo

- Los gaviones son económicamente ventajosos, debido a su facilidad de ensamblaje, llegando a ser reducido el requerimiento de mano de obra especializada y aumenta la eficiencia en la instalación. Además, las piedras utilizadas como relleno pueden ser obtenidas localmente, lo que minimiza los costos de transporte.

De acuerdo con la Tabla 1, el costo por m³ de un muro gavión con una cara vista compuesto por gavión de 2000x1000x1000 mm de malla de doble torsión, hexagonal, de 50x70 mm, de alambre de acero galvanizado de 2,0 mm de

diámetro; y relleno con medios mecánicos con cantos rodados, de granulometría comprendida entre 70 y 250 mm; montaje y desmontaje del sistema de encofrado necesario para evitar la deformación de los gaviones durante su llenado y asegurar la alineación y aplomado de la estructura. Incluso cable de acero para sujeción del gavión es de S/249.50. Además, el coste de mantenimiento decenal asciende a S/. 37,43 en los primeros 10 años.

Tabla 1

Presupuesto de gaviones

Unidad	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio parcial
Materiales				
Ud	Gavión de 2000x1000x1000 mm de malla de doble torsión, hexagonal, de 50x70 mm, de alambre de acero galvanizado de 2 mm de diámetro.	0.525	90.03	47.27
m	Tablón de madera de pino, de 20x7,2 cm.	0.300	19.63	5.89
kg	Clavos de acero.	0.075	5.81	0.44
Ud	Puntal metálico telescópico, de hasta 3 m de altura.	0.010	59.76	0.60
m	Cable de acero de 2 mm de diámetro, para sujeción de malla de doble torsión.	1.750	4.98	8.72
m ³	Cantos rodados de granulometría comprendida entre 70 y 250 mm, con desgaste en el ensayo de Los Ángeles < 50.	1.100	83.06	91.37
Subtotal materiales:				154.29
Equipos				
h	Retroexcavadora hidráulica sobre neumáticos, de 105 kW.	0.089	156.48	13.93
h	Camión basculante de 12 t de carga, de 162 kW.	0.075	135.61	10.17
Subtotal equipos:				24.10
Mano de obra				
h	Operario de construcción de obra civil.	0.471	31.48	14.83
h	Oficial de construcción de obra civil.	2.351	21.86	51.39
Subtotal mano de obra:				66.22
Herramientas				
%	Herramientas	2.000	244.61	4.89
Total:				249.50

Facilidad de construcción y mantenimiento

- Cuentan con versatilidad, gracias a los materiales empleados en su fabricación, los gaviones son versátiles y pueden ser instalados en una variedad de condiciones climáticas y terrenos, incluyendo áreas con presencia de agua y lugares de difícil acceso, esta versatilidad los convierte en una solución viable para una amplia gama de aplicaciones.

Impacto ambiental

- Tienen un impacto bajo si se integran adecuadamente en el entorno, promoviendo la regeneración natural de la vegetación y estabilizando el suelo. Su instalación puede generar alteraciones temporales en el ecosistema.

3.1.1.2 Muros de contención

Representan una serie de estructuras diseñadas con base en los principios de la ingeniería civil, con el propósito de controlar la erosión derivada de la escorrentía superficial; su importancia radica en garantizar la estabilidad de la cuenca de un río, proporcionando protección contra inundaciones en sus cauces (Mira et al., 2022).

Estos muros se construyen principalmente con concreto armado, dada su capacidad para resistir el empuje de la tierra; además, el refuerzo de acero y diversas técnicas de movimiento de suelo se emplean como métodos habituales para fortalecer su estructura y aumentar su estabilidad (Sandoval & Molina, 2024). La función esencial de los muros de contención va más allá de la protección contra la erosión; también logran desempeñar uno de los papeles fundamentales en la prevención de deslizamientos de tierra y en la conservación de la integridad de las áreas ribereñas (Mira et al., 2022).

Muros de gravedad

Constituyen ser el tipo estructural de contención; en su construcción, el material principal empleado suele ser el concreto o la piedra, sin necesidad de refuerzos de acero; estos muros se caracterizan por su capacidad para resistir las fuerzas laterales del suelo y la presión hidrostática sin la necesidad de anclajes o refuerzos adicionales. Por lo general, se utilizan en situaciones donde la altura requerida se encuentra en un rango de entre 3.00 y 5.00 metros. Logra diseñarse bajo los principios de la gravedad, donde el propio peso de la estructura proporciona la estabilidad necesaria para contrarrestar las fuerzas externas (Mira et al., 2022).

Muros a gravedad armados

Representan una variante fortalecida de los muros de gravedad estándar; en este caso, se emplea acero para reforzar la estructura, lo que aumenta su capacidad para resistir fuerzas laterales y presiones hidrostáticas, permitiendo la construcción de muros con alturas de hasta 9 metros. La adición de refuerzos de acero proporciona una mayor resistencia y estabilidad estructural, lo que permite que estos muros sean utilizados en

aplicaciones que requieren alturas más significativas (Sandoval & Molina, 2024).

Particularidades y parámetros destacados de los muros de contención

Según Allen y Randall (2019) se da a través de los siguientes puntos:

Eficiencia hidráulica:

- Ofrecen una barrera sólida contra flujos de agua, pero requieren drenajes para evitar acumulaciones de presión hidrostática detrás del muro, lo que podría llevar a su falla.

Estabilidad estructural

- Su estabilidad es muy alta cuando se diseñan considerando fuerzas laterales, peso propio, y cargas hidráulicas. El uso de refuerzos (como acero) y diseños avanzados los hace resistentes incluso en terrenos inestables o zonas sísmicas.

Costo

- Alto; incluye materiales como concreto armado, procesos de diseño especializado, y mano de obra calificada. Sin embargo, su durabilidad puede justificar la inversión.

Facilidad de construcción y mantenimiento

- Construcción compleja que requiere maquinaria, encofrados, y refuerzos. El mantenimiento incluye inspecciones regulares de drenajes y reparaciones estructurales, que pueden ser costosas.

Impacto ambiental

- Generan un impacto considerable, ya que alteran el paisaje natural y bloquean el flujo de sedimentos y nutrientes. Se pueden mitigar sus efectos diseñando estructuras que permitan cierta interacción con el medio ambiente.

3.1.1.3 Espigones

Los espigones son estructuras hidráulicas ubicados a lo largo de las márgenes de los ríos, destinados a proteger y restaurar las áreas erosionadas, su función principal consiste en desviar el flujo principal de la corriente, conduciendo de manera centralizada para evitar que la fuerza del agua cause daños en las márgenes, estas estructuras, por lo general instaladas en conjunto, crean zonas de calma entre ellas, lo que facilita la sedimentación del material suspendido y ayuda a reconstruir las márgenes erosionadas

(Rivera-Trejo & Hernández-Cruz, 2020).

Uno de los principales objetivos de los espigones es fomentar la sedimentación de los materiales en suspensión, los cuales pueden actuar como refuerzo para la protección de las orillas, es esencial que los espigones produzcan un cambio suave en la dirección del flujo, evitando alteraciones bruscas que podrían generar problemas adicionales de erosión, además, para maximizar su efectividad, el espacio entre los espigones debe ser adecuado, asegurando una distribución uniforme del flujo y una óptima sedimentación (Loayza-Aguilar, 2021).

Espigones permeables

Los espigones permeables actúan como filtros naturales a lo largo de las orillas de los ríos, llegando a permitir que el agua llegue a fluir libremente por medio de ellos, esta característica los convierte en una opción óptima para ríos con altos niveles de carga de sedimentos y concentraciones significativas de material suspendido, al dejar pasar el agua, los espigones permeables ayudan a disminuir la velocidad del flujo y a distribuir de manera uniforme la energía del agua a lo largo del curso (Rivera-Trejo & Hernández-Cruz, 2020).

Su diseño permeable resulta especialmente beneficioso en entornos donde la sedimentación es una preocupación, ya que facilita la retención y deposición de sedimentos, lo que a su vez contribuye a fortalecer los márgenes del río y a mitigar la erosión, además, al permitir que el agua atraviese la estructura, los espigones permeables reducen el riesgo de erosión aguas arriba y aguas abajo, proporcionando una solución eficaz y natural para proteger y restaurar las orillas de los ríos de manera sostenible (Loayza-Aguilar, 2021).

Espigones impermeables

Los espigones impermeables son estructuras hidráulicas ubicadas a lo largo de los márgenes de los ríos que impiden el flujo de agua a través de su cuerpo. Esta característica permite modificar las condiciones hidráulicas del cauce y contribuir al mantenimiento de una profundidad adecuada para la navegación. En sectores donde la socavación es significativa y el cauce presenta tendencia al encajonamiento, los espigones impermeables pueden contribuir a la estabilización del lecho fluvial y a la reducción de procesos de erosión (Rivera-Trejo & Hernández-Cruz, 2020).

Su función es crucial en proyectos de ingeniería hidráulica destinados a mantener canales navegables, puertos y áreas de transporte fluvial en condiciones óptimas, al proporcionar una barrera sólida contra la erosión, los espigones impermeables aseguran que las vías de navegación permanezcan seguras y eficientes incluso en aguas turbulentas. Son la piedra angular para garantizar la navegabilidad de los ríos y la conectividad de las vías fluviales, proporcionando una solución confiable y duradera para los desafíos del ambiente acuático (Loayza-Aguilar, 2021).

Forma de los espigones

El espigón lineal, forma un ángulo con la orilla y está equipado con una cabeza diseñada para proteger contra la socavación en la punta, su función principal es guiar el flujo de agua y desviar la corriente lejos de las márgenes, lo que contribuye significativamente a la estabilidad de las orillas y evita la erosión (Al-Ogaili et al., 2022).

El espigón T presenta un ángulo de 90 grados con respecto a la orilla y su cabeza se alinea paralelamente al flujo de agua, esta estructura es especialmente efectiva para direccionar el flujo de manera perpendicular a la corriente principal, lo que ayuda a mitigar la erosión en las márgenes y a mantener una profundidad óptima para la navegación (Al-Ogaili et al., 2022).

Espigón en Forma de Escuadra: Con su característico ángulo que forma una "L", este tipo de espigón brinda un mayor espacio entre las estructuras, lo que facilita la sedimentación y reduce la socavación en la cabeza, esta disposición resulta muy beneficiosa para optimizar la navegación al mantener una profundidad constante en el cauce y disminuir la turbulencia del agua (Al-Ogaili et al., 2022).

Parámetros de diseño de espigones

- Variables del flujo:

Entre las variables del flujo que deben evaluarse se encuentran las profundidades mínimas, máximas y habituales del agua, así como el análisis de la proporción entre la carga suspendida y la carga de fondo en el cauce; a través de ellos se comprende el comportamiento hidráulico del río y determinar las características óptimas del espigón.

- Parámetros del cauce:

Dentro de este grupo se encuentra la inclinación y la velocidad del río, que influyen en la erosión y sedimentación del lecho fluvial; la composición del lecho, que

puede variar desde arcillas hasta guijarros, también debe ser considerada, junto con la medición de las dimensiones del cauce, incluyendo su ancho y la forma de su sección transversal; a través de ello se conoce información para diseñar un espigón que se adapte adecuadamente al entorno fluvial.

- Disponibilidad de materiales para su construcción:

Es imprescindible explorar las opciones de materiales disponibles a fin de ser construido el espigón; la selección de materiales adecuados afecta la durabilidad y resistencia del espigón, al igual que su impacto ambiental y su costo económico.

- Posibles amenazas:

Para prevenir la falla de los espigones, es necesario comprender en detalle el comportamiento hidráulico del río y evaluar el riesgo de socavación del cauce cerca del espigón; diseñar una cimentación adecuada en profundidad es crucial para garantizar la estabilidad estructural del espigón frente a las fuerzas del agua. Se debe realizar un diseño hidráulico óptimo del espigón que minimice las repercusiones de la erosión y la sedimentación, y se deben considerar la resistencia y flexibilidad estructural en el diseño para garantizar que estos se adapten a ciertos requerimientos variantes del entorno fluvial (Al-Ogaili et al., 2022).

Particularidades y parámetros destacados de los espigones

Según U.S. Army Corps of Engineers (2022) se da a través de los siguientes puntos:

Eficiencia hidráulica

- Controlan corrientes y reducen la erosión costera o fluvial. También favorecen la acumulación de sedimentos en áreas protegidas, lo que puede ser beneficioso para ciertas zonas.

Estabilidad estructural

- Son estructuras robustas, pero susceptibles a la socavación en la base. La correcta cimentación y diseño son críticos para garantizar su estabilidad.

Costo

- Alto; implica materiales duraderos (como concreto o roca) y diseño especializado, especialmente en ambientes marinos o fluviales con altas fuerzas dinámicas.

Facilidad de construcción y mantenimiento:

- Su construcción es técnica y requiere maquinaria específica. El mantenimiento puede ser complejo debido al entorno, especialmente si están sometidos a fuertes corrientes.

Impacto ambiental:

- Pueden alterar significativamente las corrientes y patrones de sedimentación, afectando ecosistemas cercanos. Sin embargo, pueden crear hábitats artificiales si se diseñan adecuadamente.

3.1.1.4 Enrocado

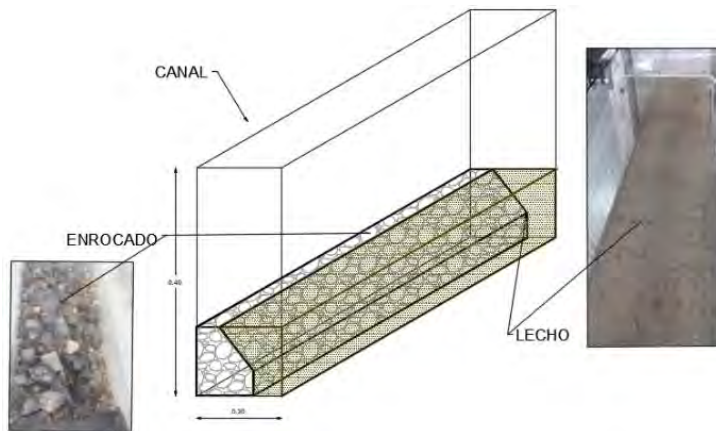
El enrocado, una técnica empleada en la protección de riberas, se basa en la disposición de bloques o cantos de roca de diversos tamaños y formas irregulares a lo largo del talud de la orilla de una corriente; la estabilidad de esta estructura se fundamenta en el peso individual de los bloques y en la interconexión entre ellos; esta práctica se aplica preferentemente en áreas donde la roca está disponible en las proximidades, siendo más conveniente el uso de piedras con forma de bloque en lugar de aquellas alargadas o redondeadas (Cely et al., 2023).

A lo largo de los años, la roca ha sido una elección frecuente para la protección de riberas debido a su capacidad para resistir fuerzas tractivas considerables, principalmente gracias a su peso; esta característica la convierte en un agente efectivo de control de erosión en entornos fluviales y costeros; además de su eficacia, el enrocado suele ser una opción más económica en comparación con otros tipos de revestimientos. Su facilidad de reparación y su mayor flexibilidad también contribuyen a su popularidad como medida de protección costera (Loayza-Aguilar, 2021).

La estabilidad de un enrocado está influenciada por variados elementos, llegando a destacar la velocidad del flujo tangencial, la orientación de la corriente principal con respecto al plano del enrocado, el ángulo del talud de la estructura y las características específicas de la roca utilizada; estos elementos son determinantes para garantizar la resistencia y durabilidad del enrocado frente a las fuerzas hidráulicas y las condiciones ambientales variables (Cely et al., 2023).

Figura 3

Simulación del diseño de un enrocado



Nota. Tomado de Cely et al. (2023).

Parámetros de selección de rocas

Según Loayza-Aguilar (2021), la selección adecuada de las rocas para la construcción de un enrocado implica considerar una serie de características intrínsecas que pueden ser evaluadas mediante un plan de ensayo de control. Estas características garantizan la eficacia, resistencia y durabilidad del enrocado en el tiempo.

- La densidad de la roca es un factor crucial que puede determinarse mediante un ensayo hidrostático. La densidad, representada comúnmente por un peso específico de 2.65 toneladas por metro cúbico, influye en la capacidad de la roca para resistir las fuerzas hidráulicas y mantener su posición en el enrocado. (Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.)
- La fragilidad o susceptibilidad a la rotura es otra característica importante que debe evaluarse. Durante la instalación y manipulación de las rocas, es probable que sufran impactos y golpes. Por lo tanto, se puede realizar un ensayo de caída soltando la roca desde una altura determinada, por ejemplo, 3.0 metros, sobre otros bloques que descansan en grava, para evaluar su resistencia a la rotura y su idoneidad para el uso en el enrocado.
- La resistencia a la meteorización es un aspecto crucial para la integridad y durabilidad del enrocado a lo largo del tiempo. Esta propiedad abarca una serie de acciones ambientales, como el hielo-deshielo, la cristalización salina, la

solubilidad y otras acciones químicas, que pueden afectar la estabilidad de las rocas y, por ende, del enrocado en su conjunto.

- La forma de las rocas es un criterio importante a considerar. Se debe evitar el uso de elementos planos, ya que esto puede comprometer la estabilidad del enrocado. Se establece como criterio que el índice de planaridad, calculado con respecto a los tres ejes de un elipsoide (a, b, c), debe ser menor o igual a dos, garantizando así una forma adecuada que favorezca la resistencia y estabilidad del enrocado.

Formas de colocado del enrocado

Existen diferentes formas de colocar enrocados con roca, cada una con sus propias características y ventajas; dos de las técnicas más comunes son el enrocado al volteo y el enrocado colocado. Ambas ofrecen soluciones efectivas para la protección de riberas y estructuras costeras, aunque difieren en su método de instalación y sus resultados finales.

- Enrocado con roca colocada

Se distingue por su proceso más meticuloso, que implica la disposición cuidadosa de rocas con maquinaria especializada como cargadores frontales o excavadoras; aunque puede requerir un menor volumen de roca y ofrecer un talud más estable, sus ventajas van mucho más allá. La superficie resultante presenta un trabazón más uniforme, lo que reduce la turbulencia del flujo de agua y otorga una apariencia más refinada; su capacidad para adaptarse a terrenos irregulares y la facilidad de drenaje a través de los intersticios entre los bloques ofrecen una protección duradera y confiable; además, su integración natural en el entorno circundante añade un toque de armonía paisajística (Loayza-Aguilar, 2021).

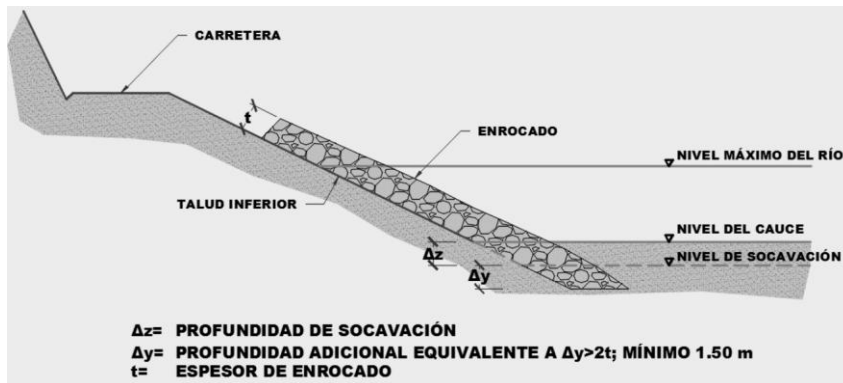
- Enrocado con roca al volteo

Se distingue por su proceso de revestimiento mediante la descarga directa de rocas pesadas, a menudo llevado a cabo mediante volquetes; aunque puede requerir un mayor volumen de roca y generar un talud de acabado menos estable, este método presenta una serie de virtudes inigualables. La flexibilidad inherente de la capa de enrocado ofrece una resistencia considerable ante los movimientos menores de las márgenes del río, mientras que la capacidad de reparación simplificada mediante la adición de más roca constituye un atractivo adicional; además, su construcción relativamente sencilla y la posibilidad de estimular el crecimiento de vegetación en entornos de agua dulce añaden un componente estético y ambiental valioso. Sin embargo, es importante tener en cuenta que su

sensibilidad a los factores económicos locales puede ser una limitación significativa en algunos contextos (Loayza-Aguilar, 2021).

Figura 4

Protección de la ribera con enrocado



Nota. Adaptado de Cely et al. (2023).

Criterios para la aplicación del enrocado

La petrografía de una roca de alta calidad se caracteriza por su aspecto fresco y cristalino, sin presencia de arcilla ni minerales solubles, y con pocas imperfecciones (William et al., 2022). Su densidad es un indicador importante, ya que su peso seco por unidad de volumen debe ser superior a 2.2 toneladas por metro cúbico. Esto implica que la roca no debe tener porosidad, lo que la hace más resistente. En cuanto a la absorción de agua, una roca de calidad debe absorber como máximo un 1%. Cualquier valor por encima del 2% podría indicar problemas de durabilidad en la roca.

La capacidad de resistir la acción de los sulfatos es otro aspecto clave; las pérdidas en este tipo de prueba no deben superar el 5%. Una roca que pierde más del 10% se considera de calidad inferior. Además, es importante verificar su resistencia al deterioro causado por el glicol-etileno. La presencia de signos de deterioro en esta prueba podría indicar la presencia de arcilla, lo que afecta negativamente la calidad de la roca (Cely et al., 2023).

La resistencia a la abrasión es otro criterio importante, donde la roca debe perder menos del 20% de su masa después de 500 revoluciones. También es crucial que la roca no se agriete durante el proceso de humedecimiento y secado, lo que podría ser un signo de baja calidad.

La prueba de caída es esencial, dado que una roca de calidad no debe romperse ni

agrietarse durante esta prueba, lo que garantiza su resistencia y durabilidad en condiciones reales de uso (William et al., 2022).

Particularidades y parámetros destacados de los gaviones

Según U.S. Army Corps of Engineers (2022) se da a través de los siguientes puntos:

Eficiencia hidráulica

- El enrocado disipa eficazmente la energía de las corrientes y olas gracias a su estructura irregular, lo que reduce la velocidad del flujo y protege contra la erosión. Es especialmente eficaz en zonas con altas energías hidráulicas, como ríos y costas. Su permeabilidad permite la infiltración del agua, evitando presiones hidrostáticas excesivas.

Estabilidad estructural

- La estabilidad depende del peso, tamaño, y la correcta colocación de las rocas. Diseños con capas adecuadas (núcleo, filtro y capa exterior) garantizan resistencia al deslizamiento y a la socavación. Es flexible, lo que le permite adaptarse a pequeños movimientos del terreno sin colapsar.

Costo

- Aunque su costo inicial puede ser elevado debido al transporte y colocación de las rocas, es competitivo en términos de durabilidad y bajo mantenimiento a largo plazo. En zonas cercanas a canteras, los costos disminuyen considerablemente.

Facilidad de construcción y mantenimiento:

- La construcción requiere maquinaria pesada para transportar y colocar las rocas. Su mantenimiento es sencillo, ya que generalmente solo se necesita reemplazar las piedras desplazadas tras eventos extremos.

Impacto ambiental:

- Puede causar alteraciones en el flujo natural del agua y afectar la flora y fauna local. Sin embargo, con diseño adecuado, puede integrarse al entorno y promover hábitats secundarios para organismos acuáticos.

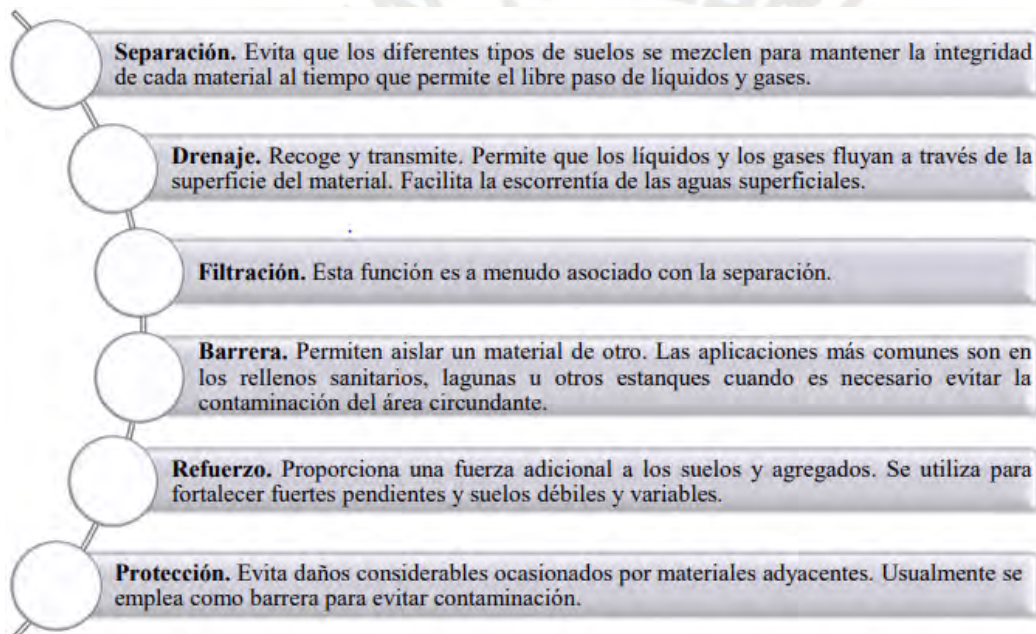
3.1.1.5 Obras de protección con geosintéticos

Los geosintéticos son materiales fabricados a partir de polímeros sintéticos o

naturales, como el polipropileno, poliéster, poliamida y polietileno, siendo este último el más utilizado. Según Koerner (2012) y US Fabrics (2012, citado por Stokes et al., 2012), el polietileno destaca por su superior desempeño mecánico, durabilidad a largo plazo, resistencia a condiciones climáticas adversas y tolerancia a altas temperaturas en comparación con otros polímeros. Estos materiales se han consolidado como elementos clave en el desarrollo de proyectos de ingeniería, especialmente en obras de defensa costera, gracias a su bajo costo y alta efectividad. Sus funciones principales se clasifican en seis categorías, tal como se muestra en la Figura 5, mientras que la Tabla 1 presenta un resumen de los tipos de geosintéticos más comunes en ingeniería.

Figura 5

Principales funciones de los geosintéticos



Nota. Tomado de Chatpattananan et al. (2021)

Tabla 2

Tipos de geosintéticos

Técnica	Descripción
Geotextil	Material textil plano, permeable polimérico que puede ser no tejido empleado en contacto con el suelo u otros materiales
Geomallas	Estructuras bidimensionales conectadas de manera integrada por extrusión con aberturas de suficiente tamaño para la trabazón del material contenido.
Geomembranas	Recubrimiento o barrera de baja permeabilidad empleada para controlar la migración de líquidos.

Tubo geotextil Estructura de geotextil tejido y cosido de alta resistencia. Puede emplearse una combinación de geotextiles tejidos y no tejidos para obtención de características específicas

Eficiencia hidráulica:

- Su eficiencia radica en la capacidad de estabilizar suelos, controlar la erosión y filtrar el agua. Son especialmente útiles en combinación con otros sistemas.

Estabilidad estructural:

- Proporcionan estabilidad al suelo al actuar como refuerzo y permitir la disipación del agua. Su resistencia depende del tipo de geosintético utilizado y su correcta instalación.

Costo:

- Moderado a bajo; los materiales son económicos y ligeros, pero su correcta instalación puede requerir mano de obra especializada.

Facilidad de construcción y mantenimiento:

- Son fáciles de instalar, y su bajo peso facilita el transporte y manipulación. El mantenimiento es mínimo y generalmente implica revisar su integridad tras eventos extremos.

Impacto ambiental:

- Bajo impacto ambiental, ya que se integran bien al entorno y requieren menos extracción de materiales naturales. También pueden fomentar la revegetación del área.

3.1.2 Diseño geométrico y estructural

Es el proceso de planificación y configuración tanto de la forma física como de los elementos estructurales que componen una barrera o estructura destinada a proteger las áreas adyacentes a un río contra la erosión, las crecidas y otros eventos hidrológicos; esto implicó considerar aspectos como la topografía del terreno, el tipo de suelo, el caudal del río, la altura y forma estructural, y los elementos constructivos, a razón de garantizar la eficacia y el punto estable de la defensa ribereña (Shin et al., 2022).

Caudal máximo de diseño:

Comprende las cantidades máximas de agua del cual se espera que fluya a través de un río o canal en condiciones normales o durante eventos extremos, como inundaciones; este parámetro es fundamental en el diseño de infraestructuras hidráulicas, como presas, canales de desagüe y defensas ribereñas, ya que determina la capacidad que deben tener estas estructuras para gestionar y controlar el flujo de agua de manera segura y eficiente (Alvarez & Quilumbaquin, 2021).

$$Q = Fc * A * (L/T)$$

Pendiente del río (S):

Es la inclinación o declive del lecho del río en una determinada longitud; se expresa generalmente en metros de descenso vertical por cada kilómetro de longitud horizontal (m/km) o en porcentaje; la pendiente influye en las velocidades del flujo de agua, las erosiones del lecho y de las riberas, y la formación de meandros y otros rasgos del paisaje fluvial (Wang et al., 2022).

Tirante:

Es la profundidad del agua medida desde el fondo del cauce hasta la superficie libre del líquido, haciendo referencia a la altura del agua en un punto específico a lo largo del cauce, tiende a influir en la velocidad del flujo, lo capaz que es al transportar sedimentos y la capacidad de carga de la corriente (Jiménez et al., 2020).

$$t = \left[\frac{Q}{(K_s * b * S^{1/2})^{3/5}} \right]$$

Base de río:

La base del río es el lecho o fondo del cauce fluvial, que está compuesto por sedimentos, rocas y otros materiales transportados por el agua; es la parte más baja y plana del río, sobre la cual fluye el agua y se depositan los sedimentos arrastrados por la corriente; este parámetro determina la forma y características del lecho, así como la dinámica de erosión y sedimentación en el curso del río (Mummadisingh & Sengupta, 2023).

3.2 Estudios fundamentales para el diseño de una defensa ribereña

El diseño de una defensa ribereña requiere diversos estudios clave, entre los que destacan el análisis hidrológico para determinar los caudales y niveles de agua, estudios geotécnicos que permiten evaluar la estabilidad y condiciones del suelo, y estudios

topográficos que definen la configuración del terreno. También se realizan modelaciones hidráulicas para simular el comportamiento del flujo de agua. (Chikute & Sonar, 2021).

3.2.1 Criterios generales de diseño

3.2.1.1 Criterios técnicos

Caudal de diseño:

Resulta esencial al planificar las defensas ribereñas, ya que está estrechamente ligado al riesgo potencial asociado con inundaciones catastróficas debido a la ausencia de estructuras de protección adecuadas, diversos expertos sugieren considerar periodos de retorno que oscilen entre los 200 y 500 años al evaluar el riesgo inherente a estas situaciones extremas, en otras palabras, se busca anticipar y mitigar los efectos de las inundaciones más devastadoras al determinar los caudales de diseño apropiados para garantizar la seguridad de las áreas ribereñas y las comunidades adyacentes (Lawrence, 2020).

Altura y profundidad de la zona a proteger:

Se basa en un análisis hidráulico detallado de los niveles máximos de agua, considerando el periodo de diseño establecido, Además de estos niveles máximos, se debe incorporar la altura de las olas que puedan afectar las riberas durante eventos extremos; siendo requerido añadir un factor de seguridad para garantizar que las defensas ribereñas puedan resistir condiciones aún más severas de las previstas inicialmente (Zelst et al., 2021).

Determinación de longitud a proteger:

Al determinar la longitud que debe protegerse a lo largo de la ribera, es esencial considerar que esta extensión debe ser mayor que la porción del terreno que experimenta un impacto significativo debido a las fuerzas erosivas, es decir, la zona a resguardar debe abarcar no solo el área que sufre erosión severa, sino también una extensión adicional para garantizar una protección completa y efectiva. Esto se fundamenta en la necesidad de prever y mitigar los efectos de la erosión a lo largo de un tramo suficientemente amplio, asegurando así la estabilidad y la integridad de la ribera en su conjunto (Zelst et al., 2021).

Análisis morfológico, hidráulico y geológico:

Dicho análisis implica un examen detallado de las condiciones hidráulicas y las características morfológicas del río, esto incluye la evaluación de variables como las

velocidades del agua y las fuerzas tractivas, para llevar a cabo este análisis de manera precisa, se recurre al uso de software especializado, como el HEC-RAS, el cual permite modelar y simular diversos escenarios hidráulicos. Además, es necesario realizar un estudio geológico exhaustivo para comprender la composición del lecho del río y su influencia en la dinámica fluvial. Este análisis integral proporciona valores relevantes correspondientes al diseño y al ser implementadas medidas de gestión y protección de riesgos en áreas ribereñas vulnerables (Šoltész et al., 2021).

Sección geométrica de la corriente:

La caracterización de la sección geométrica del cauce se realiza a partir de información batimétrica obtenida mediante levantamientos topográficos detallados del lecho y las márgenes del río. Estos levantamientos consideran el establecimiento de secciones transversales a intervalos definidos a lo largo del cauce, lo que permite representar con mayor precisión la morfología del río. Asimismo, se establecen parámetros técnicos como la escala del levantamiento, la resolución de los datos y la densidad de puntos medidos, factores que influyen directamente en la calidad de la representación geométrica. Esta información constituye un insumo fundamental para el análisis hidráulico y la modelación del flujo, ya que permite estimar con mayor precisión la capacidad hidráulica del cauce y el comportamiento del río frente a eventos de crecida, facilitando así el diseño adecuado de estructuras de protección ribereña (Chow, 1959; USACE, 2016; Brunner, 2023).

Coefficiente de Manning:

La rugosidad de la superficie del lecho del río, requiere un análisis exhaustivo que considera diversos factores, este análisis no solo contempla la morfología del río, sino también la composición de los sedimentos y las características del flujo en general. La rugosidad del lecho del río juega un papel crucial en el comportamiento hidráulico, afectando la velocidad y la distribución del flujo, por lo tanto, es esencial tener en cuenta estos elementos al determinar el coeficiente de Manning, ya que influyen directamente en la precisión de los cálculos hidráulicos y, por ende, en el diseño adecuado de las defensas ribereñas (Šoltész et al., 2021).

Determinación del Ancho Estable del Cauce:

El ancho estable de un río corresponde a la dimensión transversal que permite el transporte del caudal y de los sedimentos en condiciones de equilibrio hidráulico y

morfológico, evitando procesos excesivos de erosión o sedimentación. En ríos aluviales, la geometría del cauce tiende a ajustarse naturalmente en función del caudal dominante, las características del sedimento y las condiciones hidráulicas del flujo. La estimación del ancho estable es un aspecto fundamental en el diseño de obras de encauzamiento y defensas ribereñas, ya que permite garantizar la estabilidad del cauce frente a eventos hidrológicos extremos (Simons & Henderson, 1961; Chow, 1959).

Diversos investigadores han desarrollado metodologías empíricas y semiempíricas para estimar el ancho estable de los ríos, basadas en relaciones entre variables hidráulicas, hidrológicas y sedimentológicas. Entre los métodos más utilizados en ingeniería fluvial se encuentran los propuestos por Simons y Henderson, Altunin–Manning, Blench y Pettis, los cuales han sido aplicados en el análisis de ríos aluviales y en el diseño de canales estables (Blench, 1957; Simons & Henderson, 1961).

A continuación, se presentan los métodos empleados:

A) Método de Simons y Henderson

El método propuesto por Simons y Henderson se basa en el análisis del comportamiento de los ríos aluviales y en el equilibrio entre el flujo hidráulico y el transporte de sedimentos. Según este enfoque, la estabilidad del cauce se alcanza cuando la capacidad del flujo para transportar sedimentos es igual a la carga sedimentaria disponible, lo que permite mantener una geometría relativamente constante del canal (Simons & Henderson, 1961).

Este método establece relaciones empíricas entre el caudal dominante y el ancho del cauce, obtenidas a partir del análisis de datos observados en ríos naturales. Una de las formulaciones simplificadas para estimar el ancho estable del cauce puede expresarse como:

$$B = a * Q^b$$

donde:

B = ancho estable del cauce (m)

Q = caudal de diseño o caudal dominante (m³/s)

a, b = coeficientes empíricos obtenidos a partir de observaciones en ríos aluviales

Este enfoque es ampliamente utilizado en estudios de morfología fluvial para

estimar dimensiones aproximadas del cauce bajo condiciones de equilibrio hidráulico (Simons & Henderson, 1961).

B) Método de Altunin – Manning

El método de Altunin–Manning se fundamenta en la aplicación de la ecuación de Manning para el flujo en canales abiertos, considerando que el ancho del canal debe permitir transportar el caudal de diseño sin generar velocidades que provoquen erosión excesiva del lecho o de las márgenes (Altunin, 1970).

La ecuación de Manning se expresa como:

$$V = \frac{1}{n} * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}$$

donde:

V = velocidad media del flujo (m/s)

n = coeficiente de rugosidad de Manning

R = radio hidráulico (m)

S = pendiente hidráulica

A partir de esta relación, el caudal puede determinarse mediante la ecuación de continuidad:

$$Q = A * V$$

donde:

Q = caudal (m³/s)

A = área hidráulica de la sección (m²)

Mediante estas ecuaciones es posible estimar las dimensiones hidráulicas del canal, incluyendo el ancho, asegurando condiciones de flujo estables (Chow, 1959; Altunin, 1970).

C) Método de Blench

El método desarrollado por Blench se basa en el concepto de régimen estable de canales aluviales, el cual establece que las dimensiones del cauce dependen de la interacción entre el caudal, el tamaño del sedimento y las propiedades del material del lecho (Blench, 1957).

Blench propuso una relación empírica para estimar el ancho del canal en función del caudal:

$$B = k * Q^{0.5}$$

donde:

B = ancho del canal (m)

Q = caudal (m³/s)

k = coeficiente empírico que depende de las características del sedimento y del material del lecho

Este método ha sido ampliamente utilizado en el diseño de canales en materiales aluviales y en el análisis de estabilidad de ríos naturales (Blench, 1957).

D) Método de Pettis

El método de Pettis es una formulación empírica basada en el análisis de ríos naturales en condiciones de equilibrio geomorfológico. Este enfoque considera que el ancho del cauce está relacionado con el caudal dominante que circula por el río, estableciendo relaciones hidráulicas que permiten estimar dimensiones estables del canal (Pettis, 1964).

Una expresión general utilizada en este método se puede representar como:

$$B = c * Q^d$$

donde:

B = ancho estable del cauce (m)

Q = caudal de diseño (m³/s)

c, d = coeficientes empíricos obtenidos a partir de observaciones en ríos aluviales

Este método ha sido aplicado en estudios de ingeniería fluvial y morfología de ríos, permitiendo estimar dimensiones aproximadas del cauce bajo condiciones de equilibrio hidráulico (Pettis, 1964).

Socavación en Obras Hidráulicas

La socavación es el proceso de remoción del material del lecho o de las márgenes de un río producido por la acción del flujo del agua. Este fenómeno ocurre cuando las fuerzas hidráulicas generadas por la corriente superan la resistencia del material del lecho,

provocando erosión y profundización del cauce. La estimación de la socavación es un aspecto fundamental en el diseño de estructuras hidráulicas como defensas ribereñas, diques y puentes, ya que permite garantizar la estabilidad de las obras frente a eventos de avenida (Chow, 1959; Richardson & Davis, 2001).

En ríos aluviales, la socavación depende principalmente de factores como el caudal, la velocidad del flujo, la granulometría del sedimento, la pendiente del cauce y la geometría del río. Debido a la complejidad del fenómeno, diversos investigadores han desarrollado metodologías empíricas y semiempíricas para estimar la profundidad de socavación en función de estas variables hidráulicas y sedimentológicas (Maza & García, 1996).

En el presente estudio se aplicaron los métodos de Lischtván–Lebediev, Maza & Echavarría, Blench y HEC-RAS, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos mediante diferentes enfoques y adoptar un valor representativo de socavación para el diseño de las defensas ribereñas del río Sechín.

A) Método de Lischtván-Lebediev:

El método de Lischtván–Lebediev se basa en el análisis del equilibrio entre las fuerzas hidráulicas del flujo y la resistencia del material del lecho. Este método considera principalmente la velocidad del flujo, la profundidad hidráulica y el tamaño de las partículas del sedimento.

Una de las formulaciones empleadas para estimar la profundidad de socavación puede expresarse como:

$$hs = k * \left(\frac{V^2}{g * d} \right)^m$$

donde:

hs = profundidad de socavación (m)

V = velocidad media del flujo (m/s)

g = aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

d = diámetro característico del sedimento (m)

k, m = coeficientes empíricos

Este método ha sido ampliamente utilizado en estudios de ríos aluviales debido a

su capacidad para representar la interacción entre el flujo hidráulico y las características del sedimento (Lischtvan & Lebediev, 1959).

B) Método de Maza & Echavarría:

El método propuesto por Maza y Echavarría se basa en estudios experimentales realizados en ríos y canales aluviales en América Latina. Este método considera la influencia de variables hidráulicas como la velocidad del flujo, el tirante hidráulico y el tamaño del sedimento del lecho.

La profundidad de socavación puede estimarse mediante una relación empírica de la forma:

$$h_s = C * \left(\frac{Q}{B}\right)^n$$

donde:

h_s = profundidad de socavación (m)

Q = caudal (m^3/s)

B = ancho del cauce (m)

C, n = coeficientes empíricos determinados experimentalmente

Este método es ampliamente utilizado en el diseño de obras hidráulicas en ríos de régimen aluvial, debido a que incorpora variables representativas del flujo y de la geometría del cauce (Maza & García, 1996).

C) Método de Blench:

El método desarrollado por Blench se basa en el concepto de régimen estable de canales aluviales, el cual establece que la profundidad de socavación depende del equilibrio entre las fuerzas hidráulicas del flujo y la resistencia del material del lecho.

La expresión general utilizada en este método puede representarse como:

$$h_s = \alpha * (Q)^{0.33}$$

donde:

h_s = profundidad de socavación (m)

Q = caudal de diseño (m^3/s)

α = coeficiente empírico asociado a las características del sedimento y del cauce

Este método es ampliamente utilizado en estudios de ingeniería fluvial debido a su simplicidad y a su aplicación en ríos con lechos aluviales (Blench, 1957).

D) Cálculo de Socavación mediante HEC-RAS:

El modelo HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center – River Analysis System) es una herramienta computacional desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE) para el análisis hidráulico de ríos. Este modelo permite simular el flujo en régimen permanente y no permanente, así como estimar procesos de erosión y sedimentación en el cauce (Brunner, 2016).

El modelo resuelve las ecuaciones de Saint-Venant para flujo unidimensional:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

Ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{gQ|Q|n^2}{AR^{4/3}} = 0$$

donde:

A = área hidráulica

Q = caudal

H = carga hidráulica

R = radio hidráulico

n = coeficiente de Manning

El uso de HEC-RAS permite estimar la socavación mediante simulaciones hidráulicas considerando la geometría real del cauce, las condiciones de flujo y las características del sedimento.

Métodos para la Estimación del Tiempo de Concentración:

El tiempo de concentración (T_c) es un parámetro hidrológico fundamental que representa el tiempo requerido para que una gota de agua precipitada en el punto más alejado de la cuenca llegue a la sección de salida. Este parámetro es esencial en la

modelación hidrológica, ya que determina el momento en que toda la cuenca contribuye al caudal de escorrentía durante un evento de precipitación (Chow, Maidment & Mays, 1988).

Debido a la dificultad de medir directamente este parámetro, se han desarrollado diversos métodos empíricos que permiten estimarlo en función de las características geomorfológicas de la cuenca, tales como la longitud del cauce principal, la pendiente del terreno y las condiciones de cobertura del suelo.

A) Método de Kirpich:

El método propuesto por Kirpich es uno de los más utilizados para estimar el tiempo de concentración en cuencas pequeñas y medianas. Este método fue desarrollado a partir de estudios experimentales realizados en cuencas agrícolas en Tennessee (Estados Unidos) y establece una relación entre la longitud del cauce principal y la pendiente media del terreno (Kirpich, 1940).

La ecuación se expresa de la siguiente forma:

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

donde:

T_c = tiempo de concentración (min)

L = longitud del cauce principal (m)

S = pendiente media del cauce (m/m)

Este método es ampliamente utilizado en estudios hidrológicos debido a su simplicidad y aplicabilidad en cuencas rurales con pendientes moderadas (Chow et al., 1988).

B) Método de California Culverts Practice:

El método California Culverts Practice fue desarrollado para el diseño de obras de drenaje en carreteras por el Departamento de Transporte de California. Este método permite estimar el tiempo de concentración considerando la longitud del flujo y la diferencia de elevación entre el punto más alto de la cuenca y su salida (California Department of Transportation, 2007).

La expresión se define como:

$$T_c = 0.87 * \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385}$$

donde:

T_c = tiempo de concentración (min)

L = longitud del flujo (km)

H = diferencia de elevación entre el punto más alto y la salida de la cuenca (m)

Este método ha sido aplicado ampliamente en el diseño de alcantarillas y obras de drenaje, especialmente en estudios de hidrología aplicada a infraestructura vial (Caltrans, 2007).

C) Método de Hathaway:

El método de Hathaway es otro procedimiento empírico utilizado para estimar el tiempo de concentración en cuencas pequeñas. Este método relaciona la longitud del flujo con la pendiente media del terreno, permitiendo estimar el tiempo de respuesta hidrológica de la cuenca (Hathaway, 1945).

La ecuación se expresa como:

$$T_c = 0.606 * \left(\frac{L}{S^{0.5}}\right)^{0.467}$$

donde:

T_c = tiempo de concentración (min)

L = longitud del flujo principal (m)

S = pendiente media del terreno (m/m)

Este método ha sido utilizado en diversos estudios hidrológicos como una alternativa para estimar el tiempo de concentración en cuencas con características geomorfológicas variables (McCuen, 2004).

Modelos de Estimación de Producción de Sedimentos:

A continuación, se presenta los métodos utilizados para la estimación de producción de Sedimentos:

A) Método MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation)

El método MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) es una modificación de la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE), desarrollada para estimar la producción de sedimentos generada por eventos de escorrentía en una cuenca hidrográfica. A diferencia del modelo USLE, que utiliza la energía de la lluvia como factor principal de erosión, el método MUSLE reemplaza este factor por el producto del volumen de escorrentía y el caudal pico, permitiendo estimar la cantidad de sedimentos transportados durante eventos hidrológicos específicos.

Este modelo es ampliamente utilizado en estudios hidrológicos y de gestión de cuencas debido a que permite evaluar la generación de sedimentos asociada a eventos de tormenta y diferentes periodos de retorno, siendo compatible con modelos hidrológicos como HEC-HMS.

La ecuación general del modelo MUSLE se expresa como:

$$\text{Sed} = 11.8 * \left(\frac{Q}{qp} \right)^{0.56} K * LS * C * P$$

donde:

Sed = producción de sedimentos (toneladas)

Q = volumen de escorrentía (m³)

qp = caudal pico (m³/s)

K = factor de erodabilidad del suelo

LS = factor de longitud y pendiente de la ladera

C = factor de cobertura y manejo del suelo

P = factor de prácticas de conservación del suelo

El modelo MUSLE ha demostrado ser una herramienta confiable para la estimación de sedimentos a escala de cuenca, particularmente en estudios de erosión hídrica y transporte de sedimentos asociados a eventos extremos.

B) Método Onstad – Foster

El modelo Onstad–Foster es una metodología desarrollada para estimar la producción de sedimentos en cuencas hidrográficas a partir de eventos de escorrentía superficial. Este método se basa en la relación entre el volumen de escorrentía, el caudal pico y las características físicas de la cuenca, permitiendo estimar el transporte de

sedimentos generado durante eventos de precipitación intensa.

El enfoque de Onstad y Foster se utiliza principalmente para mejorar la estimación de sedimentos en comparación con métodos empíricos tradicionales, considerando parámetros hidrológicos asociados a la generación de escorrentía y la capacidad de transporte del flujo.

La formulación general del método se expresa mediante una relación entre el volumen de escorrentía y el caudal máximo, integrando factores asociados a la erodabilidad del suelo y las características topográficas de la cuenca.

Este método ha sido aplicado en diversos estudios de erosión y transporte de sedimentos, especialmente en cuencas agrícolas y cuencas con procesos de erosión activa

3.2.1.2 Criterios económicos

En el ámbito de proyectos hidráulicos, se plantea la necesidad de hallar un balance óptimo entre el criterio de diseño, los costos implicados y los beneficios sociales, ya sea de forma explícita o implícita, en la condición específica de las obras de protección ribereña, su viabilidad económica se establece en función de si la inversión realizada se ve compensada por daños evitados gracias a la intervención (Oberhagemann et al., 2020).

Es fundamental recalcar que, si bien los aspectos económicos son relevantes, no deben anteponerse a la seguridad del sistema de defensa ribereña, por ende, al evaluar la conveniencia de una obra, es esencial considerar también los potenciales efectos adversos a mediano o largo plazo que podrían surgir como consecuencia de la intervención, ofreciendo protección y la sustentabilidad a largo plazo de las áreas ribereñas (Zelst et al., 2021).

3.2.2 Modelamiento de defensa ribereña

Es proceso integral de análisis, diseño y planificación enfocado en reducir los riesgos asociados a la erosión e inundaciones en áreas cercanas a cuerpos de agua. Esta disciplina es esencial dentro de la ingeniería hidráulica y civil, ya que busca desarrollar soluciones sostenibles y efectivas para proteger ríos, arroyos, lagos y las zonas aledañas de los efectos adversos de fenómenos hidrológicos extremos y el cambio climático (Hasan & Toda, 2024).

Asimismo, abarca diversas etapas interrelacionadas, desde la recopilación y análisis de datos hidrológicos y topográficos, hasta la evaluación de riesgos, selección de

tecnologías y materiales adecuados, e implementación de medidas de protección. Utilizando herramientas avanzadas de modelado hidráulico y análisis geoespacial, los ingenieros y expertos en gestión hídrica pueden simular el comportamiento de los cuerpos de agua, prever posibles inundaciones, identificar áreas vulnerables y definir las estrategias más efectivas para su protección (Polomčić et al., 2022).

Además, el proceso también considera aspectos sociales y económicos clave, involucrando activamente a las comunidades locales y a otras partes interesadas en la toma de decisiones. Esto asegura que las soluciones sean socialmente aceptables, ambientalmente sostenibles y económicamente viables a largo plazo (De La Cruz et al., 2022).

3.2.3 Estudio Topográfico

El estudio topográfico tiene como finalidad obtener una representación precisa de la morfología del terreno dentro del área de estudio. Para ello, el levantamiento se realizó mediante técnicas de fotogrametría aérea utilizando vehículos aéreos no tripulados (UAV o drones), lo que permitió capturar imágenes de alta resolución del área intervenida. Posteriormente, estas imágenes fueron procesadas mediante software especializado para generar productos cartográficos como modelos digitales de superficie (MDS), ortomosaicos georreferenciados y curvas de nivel, los cuales permiten describir con precisión la configuración del terreno y las variaciones del relieve.

El posicionamiento y georreferenciación de la información se realizó mediante puntos de control en tierra obtenidos con sistemas de posicionamiento global (GPS/GNSS), lo que garantiza la precisión espacial de los datos generados. Este tipo de levantamiento permite obtener información detallada del terreno en menor tiempo y con alta resolución, siendo ampliamente utilizado en estudios de ingeniería civil, hidráulica y planificación territorial (Colomina & Molina, 2014; Nex & Remondino, 2014; Turner et al., 2016).

3.2.4 Estudio de mecánicas de suelos

El estudio de mecánicas de suelos es un campo de la ingeniería civil enfocado en entender las propiedades físicas y la forma en cómo se comportan mecánicamente los suelos; esto implica investigar su composición, estructura, capacidad de carga, resistencia, entre otras características (Verma & Kumar, 2021).

Método de Ensayo para el Análisis Granulométrico:

Empleado para conocer en una muestra de suelo como se distribuyen los tamaños de partículas; este análisis es efectuado a través del tamizado de las muestras por medio de una serie de tamices de diferentes aberturas y la posterior medición de la proporción de material que se retenga en los tamices; este proceso proporciona información crucial sobre la textura y gradación del suelo, lo que es fundamental para su clasificación y uso en obras de ingeniería (Verma & Kumar, 2021).

Método de Ensayo para Determinar el Contenido de humedad de un Suelo:

Permite calcular la cantidad de agua presente en las muestras de suelo en correspondencia a su peso seco; dicho proceso implica secar la muestra a una temperatura específica para eliminar toda la humedad, y luego medir el peso de la muestra seca y compararlo a través de su peso original; el valor resultante obtenido logra ser crucial para evaluar la plasticidad, compactibilidad y estabilidad del suelo (Sugianto et al., 2022).

Método de Ensayo para Determinar el Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos:

Este método de ensayo se utiliza para el conocimiento del comportamiento plástico de los suelos; el límite líquido es el contenido de humedad en el que los suelos cambian de un estado semilíquido a uno plástico, por otro lado, respecto al límite plástico es el contenido de humedad en el que los suelos se vuelven quebradizos; el índice de plasticidad tiende a ser calculado por medio del valor diferencial entre estos dos límites y evidencia una de las medidas de la plasticidad en los suelos (Verma & Kumar, 2021).

Método para la clasificación de suelos con propósitos de ingeniería SUCS:

SUCS es una metodología estándar utilizado para clasificar y describir los suelos con fines de ingeniería; este sistema tiende a clasificar a los suelos en función de sus propiedades físicas y características de ingeniería, como tamaño de partículas, distribución de tamaños, plasticidad, y permeabilidad; esta clasificación es ampliamente utilizada en el diseño de cimentaciones, terraplenes, y otras estructuras geotécnicas (Guillén et al., 2022).

Ensayo normalizado para el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas drenadas

Este ensayo es una prueba estandarizada utilizada para el conocimiento de la

resistencia al corte de un suelo bajo condiciones específicas de drenaje; consiste en aplicar fuerzas de corte a una muestra de suelo confinada, mientras se mide la deformación y se registra la carga aplicada; siendo esencial para evaluar la estabilidad de estructuras como muros de contención, terraplenes, y cimientos bajo cargas cíclicas o estáticas (Mahdi & Aziz, 2023).

3.2.5 Estudio hidrológico

De acuerdo con Xu et al. (2022), el estudio hidrológico abarca diversas facetas cruciales para comprender y gestionar de manera efectiva los recursos hídricos; dentro de este análisis, se destacan varios elementos clave:

Descarga Máxima; este aspecto se centra en identificar los niveles máximos de flujo de agua en un área determinada durante distintos períodos del año; por lo general, se observa un pico en la descarga alrededor de los meses de enero y marzo, con la excepción de abril, cuando las precipitaciones en las áreas medias y elevadas de la cuenca pueden generar inundaciones. En contraposición, los meses de septiembre a noviembre suelen experimentar los caudales más bajos, caracterizando así los períodos secos; estos extremos en los valores de descarga permiten diseñar estrategias hidráulicas que controlan, almacenan, regulan y equilibran los recursos hídricos, fortaleciendo así la resiliencia ante eventos extremos (Xu et al., 2022).

Vida Útil del Proyecto; en el proceso de diseño de infraestructuras hidráulicas, es esencial considerar tanto la metodología de diseño como el período de retorno de eventos hidrológicos significativos; la vida útil estimada de una estructura, junto con el análisis de la frecuencia de eventos, informa sobre la durabilidad y la capacidad de adaptación frente a condiciones cambiantes (Xu et al., 2022). Por ejemplo, si logra estimarse una vida útil igual a 50 años para una estructura, se deben contemplar eventos que ocurran con una probabilidad mayor durante este período, garantizando así su funcionalidad a lo largo del tiempo.

Precipitaciones; estas representan la principal fuente de agua en la superficie terrestre y son fundamentales para diversos usos y actividades humanas; la medición precisa de las precipitaciones, así como la comprensión de los métodos para pronosticarlas, son aspectos esenciales para la gestión eficaz del agua; se emplean diversos instrumentos y tecnologías, incluidos datos satelitales y sistemas de monitoreo en tierra, para obtener estimaciones precisas de la precipitación y su distribución espacial

(Xu et al., 2022).

Inundaciones; estas constituyen un riesgo creciente, especialmente dentro del contexto de la planificación urbana y la mitigación de desastres; pueden desencadenarse por diversas causas, como lluvias intensas, deshielo, tormentas o desbordamientos de cuerpos de agua; las inundaciones repentinas, en particular, pueden ocurrir sin previo aviso y causar daños significativos en infraestructuras, viviendas, agricultura y otros sectores (Xu et al., 2022).

Periodo de retorno; es el tiempo promedio entre dos eventos de una magnitud dada, como una crecida, para el diseño se utilizan periodos de retorno para dimensionar estructuras de manera adecuada (Xu et al., 2022).

Caudal de diseño; es el caudal máximo estimado para el cual se diseña la defensa ribereña, considerando un nivel de protección específico contra inundaciones, normalmente basado en eventos extremos con una cierta probabilidad de ocurrencia (Xu et al., 2022).

Caudal máximo, es la máxima cantidad de agua que fluye por un río en un periodo de tiempo específico, generalmente asociado a eventos de lluvias intensas o deshielos (Xu et al., 2022).

Caudal medio y caudales mínimos; es el caudal medio es el valor promedio del flujo del río durante un período de tiempo, mientras que los caudales mínimos son los valores más bajos que el caudal del río puede alcanzar durante el mismo período (Xu et al., 2022).

Curvas de crecida o hidrogramas; representan la variación del caudal del río con el tiempo durante un evento de crecida, en donde se muestran cómo cambia el caudal desde el inicio hasta el final del evento, proporcionando información crucial para el diseño de defensas que puedan manejar estos cambios (Xu et al., 2022).

Datos de precipitación; es la información sobre la cantidad, intensidad y duración de las precipitaciones en la cuenca del río (Xu et al., 2022).

Topografía y batimetría del río; el primer término se describe el relieve de la zona ribereña y el entorno circundante, mientras que la batimetría detalla la profundidad del lecho del río. Ambos conjuntos de datos ayudan a entender la forma del río y cómo se distribuye el flujo del agua (Rachelly et al., 2021).

Datos de sedimentología; es la información sobre los tipos y características de sedimentos en el lecho y las riberas del río (Xu et al., 2022).

Niveles de agua; son las medidas del nivel del agua en diferentes puntos del río durante distintos eventos (Rachelly et al., 2021).

Análisis de frecuencia de inundaciones; es la evaluación de la frecuencia con la que se producen eventos de inundación de diferentes magnitudes en el pasado. Esto ayuda a determinar el caudal de diseño y a entender la probabilidad de futuros eventos extremos (Rachelly et al., 2021).

Condiciones hidráulicas del río; incluye características como la velocidad del flujo, la profundidad y el perfil transversal del río. Por lo que, estas condiciones influyen en el diseño de la defensa ribereña, ya que determinan cómo el flujo del agua interactúa con las estructuras de protección (Rachelly et al., 2021).

3.2.6 Estudio hidráulico

De acuerdo con Rachelly et al. (2021), el estudio hidráulico se erige como una fase crucial dentro de los procesos planificadores y de ejecución de proyectos relacionados con el agua y su gestión; dentro de este análisis, se abordan varios aspectos fundamentales:

Longitud y ubicación del encauzamiento; este punto se enfoca en identificar y priorizar áreas críticas que requieren protección inmediata debido a la erosión u otros factores; se consideran aspectos como el desplazamiento y la amplitud del canal para controlar la longitud máxima de inundación, garantizando así una distribución equilibrada del flujo de agua y la estabilidad del cauce.

Sección estable del río o amplitud de cauce; determinar la fracción estable del lecho del río es primordial para ofrecer la estabilidad y el funcionamiento adecuado del cauce; se emplean diversos métodos, incluyendo observaciones directas y experimentos, para identificar una sección representativa del río que sirva como referencia para ser diseñado y ejecutado los proyectos de encauzamiento (Rachelly et al., 2021).

Tirante de máxima avenida y altura de encauzamiento; este aspecto se centra en determinar la altura máxima del flujo de agua, considerando factores como la avenida de diseño del proyecto, la pendiente del terreno y la sección estable del río; la altura del dique de encauzamiento se calcula en función del tirante máximo, garantizando así la protección adecuada contra inundaciones y otros eventos extremos (Rachelly et al., 2021).

Profundidad de socavación; la estimación de la profundidad de socavación es crucial para prevenir la erosión del lecho del río y garantizar la estabilidad de las estructuras cercanas; se emplean métodos como el propuesto por List Van Lebedev para estimar la tasa de erosión y determinar la profundidad necesaria para proteger el lecho del río; considerar elementos como la tipología de suelo y la topografía del área es esencial para obtener estimaciones precisas y mitigar los riesgos asociados con la socavación (Rachelly et al., 2021).



CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló a partir de la recopilación y análisis de información proveniente de los estudios básicos del proyecto. En primer lugar, se obtuvo la data correspondiente al estudio topográfico, el cual fue realizado mediante fotogrametría aérea con vehículo aéreo no tripulado (dron), permitiendo la generación de planos topográficos a escala 1:500. A partir de este levantamiento se obtuvo una representación detallada del terreno y de las unidades geomorfológicas que conforman el área de estudio.

Posteriormente, se recopiló información relacionada con el estudio geológico, mediante un mapeo geológico a nivel local que permitió identificar los materiales existentes en las canteras disponibles en la zona. Este análisis permitió determinar la disponibilidad y los volúmenes aprovechables de materiales provenientes de canteras de cerro, río y roca, los cuales constituyen insumos fundamentales para la ejecución de las obras de protección.

Asimismo, se analizó la información correspondiente al estudio de mecánica de suelos, a través del cual se determinó el tipo de suelo predominante en el área de intervención y la presión admisible del terreno, parámetros necesarios para el diseño estructural de las obras hidráulicas.

En una etapa posterior, se procesó la información del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), lo que permitió realizar la delimitación de la cuenca hidrográfica y de las subcuencas que influyen en el área de estudio. A partir de esta delimitación se procedió con el análisis hidrológico, el cual incluyó la recopilación de series históricas de precipitaciones máximas provenientes de estaciones pluviométricas disponibles en la zona. Estas series fueron sometidas a diferentes pruebas estadísticas, tales como detección de datos atípicos, consistencia, independencia, estacionariedad y homogeneidad, con la finalidad de garantizar la confiabilidad de la información utilizada.

Posteriormente, se realizó el análisis de frecuencia de precipitaciones, lo que permitió estimar los eventos de lluvia asociados a diferentes períodos de retorno. Con esta información se desarrolló el modelamiento hidrológico mediante el software HEC-HMS versión 4.8, utilizando un modelo semi distribuido de precipitación-escorrentía para estimar los caudales máximos de avenida correspondientes a distintos periodos de retorno.

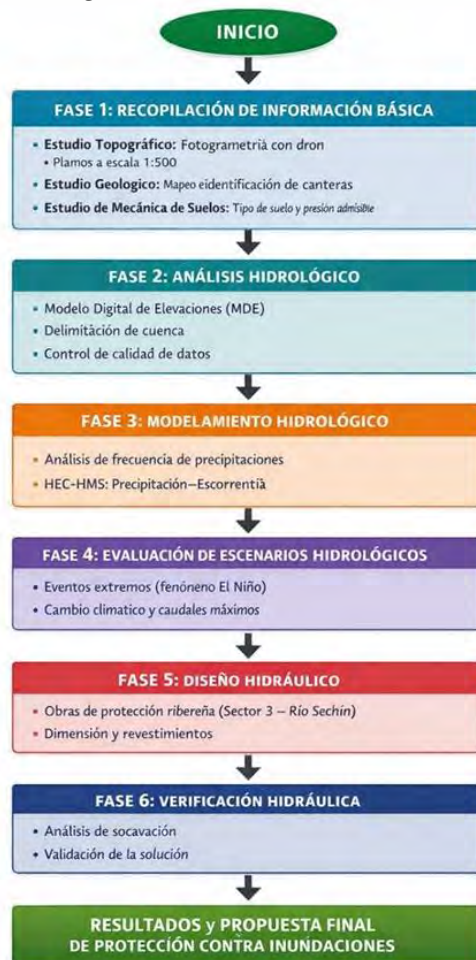
Adicionalmente, se evaluaron escenarios hidrológicos asociados a eventos extremos como el Fenómeno El Niño, así como los posibles efectos derivados del cambio climático en el comportamiento de los caudales máximos, con el propósito de analizar su influencia en la dinámica hidrológica del área de estudio.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos del análisis hidrológico, se procedió al diseño hidráulico de las obras de protección ribereña en el sector 3 del río Sechín, orientadas a mitigar los daños ocasionados por eventos hidrológicos extremos. Asimismo, se realizó la verificación hidráulica de la solución propuesta, evaluando las alturas y dimensiones de las estructuras de protección, así como los criterios de revestimiento y los posibles efectos de socavación en la estructura, garantizando así la estabilidad y funcionalidad de las obras proyectadas.

A continuación, se presenta el diagrama de flujo el cual resume todo lo anterior:

Figura 6

Diagrama de Flujo de Metodología



Nota: Fuente Propia

CAPÍTULO V: CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El lugar de estudio se encontró ubicado en el Tramo del puente Huanchuy del Río Sechín, en el Distrito de Casma, Provincia de Casma y Departamento de Áncash. El río Sechín presenta las coordenadas geográficas 09° 13' y 09° 42' de latitud sur y 77° 38' y 78° 23' de latitud oeste, pertenece a la vertiente del Pacífico y drena una hoya hidrográfica de 3,115 km².

Específicamente en el Sector 3 – Río Sechín, del Proyecto 1, se emplazan los diques de defensa ribereña entre las progresivas 6+000 a 29+956 del río Sechín; geográficamente ubicado en los distritos de Casma y Buenavista Alta, provincia de Casma, departamento de Ancash.

Figura 7

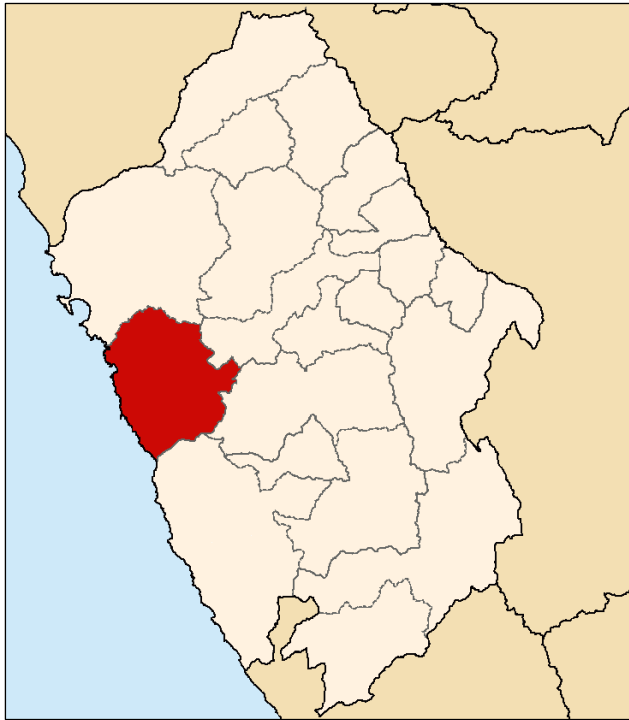
Ubicación geográfica de la Región Áncash



Nota. Fuente Propia

Figura 8

Ubicación del Geográfica de la Provincia de Casma y Regiones Limítrofes.



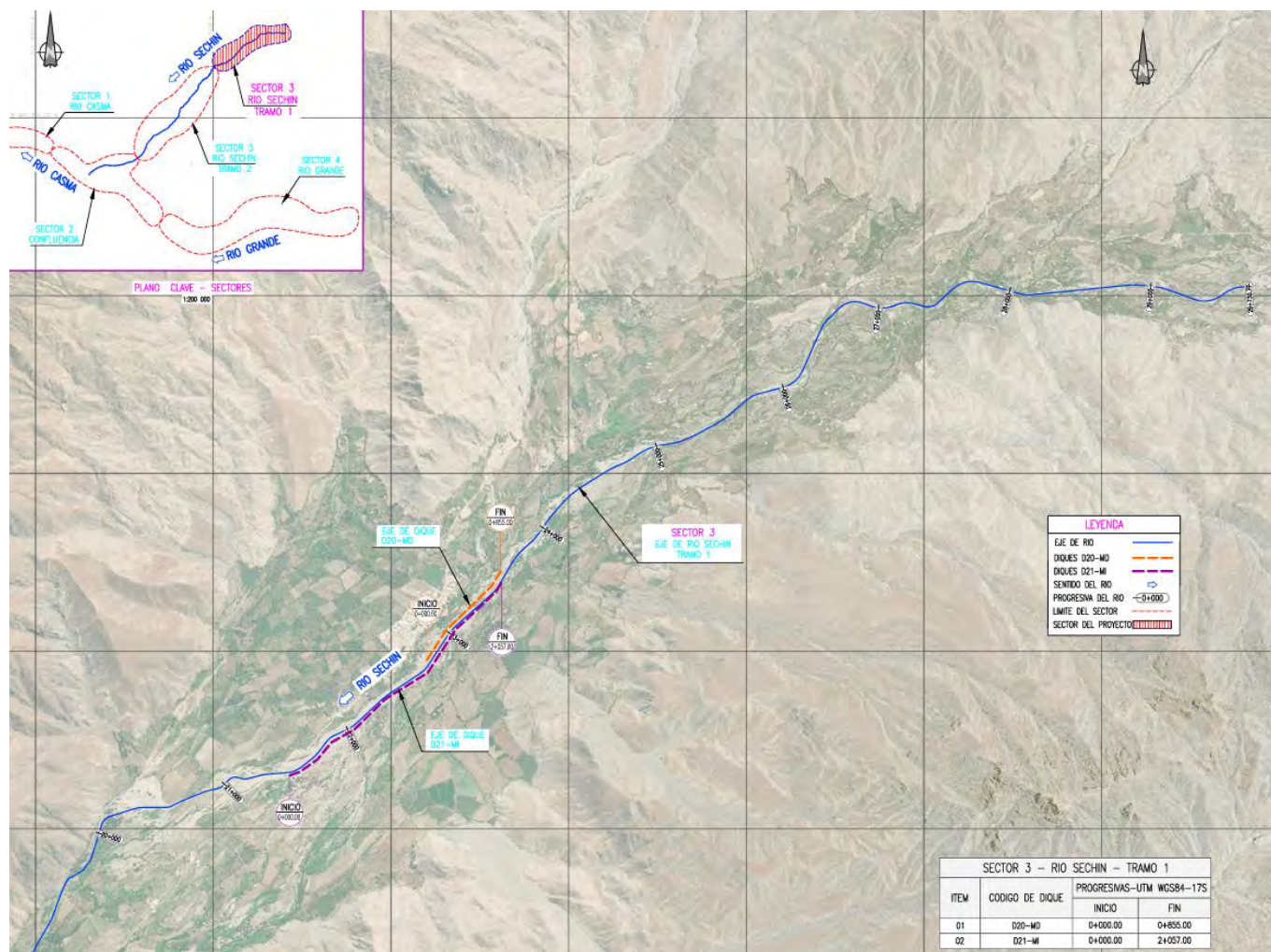
Asimismo, se plantearon la construcción de defensas ribereñas conformadas por diques con enrocados ubicados en ambas márgenes del río Sechín, desde la prog. 6+000 al 23+500 del eje de río, en base a la data recopilada.

Tabla 3

Ubicación de coordenadas UTM

Coordenadas UTM	
Este (m)	Norte (m)
802739	8953367
802878	8953644
812519	8963452

Figura 9
Ubicación del Río Sechín – sector 3.



Nota. Tomado de Google Earth

El puente Huanchuy se construyó en el año 2015, se utilizó el concreto armado para ello (vigas y losa de concreto), además contiene pilares postensados y articulación rotulada.

Figura 10

Puente de Huanchuy



Nota. Tomado de Rsd (2023)

Figura 11

Ubicación geográfica del lugar de estudio



Nota. Tomado de Google Maps (2022)

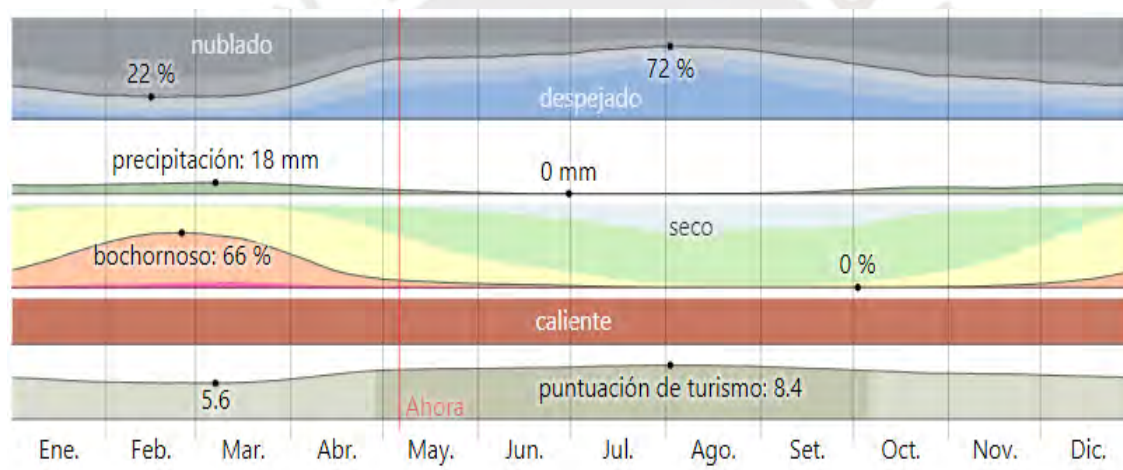
En líneas generales, el distrito de Casma presenta un total de 6423 puntos críticos, 69 viviendas expuestas en puntos críticos por inundación, con 8628 áreas de exposición por inundación.

Y también un total de 14 puntos de control, 10 de para flujos, 2 de inundación fluvial y 2 de deslizamientos.

Asimismo, presenta un clima con veranos breves, calurosos, sofocantes y con frecuentes nubes; mientras que los inviernos son prolongados, agradables y ocasionalmente nublados, con un clima seco durante todo el año. A lo largo del año, las temperaturas suelen oscilar entre los 18 °C y los 27 °C, rara vez descendiendo por debajo de los 17 °C o superando los 30 °C.

Figura 12

Clima en Casma

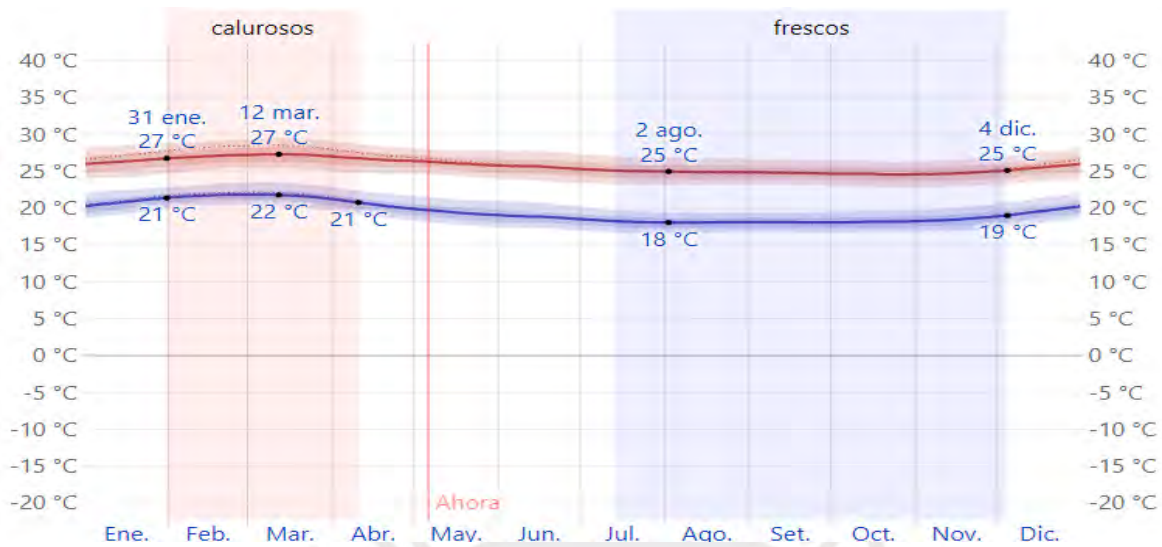


Nota. Tomado de Weather Spark (2023)

Y también una temperatura promedio en Casma templada que abarca 2.4 meses desde el 31 de enero hasta el 10 de abril, las temperaturas diarias máximas promedio superan los 27 °C. Marzo destaca como el mes más cálido, con una temperatura máxima promedio de 27 °C y una mínima de 22 °C. Y fresca se extiende por 4.7 meses, desde el 13 de julio hasta el 4 de diciembre, caracterizada por temperaturas diarias máximas promedio de menos de 25 °C. El mes más frío en Casma es agosto, con una temperatura mínima promedio de 18 °C y una máxima de 25 °C.

Figura 13

Temperatura promedio en Casma



Nota. Tomado de Weather Spark (2023)

4.1 Estudios básicos de la investigación

4.1.1 Estudio topográfico

Los resultados del estudio topográfico, mostraron la obtención de las pendientes a lo largo de las progresivas establecidas en la cuenca de estudio, las cuales fueron determinadas con base en las mediciones detalladas a través de fotogrametría aérea, y se presentaron para cada progresiva del tramo analizado. Para cada progresiva, se calculó el valor de la pendiente correspondiente, identificando las variaciones en el terreno a lo largo de la cuenca. Estos valores fueron utilizados para analizar la topografía y definir los parámetros necesarios para los estudios hidrológicos e hidráulicos posteriores.

Tabla 4*Pendiente del Río Sechín*

Ítem	Progresiva Inicio	Progresiva Fin	Cota Max. (m.s.n.m)	Cota Min. (m.s.n.m)	Longitud (m)	Pendiente (m/m)	Clasificación
1	6+000	7+000	114.9	102.3	1000	0.0126	
2	7+000	8+000	127.5	114.9	1000	0.0127	
3	8+000	9+000	141.5	127.5	1000	0.0140	
4	9+000	10+000	155.3	141.5	1000	0.0138	
5	10+000	11+000	170.3	155.3	1000	0.0150	Plano o casi a nivel
6	11+000	12+000	186.2	170.3	1000	0.0159	
7	12+000	13+000	204.5	186.2	1000	0.0183	
8	13+000	14+000	223.8	204.5	1000	0.0193	
9	14+000	15+000	243.1	223.8	1000	0.0193	
10	15+000	16+000	263.2	243.1	1000	0.0201	
11	16+000	17+000	286.8	263.2	1000	0.0237	
12	17+000	18+000	311.2	286.8	1000	0.0244	
13	18+000	19+000	339.1	311.2	1000	0.0279	
14	19+000	20+000	369.4	339.1	1000	0.0303	Ligeramente Inclinado
15	20+000	21+000	406.4	369.4	1000	0.0370	
16	21+000	22+000	445.7	406.4	1000	0.0393	
17	22+000	23+000	481.8	445.7	1000	0.0361	
18	23+000	24+000	521.6	481.8	1000	0.0397	

19	24+000	25+000	566.2	521.6	1000	0.0446	
20	25+000	26+000	610.3	566.2	1000	0.0441	
21	26+000	27+000	654.7	610.3	1000	0.0444	Moderadament e inclinado
22	27+000	28+000	702.8	654.7	1000	0.0481	
23	28+000	29+000	749.7	702.8	1000	0.0469	
24	29+000	29+731	783.2	749.7	644	0.0520	



Tabla 5

Coefficientes de rugosidad asumidos en las simulaciones

Cobertura del suelo	n	Fotografía
Vegetación densa	0.085	
Suelo desnudo	0.025	
Cauce quebrada	0.07	
Cauce alto	0.07	

Cauce bajo 0.04



Asfalto 0.016



Área urbana 0.1



Cultivo 0.06



Sin cultivo 0.03



Dique 0.025



4.1.2 Estudio de mecánica de suelos

4.1.2.1 Exploraciones del terreno

Para determinar el tipo de material presente en el subsuelo, la información recopilada mostró que se realizaron 77 calicatas con una profundidad máxima de 4 metros, siguiendo el procedimiento establecido en la Norma ASTM D 2488. Durante la excavación, registraron los niveles de agua y los tipos de materiales a diferentes profundidades, y recolectaron muestras que serán sometidas a ensayos en laboratorio.

Adicionalmente, efectuaron 8 calicatas para analizar las características de los suelos que conforman el cauce del río, con el objetivo de determinar la socavación y erosión hidráulica. En el punto investigado, llevaron a cabo ensayos de granulometría global y tomaron muestras para su caracterización mediante pruebas de laboratorio.

En cuanto a la evaluación de los diques existentes a lo largo del cauce del río Sechín, realizaron 3 calicatas sobre la corona de los diques. En estos puntos, ejecutaron ensayos de densidad de campo y granulometría global, además de recolectar muestras que evaluaron en un laboratorio.

Ensayo de Densidad de Campo

Los resultados del ensayo de densidad de campo, permitió determinar según la data recopilada, la densidad natural in situ del suelo con presencia de material granular con sobre tamaño, según la norma ASTM D5030.

Tabla 6*Resumen de ensayos de densidad de campo en el Sector 3 – Río Sechín*

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Método	Densidad Húmeda γ (gr/cm³)	C.H. (%)	Densidad Seca γ_d (gr/cm³)
C-S-23	M-01	0.50	SW-SM	Reemplazo de agua	2.13	8.61	1.96
C-S-26	M-01	0.50	GP-GM	Reemplazo de agua	2.44	3.56	2.35
C-S-28	M-01	0.50	GP-GM	Reemplazo de agua	2.23	2.37	2.18
C-S-30	M-01	0.50	GW	Reemplazo de agua	2.32	2.26	2.27
C-S-33	M-01	0.50	GP-GM	Reemplazo de agua	2.33	1.25	2.30
C-S-36	M-01	0.50	SM	Reemplazo de agua	2.27	0.85	2.25
C-S-39	M-01	0.50	GP-GM	Reemplazo de agua	2.44	1.37	2.41
C-S-42	M-01	0.50	SM	Reemplazo de agua	2.51	9.55	2.30
C-S-45	M-01	0.50	SM	Reemplazo de agua	2.31	1.09	2.28
C-S-50	M-01	0.50	SM	Reemplazo de agua	2.13	0.70	2.11
C-S-53	M-01	0.40	GW-GM	Reemplazo de agua	1.88	4.38	1.80
C-S-56	M-01	0.50	SM	Reemplazo de agua	2.05	2.53	2.00
C-S-59	M-01	0.45	GP-GM	Reemplazo de agua	2.36	0.91	2.34
C-S-62	M-01	0.43	SM	Reemplazo de agua	2.29	6.32	2.16
C-S-65	M-01	0.44	SM	Reemplazo de agua	1.62	2.19	1.58
C-S-71	M-01	0.50	SP	Reemplazo de agua	2.28	4.13	2.19
C-S-74	M-01	0.50	SP	Reemplazo de agua	2.30	2.98	2.23
C-S-77	M-01	0.45	SP	Reemplazo de agua	2.32	1.31	2.29
C-S-80	M-01	0.50	GP-GM	Reemplazo de agua	2.25	1.04	2.23
C-S-83	M-01	0.20	GP-GM	Reemplazo de agua	2.32	1.08	2.29
C-S-86	M-01	0.30	SP-SM	Reemplazo de agua	2.14	1.54	2.11
C-S-89	M-01	0.50	GP-GM	Reemplazo de agua	2.23	1.60	2.19

C-S-91	M-01	0.50	GP	Reemplazo de agua	2.35	1.19	2.32
C-S-93	M-01	0.50	GP	Reemplazo de agua	2.21	4.44	2.11
C-S-96	M-01	0.50	SP	Reemplazo de agua	2.34	6.90	2.19

Tabla 7

Resumen de ensayos de densidad de campo en diques existentes del Sector 3 – Rio Sechín

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Clasificación SUCS	Método	Densidad húmeda γ (gr/cm ³)	C.H (%)	Densidad seca γ_a (gr/cm ³)
C-E-S-06	M-01	0.50	GP-GM	Reempla	2.26	0.35	2.25
C-E-S-07	M-01	0.40	SM	zo de	2.28	0.77	2.26
C-E-S-08	M-01	0.50	GP-GM	agua	2.16	1.26	2.14

Ensayo de Granulometría Global

Los resultados del ensayo de granulometría según la información, fueron realizados en las calicatas de socavación en el cauce del río.

Tabla 8

Resumen de ensayos de Granulometría Global en el cauce del rio

Calicata	Progresiva Eje de Rio (Km)	Tamaño Máximo	Granulometría Global				
			% Fino (<N°200)	% Arena (N°200 a N°4)	% Grava (N°4 a 3")	% Cantos (3" a 6")	% Bolones (6" a 12")
C-S-S04	8+000	8"	0.04	19.59	42.93	18.19	19.25
C-S-S05	11+000	10"	0.05	27.55	34.64	14.07	23.70
C-S-S06	14+100	12"	0.04	25.73	43.08	13.64	17.52
C-S-S07	17+100	12"	0.03	13.40	46.64	15.17	24.76
C-S-S08	20+000	10"	0.79	23.65	35.34	13.94	26.28
C-S-S09	23+100	12"	0.07	16.29	22.29	27.03	34.31
C-S-S10	26+000	8"	2.32	18.99	48.26	17.58	12.86
C-S-S11	29+000	12"	0.07	23.94	28.81	24.16	23.02

Tabla 9*Resumen de ensayos de Granulometría Global en el cauce del río*

Calicata	Progresiva Eje de Río (Km)	Tamaño Máximo	Granulometría Global				
			% Fino (<N°200)	% Arena (N°200 a N°4)	% Grava (N°4 a 3")	% Cantos (3" a 6")	% Bolones (6" a 12")
C-E-S-06	7+500	8"	5.15	24.51	37.28	19.71	13.35
C-E-S-07	7+800	5"	16.55	41.32	29.50	12.63	0.00
C-E-S-08	22+400	10"	5.00	25.84	34.87	14.06	20.22

4.1.2.2 Perfil estratigráfico

De acuerdo a la evaluación geotécnica realizada a través de ensayos geofísicos, excavación de calicatas, perforaciones diamantinas, ensayos in situ y ensayos de laboratorio, se elaboró los perfiles estratigráficos, los cuales se representan a continuación.

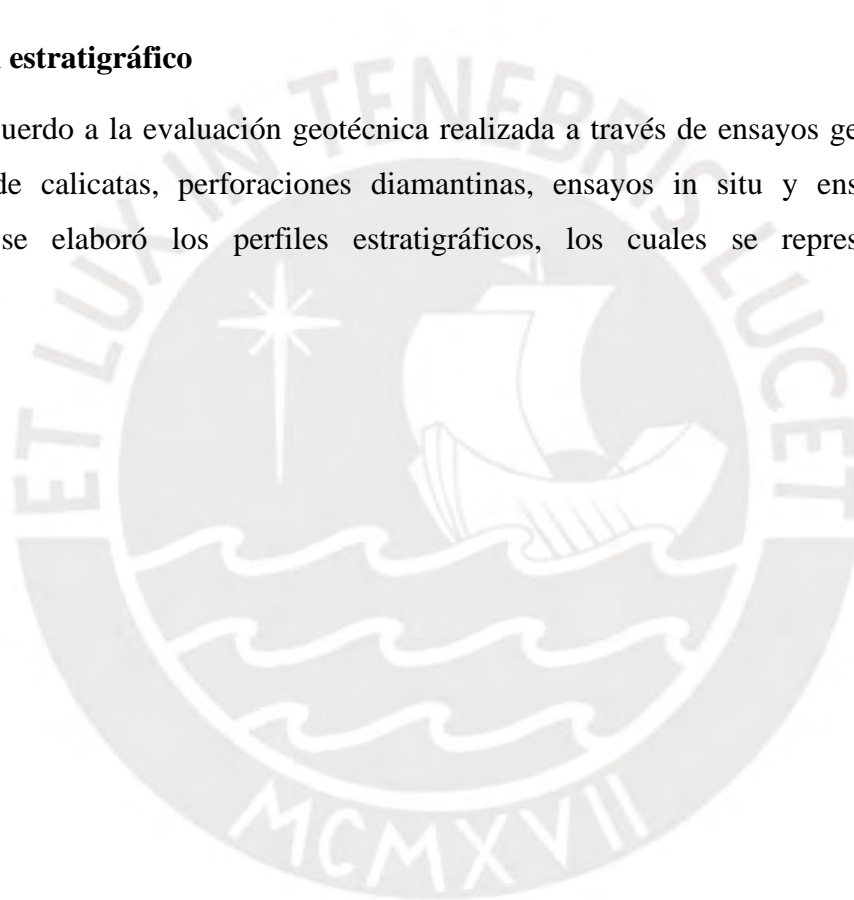


Figura 14

Perfil Estratigráfico 6+000 a 20+000 Km (eje de río)

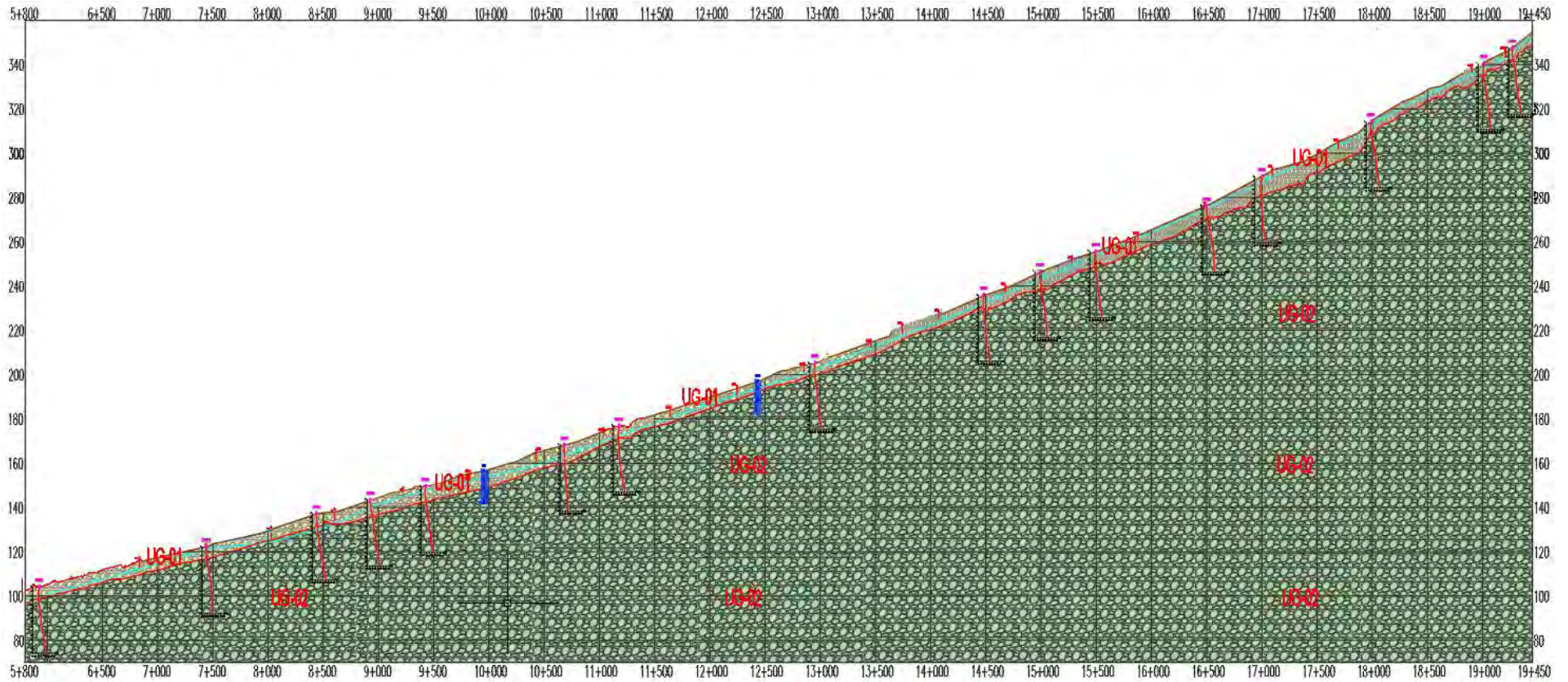
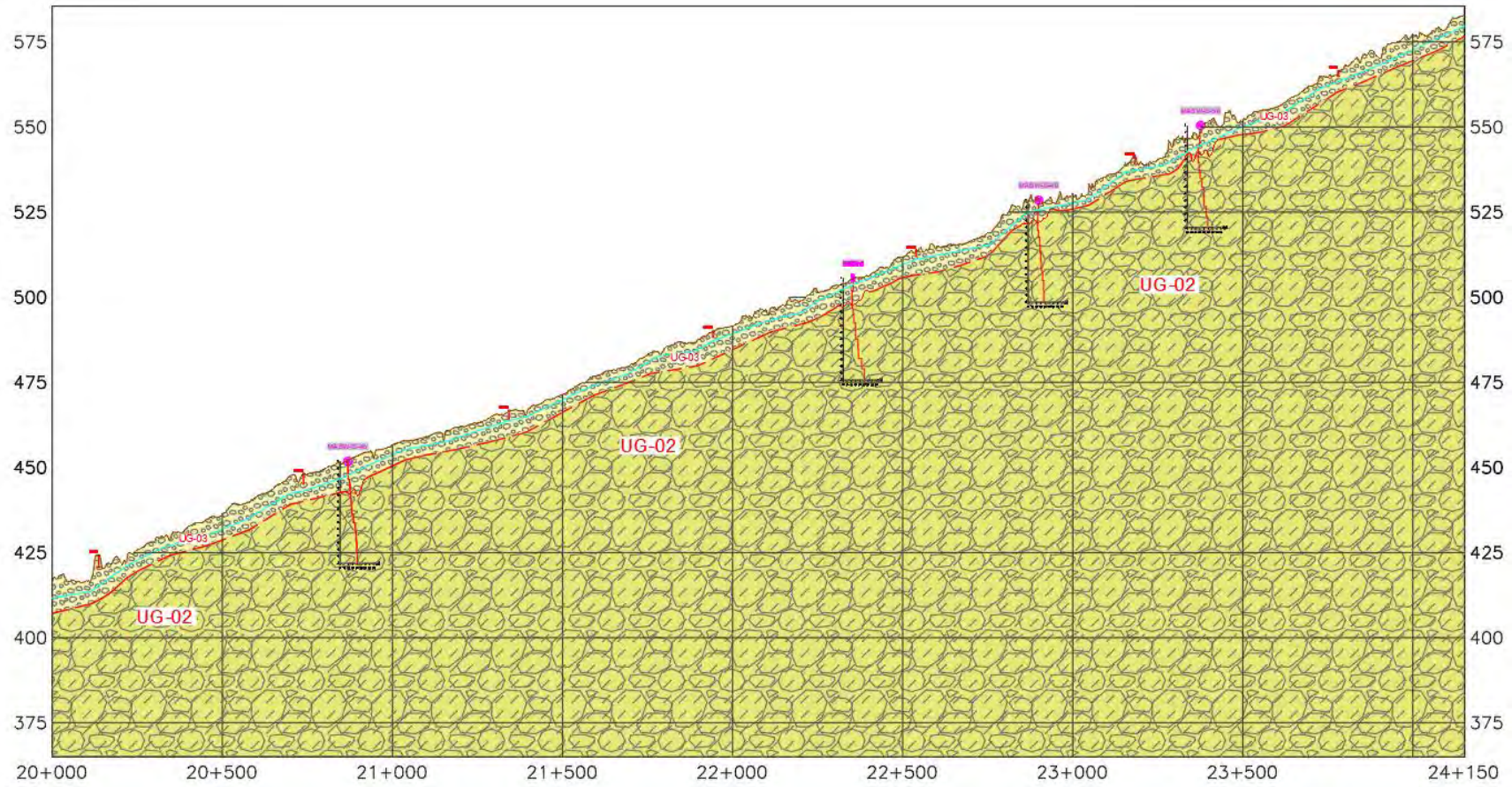


Figura 15

Perfil Estratigráfico 20+000 a 24+000 Km (eje de río)



4.1.2.3 Agresividad del medio

De acuerdo con la información recopilada, ensayaron un total de 20 muestras de suelo, extraídas a distintas profundidades, dando lugar a los resultados de la siguiente Tabla:

Tabla 10

Ensayos químicos realizados sobre muestras de suelo de cimentación

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	Sulfatos (ppm)	Cloruros (ppm)	Sales Soluble Totales (ppm)
C-S-20	M-01	1.80 – 4.00	24	16	390
C-S-24	M-01	1.40 – 3.50	13	42	390
C-S-28	M-01	0.90 – 4.00	12	41	480
C-S-32	M-01	2.50 – 3.35	22	91	720
C-S-36	M-01	0.70 – 2.50	14	43	300
C-S-40	M-01	1.70 – 2.40	19	27	480
C-S-44	M-01	0.40 – 1.50	11	33	570
C-S-47	M-01	0.30 – 1.60	18	15	240
C-S-49	M-01	0.10 – 1.60	17	22	84
C-S-53	M-01	0.00 – 1.80	16	50	510
C-S-57	M-01	0.00 – 2.00	55	282	1473
C-S-61	M-01	0.30 – 2.00	23	40	1320
C-S-65	M-01	0.80 – 2.80	15	33	1230
C-S-69	M-01	0.20 – 3.50	19	44	600
C-S-73	M-01	0.20 – 2.50	17	25	390
C-S-77	M-01	0.30 – 1.55	22	44	610
C-S-81	M-01	0.30 – 1.50	24	32	93
C-S-85	M-01	0.40 – 1.40	14	24	195
C-S-89	M-01	0.50 – 2.00	23	26	420
C-S-93	M-01	0.40 – 1.90	14	19	180

4.1.3 Estudio de canteras

Los resultados según la información recopilada, presentó las 3 canteras de las cuales obtuvieron el rendimiento, volumen bruto, volumen neto y volumen utilizable.

Tabla 11*Ensayos químicos realizados sobre muestras de suelo de cimentación*

Canteras en cuenca de Casma			Datos de Canteras				
Canteras de Cerro, Río y Roca	Área cantera (m ²)	(%) Rendimiento	Volumen Bruto (m ³)	Volumen Neto (m ³)	Volumen utilizable (m ³)		
Sechin tramo-1	Río	CRS-3-2	179817.428	79.25	359004.15	359004.15	284510.79
		Haunchuy Bajo	46767.49	79.90	84749.59	84749.59	67714.92
	Roca	CRS 3-1	46851.62	70.00	290948.24	290948.24	203663.77
	Afirmado	Grupo Fergo	77813.894	95.10	126760.67	126761	120549

La Tabla 11, evidenció que las canteras de Río CRS 3-2 y Huanchuy Bajo cumplen con los requerimientos técnicos para la conformación del cuerpo de dique. Por otro lado, las canteras de Roca CRS 3-1 cumplen con los requerimientos técnicos para el uso de enrocado. Además, las canteras de cerro Grupo Fergo cumplen con los requerimientos para su uso como agregado para la preparación de afirmado.

4.1.3.1 Cantera de roca

Cantera CRS-3-1

La cantera CRS-3-1 está ubicada en el distrito de Buenavista Alta, en la provincia de Casma, departamento de Áncash, con coordenadas UTM aproximadas de 8965504 N y 813223 E. De acuerdo con la información recopilada, esta cantera de origen ígneo intrusivo, compuesta por diorita, presenta características geomecánicas definidas por cuatro familias principales. Asimismo, la resistencia a la compresión de la roca intacta varía entre 25 y 50 MPa, y el RQD fluctúa entre 25 y 50 en una de las familias principales, con un espaciamiento entre 0.20 y 0.60 m. La superficie es ligeramente rugosa, con una abertura de discontinuidad mayor a 5 mm, y un RMR entre 41 y 60, clasificándola como Tipo III (regular).

Figura 16

Imagen satelital del acceso a la cantera ROCA-CRS-3-1



Además, siguiendo las recomendaciones de la data recopilada, el material de la cantera CRS-3-1 fue adecuado para la fabricación de enrocado para protección de diques, y estimaron una merma del 30% debido a la voladura, lo que deja un rendimiento del 70%. El área de explotación determinada es de 46,851.62 m², con un volumen neto aproximado de 290,948.24 m³.

Tabla 12

Resumen de ensayos de laboratorio de las calicatas de la cantera ROCA CRS-3-1

Ensayos	Muestreo			Resumen estadístico		
	M-1	M-2	N ^o	DS	CV	Prom.
Roca	Diorita	-	1	-	-	Diorita
Densidad (ton/m ³)	2.67	-	1	-	-	2.67
Gravedad Específica Nominal	2.67	-	1	-	-	2.67
Absorción (%)	0.31	-	1	-	-	0.3
Porosidad (%)	0.82	-	1	-	-	0.82
Abrasión (%)	25.6	25.0	2	-	-	25.3

Resistencia a la compresión (Mpa)	26.48	-	1	-	-	26.5
-----------------------------------	-------	---	---	---	---	------

4.1.3.2 Cantera de afirmado

Grupo Fergo

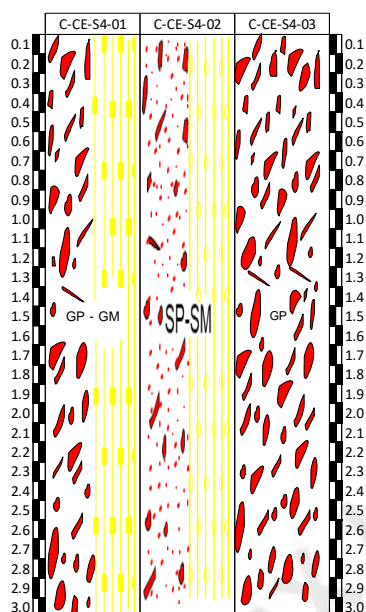
La cantera Grupo Fergo está ubicada en el distrito de Buenavista Baja, provincia de Casma, departamento de Áncash, con coordenadas UTM aproximadas de 808535 y 8955056.

Figura 17

Imagen satelital del acceso a la cantera Grupo Fergo



En el lugar encontraron acumulaciones de material recolectado, compuesto principalmente por gravas y arenas pobremente gradadas, de color marrón oscuro, con compacidad suelta a medianamente densa, no plástica y seca. No se detectó nivel freático, y el material incluyó bolonería y cantos subredondeados, con una proporción de 10% cantos y 90% suelo.

Figura 18*Perfil estratigráfico de la cantera Cerro Fergo*

Según la información recopilada, el material de la cantera cumplió con los requisitos para ser usado como agregado en la preparación de afirmado. La extracción lo realizaron de manera directa, utilizando excavadoras, cargadores frontales y volquetes. El material utilizado tuvo un tamaño máximo de 2" (50.8 mm).

Tabla 13*Resumen de ensayos de laboratorio de las calicatas de la cantera Grupo Frengo*

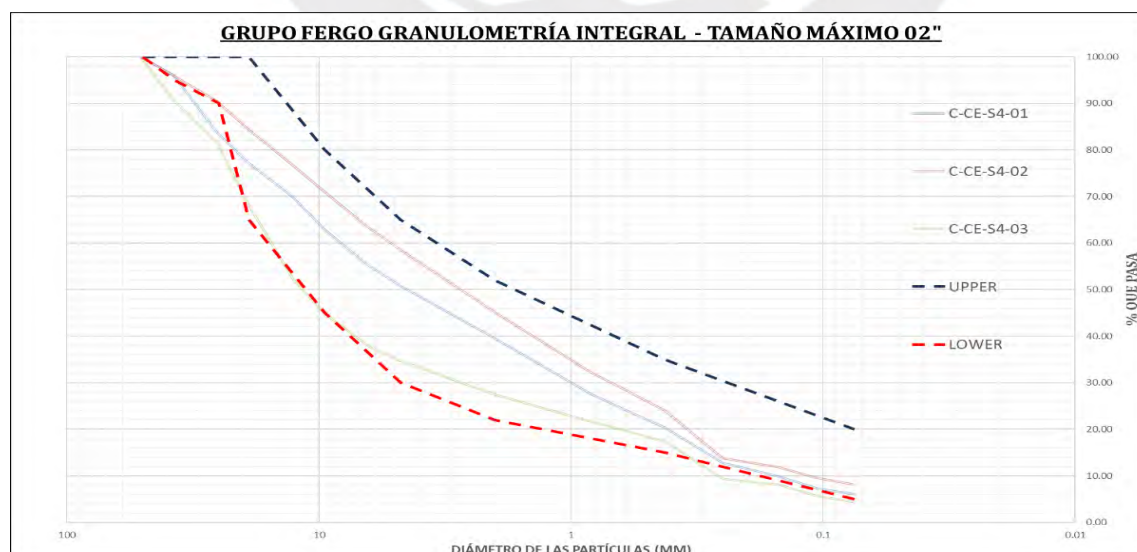
Ensayos	Calicatas		
	C-CE-S4-01	C-CE-S4-02	C-CE-S4-03
Grava (%)	51.5	44.7	66.8
Arena (%)	42.7	47.6	29
Finos (%)	5.8	7.7	4.2
Humedad natural (%)	1.3	1.9	0.6
LL (malla 40)	NP	NP	NP
LP (malla 40)	NP	NP	NP
IP (malla 40)	NP	NP	NP
Clasificación SUCS	GP-GM	SP-SM	GP

Clasificación AASHTO	A-1-a (0)	A-1-a (0)	A-1-a (0)
Abrasión (%)	24.7	24.6	24.5
Óptimo contenido de humedad % (natural)	6.7	6.4	4.8
Densidad máxima, g/cm ³ (natural)	2.32	2.34	2.33
CBR (Natural) al 100%	45	59	74
CBR (Natural) al 95%	35	38	55
Equivalente de arena (%)	56.0	39.0	48.0
Contenido de impurezas	0.1	0.10	0.10
Pasante la malla N°200 (natural)	12.0	13.8	12.5

La evaluación de la cantera, según la información recopilada, se basaron en la granulometría y los perfiles estratigráficos, determinando un área de explotación de 77,813.894 m² y un volumen bruto de 126,760.67 m³, lo cual confirma su idoneidad para la conformación de afirmado.

Figura 19

Huso para conformación de dique Cantera Grupo Fergo



4.1.3.3 Cantera de río

Cantera Huanchuy Bajo

La Cantera Huanchuy Bajo, situada en el distrito de Buenavista Alta, provincia de Casma, departamento de Áncash, se localizaba aproximadamente en las coordenadas UTM 8962627, 810707. El área presentaba una cobertura de gravas pobremente gradadas con arena, con una estructura homogénea en matriz areno-limosa y algunas pequeñas zonas de vegetación.

Figura 20

Imagen satelital del acceso a la cantera Huanchuy Bajo



De acuerdo con la información recopilada, el material de la cantera estuvo compuesto por gravas y arenas, tanto bien como pobremente gradadas, con limo y arena, de color marrón oscuro, con compacidad suelta a medianamente densa, no plástica y seca, y sin la presencia de nivel freático. Además, incluía bolones y cantos de forma subangulosa a subredondeada, con una proporción de 20% cantos, 20% bolones y 60% suelo.

Figura 21

Exploración de calicatas cantera Huanchuy Bajo



Nota. Fuente Propia

En la cantera Huanchuy Bajo, según la data, realizaron 23 calicatas para evaluar el material y determinó que el material era adecuado para ser utilizado como relleno en la conformación del cuerpo de dique, con un tamaño máximo de 6" (152.4 mm).

Tabla 14

Resumen de ensayos de laboratorio de las calicatas de la cantera GRUPO FRENGO

Ensayos de laboratorio ejecutados	Método de Ensayo	Especificaciones técnicas		Resultado obtenido	Usos
		Dique			Dique base y cuerpo
		Base y Cuerpo	Corona		
Límite Líquido N° 40	ASTM D 4318	-	-	NP	-
Índice de Plasticidad N° 40	ASTM D 4318	< 11%	< 10%	NP	Sí cumple
Clasificación AASHTO	ASTM D3282	Ver nota	Ver nota	A-1-a	Sí cumple
Abrasión (%)	ASTM C 131	60% Máx.	60% Máx.	15.8	Sí cumple
CBR (natural)	MTC E 132	-	-	81	-
Pasante la malla N°200 (natural)	ASTM C117			10.2	-

Permeabilidad (cm/s)	ASTM D 2434	4.85E-03
Triaxial CD	ASTM D7181	c (kg/cm ²) = 0.30 ϕ =39.40°

La evaluación, basada en los perfiles estratigráficos y las calicatas exploradas, determinó un área de explotación de 46,767.49 m², volumen bruto de 84,749.59 m³ y volumen utilizable de 67715 m³.

Cantera CRS 3-2

La Cantera CRS-3-2, ubicada en el distrito de Buenavista Alta, provincia de Casma, departamento de Áncash, se situaba aproximadamente en las coordenadas UTM 8965998, 813382.

Figura 22

Imagen satelital del acceso a la cantera CRS-3-2



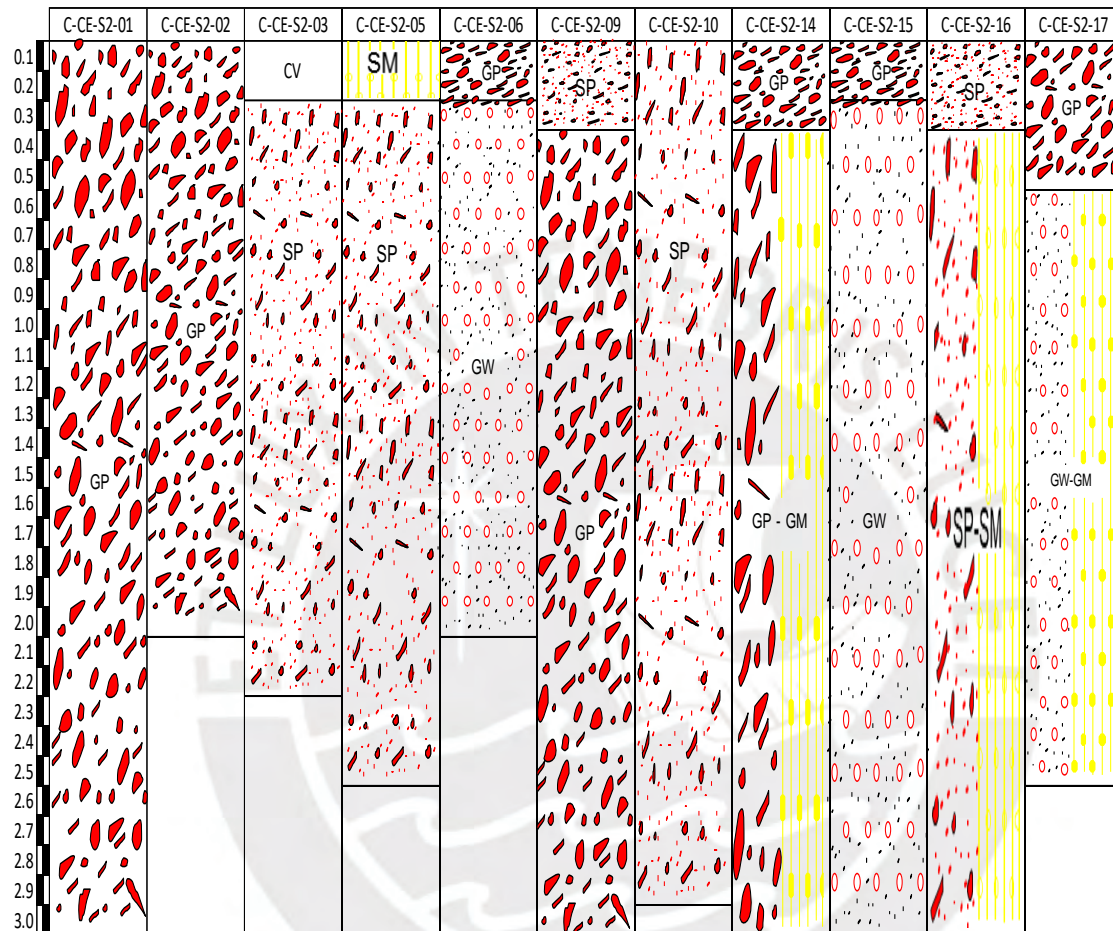
Nota: Fuente Propia

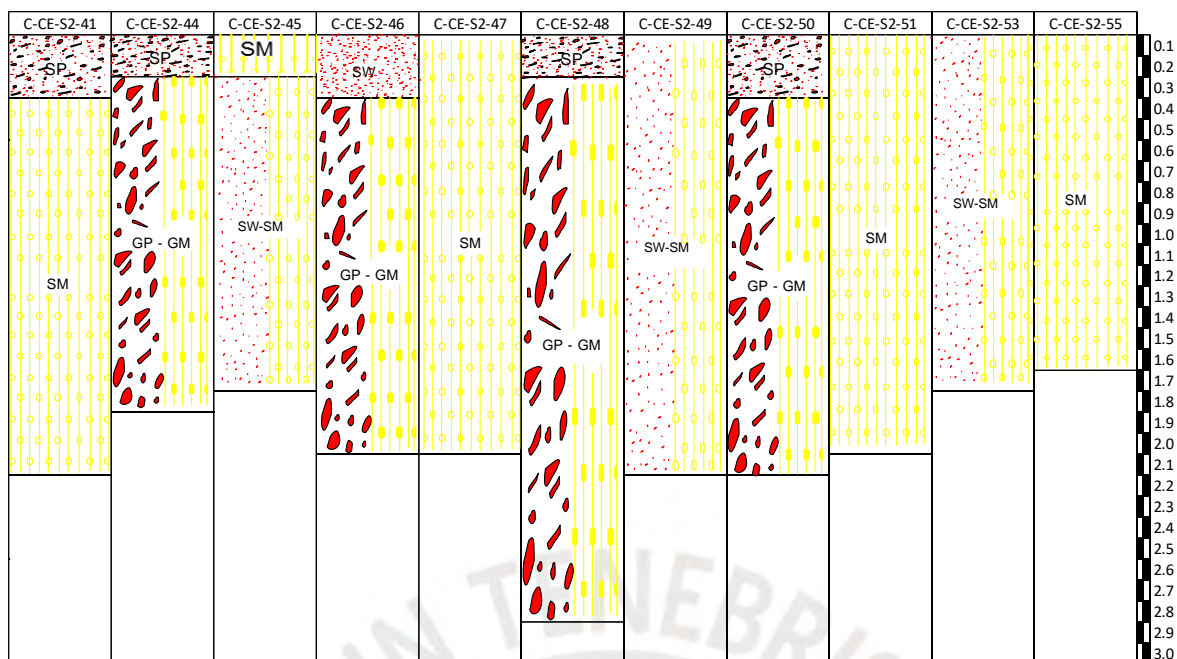
El lugar presentaba una cobertura de gravas pobremente gradadas con arena, con una estructura homogénea en una matriz areno-limosa y pequeñas zonas de vegetación. El material de la cantera estaba compuesto por gravas y arenas, bien y pobremente gradadas, con limo y arena, de color marrón oscuro, con compacidad suelta a

medianamente densa, no plástica y seca, y sin presencia de nivel freático. Además, incluía bolones y cantos subredondeados, con una proporción de 20% cantos, 40% bolones y 40% suelo.

Figura 23

Imagen satelital del acceso a la cantera CRS-3-2





Nota: Fuente Propia

En la Cantera CRS-3-2, según la información recopilada, realizaron 22 calicatas para evaluar el material, en donde los ensayos confirmaron que el material era adecuado para la conformación del cuerpo de dique, cumpliendo con los requisitos técnicos. Asimismo, recomendó su uso para la conformación del dique, o en combinación con otros materiales para cumplir con el huso granulométrico propuesto.

Tabla 15

Evaluación de resultados de ensayos de la Cantera CRS-3-2

Ensayos de laboratorio ejecutados	Método de Ensayo	Especificaciones técnicas Dique Base y Cuerpo	Resultado obtenido	Usos Dique base y cuerpo
Límite Líquido N° 40	ASTM D 4318	-	NP	-
Índice de Plasticidad N° 40	ASTM D 4318	< 11%	NP	Sí cumple
Clasificación AASHTO	ASTM D3282	Ver nota	A-1-a	Sí cumple
Abrasión (%)	ASTM C 131	60% Máx.	17.9	Sí cumple
CBR (natural)	MTC E 132	-	73	-
Pasante la malla N°200 (lavado)	ASTM C117	-	8.3	-

Permeabilidad (cm/s)	ASTM D 2434	8.14E-03
Triaxial CD	ASTM D7181	c (kg/cm ²) = 0.63 Ø = 39.08°

El material utilizado para la conformación de los diques tuvo un tamaño máximo de 6" (152.4 mm). La evaluación de la cantera, basada en los perfiles estratigráficos y las calicatas exploradas, determinaron un área de explotación de 179,817.43 m² y un volumen de 359,004.15 m³.

Tabla 16

Volumen de explotación de la Cantera CRS-3-2

Descripción	Símbolo	%	Volumen (m3)
Volumen bruto	Vb		359004.15
Desbroce (h=0.00 m.)	D	0	0
Volumen neto	Vn=Vb-D		359004
Volumen over (>6")	V0	20.75	74493
Volumen utilizable	Vu=Vn-V0		284511

4.1.3.4 Fuentes de Agua

4.1.3.4.1 F-1C

Estratégicamente, seleccionaron en 1 punto de fuente de agua en el río Sechín (km 21+300, coordenadas UTM 811716E, 8962902N), y realizaron ensayos químicos para verificar la calidad del agua, estos ensayos midieron el pH, el contenido de sulfatos, el contenido de cloruros, los sólidos en suspensión y la materia orgánica.

Tabla 17

Ensayos de laboratorio realizados a las fuentes de agua en laboratorio.

N°	Código de la Muestra	Cloruros como Cl (ppm)	Sulfatos como SO ₄ (ppm)	Sólidos Totales por masa (ppm)	Potencial de hidrogeno (Ph)	Sólidos en suspensión (ppm)
		1000 Max	3000 Max	50000 Max	5.5-8.5	1500 Max
2	F-1C	493	340	100	7.16	0.03

Los resultados de los análisis químicos mostraron que la fuente F-1C no superaban los límites máximos permitidos por los requerimientos técnicos para el concreto Portland, por lo que, determinaron que eran aptas para su uso en la fabricación de este material.

4.1.3.5 Depósito de Material Excedente

El depósito de material excedente (DME) fue diseñado para almacenar los materiales resultantes de las excavaciones realizadas durante la construcción de los diques, obras auxiliares y el material excedente de las canteras.

4.1.3.5.1 DME C-24

El DME N° C-24 se encontraba a 700 m aguas abajo del mismo centro poblado, con coordenadas UTM de 812062, 8963065. El DME C-24 se emplazaron en un depósito aluvial (Q-a11), compuesto por cantos redondeados y subredondeados en una matriz arenosa y areno-limosa, situados en una terraza aluvial.

Tabla 18

Características geométricas del DME C-24

DME	VOLUMEN ALMACENAMIENTO (M3)	ALTURA DE CONFORMACION (M)	AREA DE APILAMIENTO (HA)
DME C-24	3,418.11	1.7	0.8495
DME C-23	65,644.69	5.6	3
DME C-40	375,156.55	5	29.57

Figura 24

Plano en planta de la ubicación del DME C-24

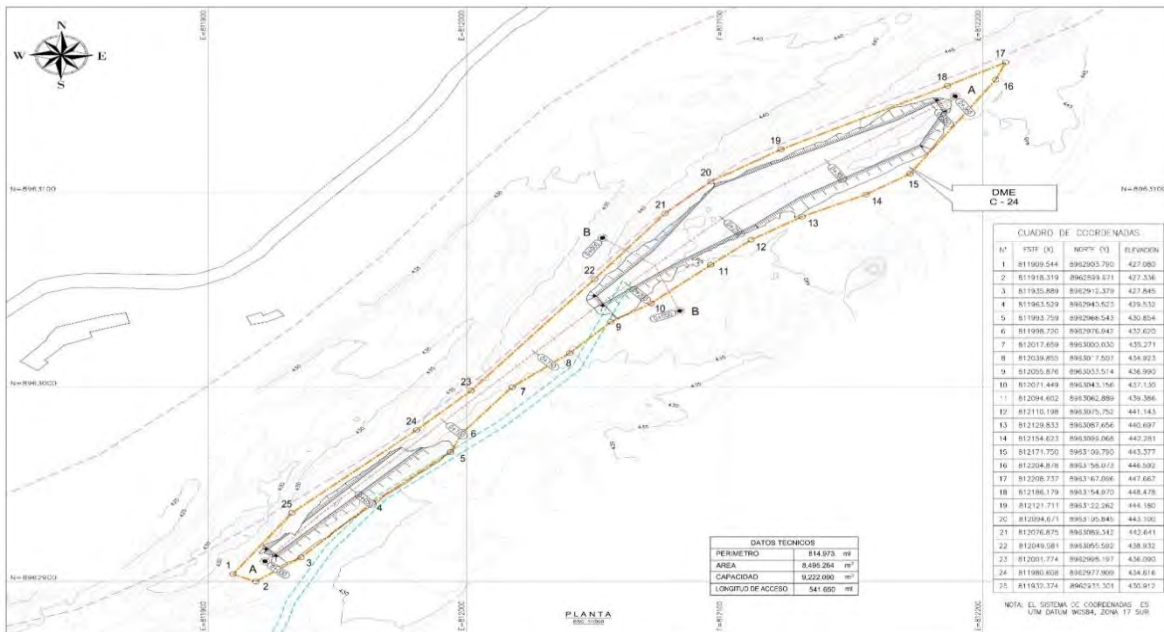


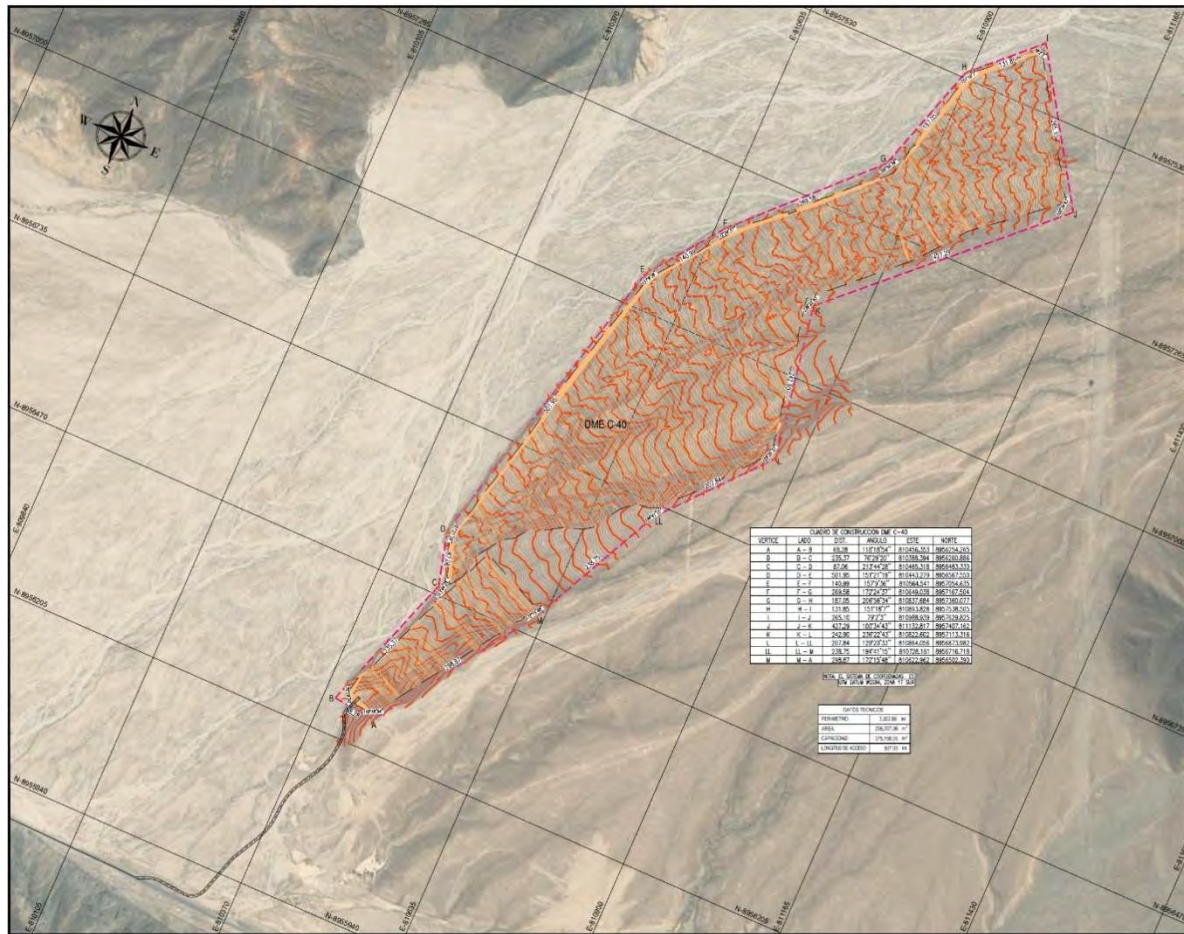
Figura 25

Plano en planta de la ubicación del DME C-23



Figura 26

Plano en planta de la ubicación del DME C-40



4.1.4 Estudio hidrológico

4.1.4.1 Caracterización geomorfológica de la cuenca

El carácter geomorfológico de una cuenca guarda una cercana relación en cuanto comportamiento de caudales transmitidas por ella. Por consiguiente, se disponen estos parámetros:

Tabla 19

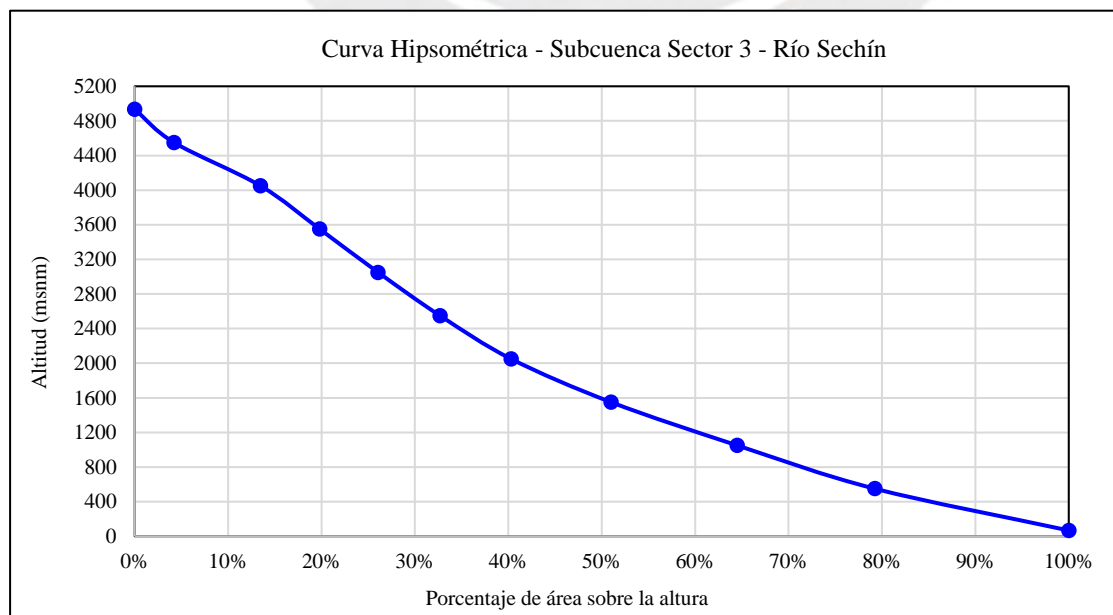
Parámetros geomorfológico de la cuenca Sector 3 – Rio Sechin (Tramo 1 y 2)

Tipo	Parámetro Geomorfológico	Símbolo	Unidad	Valor
Parámetros Generales	Área	A	Km ²	741.09
	Perímetro	P	Km	211.15
	Long. de la cuenca (km)	L	Km	60.54
	Longitud del cauce principal	L	Km	61.73
	Ancho promedio	Ap	Km	12.24

Parámetros de Forma	Desnivel máximo	DH	m	4867.00
	Factor de forma	Fr	-	0.20
	Índice de compacidad	Ic	-	2.19
	Factor de Circularidad	Fc	-	0.21
	Razón de Elongación	Re	-	0.51
	Elevación máxima	Emáx	msnm	4934.32
	Elevación mínima	Emín	msnm	67.32
Parámetros de Relieve	Elevación media	Emed	msnm	1600.00
	Longitud mayor del rectángulo equivalente	LRE	Km	98.83
	Longitud menor del rectángulo equivalente	RE	Km	7.50
	Pendiente media de la cuenca	Sc	m/m	0.38
	Pendiente del cauce principal	Sr	m/m	0.07
	Longitud total de cauces	LT	Km	253.14
Parámetros de la red de drenaje	Extensión media de escurrimiento	Em	Km	0.73
	Densidad de drenaje	Dd	Km/Km ²	0.3416
	Alejamiento medio	Am	-	2.22
	Constante de estabilidad de río	C	Km	2.93
	Densidad de corriente o Densidad hidrográfica	Dh o Dc	-	0.24

Figura 27

Curva hipsométrica de la cuenca



La Figura 26 presenta la curva hipsométrica correspondiente a la subcuenca del Sector 3 del río Sechín, la cual representa la relación entre el porcentaje acumulado del área de la cuenca y la altitud relativa del terreno. Este tipo de análisis permite evaluar el grado de evolución geomorfológica del relieve y comprender los procesos predominantes de erosión y sedimentación dentro de la cuenca hidrográfica (Strahler, 1952).

De acuerdo con la forma observada en la curva, se identifica una tendencia cóncava hacia arriba, lo cual indica que una mayor proporción del área de la cuenca se concentra en altitudes relativamente bajas. Según diversos estudios geomorfológicos, este tipo de configuración hipsométrica es característico de cuencas que han alcanzado un estado de madurez geomorfológica, donde los procesos erosivos han reducido progresivamente las zonas elevadas y los materiales transportados tienden a acumularse en las partes bajas del sistema fluvial (Chorley, Schumm & Sugden, 1984).

Asimismo, las curvas hipsométricas con forma cóncava reflejan generalmente paisajes más evolucionados, con pendientes moderadas y mayor presencia de procesos de sedimentación y estabilización del relieve, en contraste con cuencas jóvenes donde predominan procesos intensos de erosión y disección del terreno (Keller & Pinter, 2002). En este sentido, la morfología observada en la subcuenca analizada sugiere una evolución geomorfológica avanzada del relieve, lo cual influye directamente en la dinámica hidrológica y en los procesos de transporte de sedimentos dentro del sistema fluvial.

4.1.4.2 Tiempo de concentración y tiempo de retardo

Según la información se consideró al tiempo de concentración al periodo transitorio de una gota de lluvia escurrida superficialmente a través del sitio más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Hay distintas formulaciones aplicables para su cálculo, relacionadas con diferentes parámetros peculiares de la cuenca, aunque, se planteó considerar los métodos de Kirpich, California Culverts y Hathaway, debido a que mencionadas formulaciones se desarrollaron en base a informativa del SCS en cuencas rurales de pendientes empinadas con similitud a la cuenca estudiada, además de estar relacionada a la longitud del curso de agua más larga y diferencia de altura, la cual se asemeja a nuestros requerimientos.

Tabla 20

Tiempo de concentración y tiempo de retardo

Cuenca	Área (Km ²)	Longitud de Corriente máxima (Km)	Pendiente (m/m)	CN	Tiempo de concentración (hr)			Tc promedio (horas)	Tc promedio (minutos)	T lag (minutos)
					Kirpich	Hathaway	California Culverts			
Sechín	741.09	71.54	0.068	73.42	5.00	5.45	5.01	5.15	309.16	185.50

4.1.4.3 Climatología

En la siguiente tabla se detalló la distribución de la precipitación total mensual a nivel de la sub cuenca.

Tabla 21

Precipitación total mensual (mm)

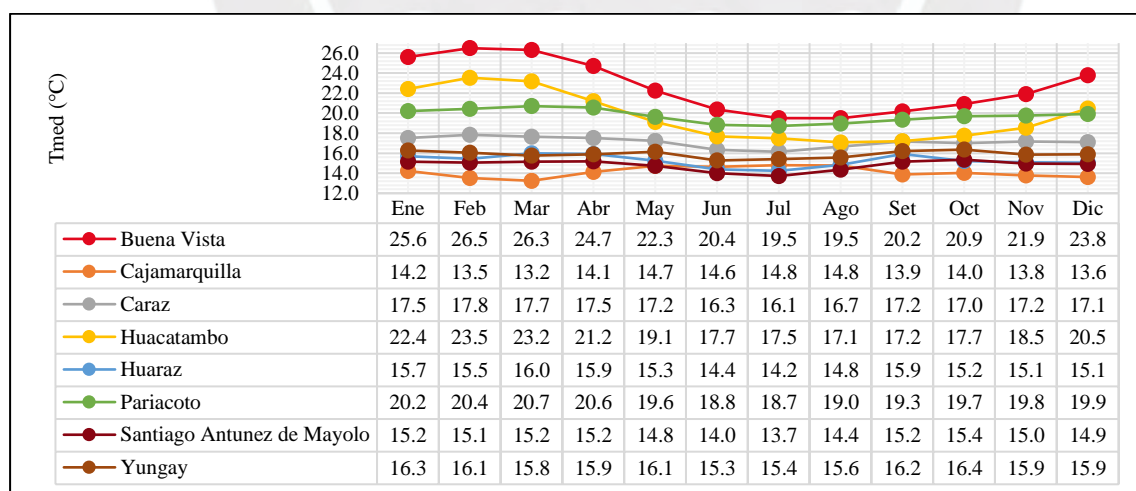
Cuenca / Sub cuenca	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Río Sechín	38.3	51.7	57.4	28.5	7.9	0.9	0.5	0.7	5.9	20.7	19.7	34.5	266.70

4.1.4.4 Tiempo de concentración y tiempo de retardo

La temperatura media de las estaciones cercanas al ámbito del proyecto

Figura 28

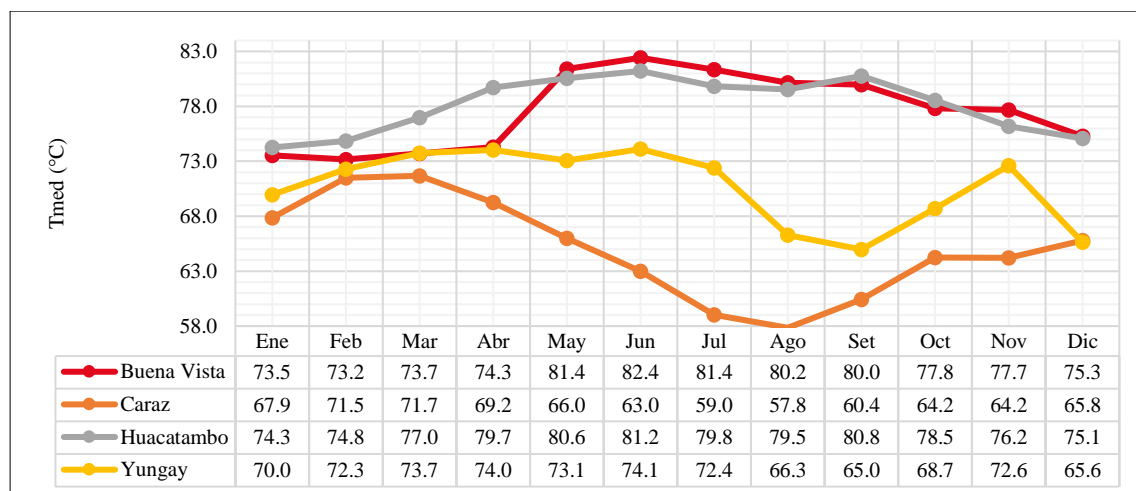
Temperatura media mensual



Este parámetro meteorológico solo ha sido registrado en cuatro estaciones meteorológicas.

Figura 29

Humedad relativa media mensual (%)

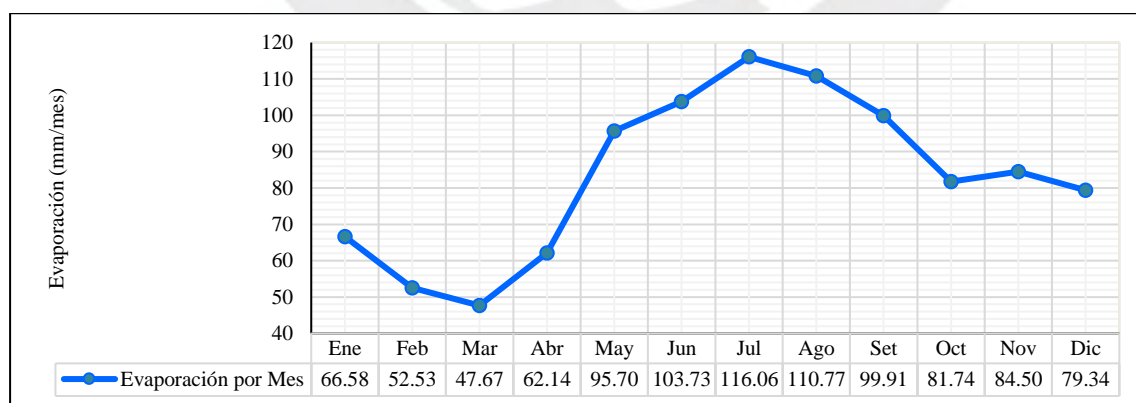


4.1.4.5 Evaporación

De acuerdo con el "Estudio hidrológico en la cuenca del río Casma", realizado por INRENA en 2007 (págs. 85-86), los registros de evaporación total mensual en las estaciones "Buena Vista", "Aija" y "Chiquián" indican una evaporación total anual de 1000.67 mm. Los valores máximos de evaporación se observan en los meses de invierno, alcanzando hasta 116.06 mm, mientras que los valores mínimos se registran en verano, llegando a 47.67 mm.

Figura 30

Distribución de evaporación en la cuenca (mm)

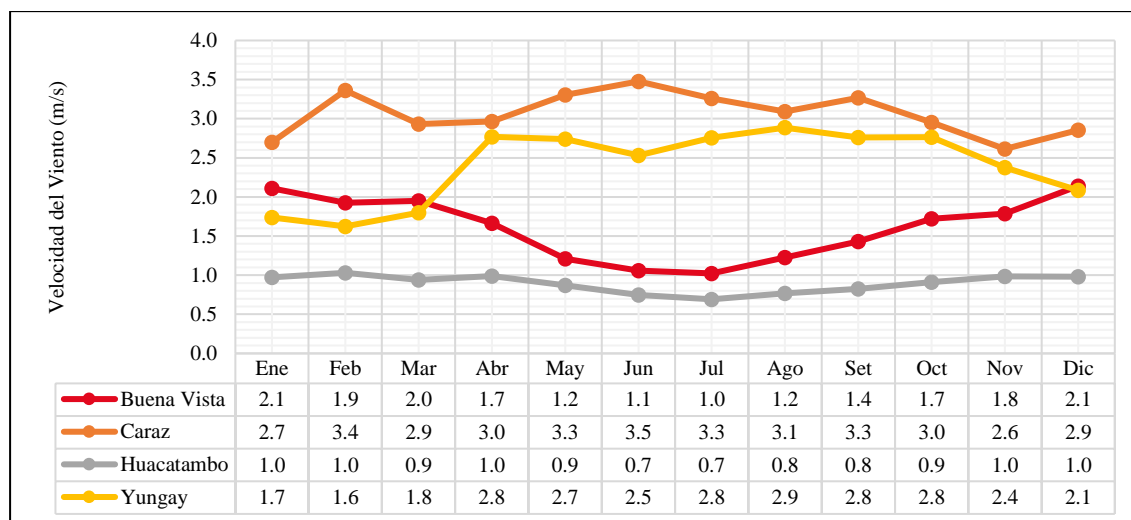


4.1.4.6 Velocidad del viento

El régimen de la velocidad media mensual del viento para las estaciones analizadas, y se presentan los promedios de esta variable.

Figura 31

Velocidad del viento media mensual (m/s)



4.1.4.7 Precipitaciones máximas

El resultado de las precipitaciones máximas de 24 horas para diferentes periodos de retorno en las estaciones analizadas.

Tabla 22

Precipitaciones máximas en 24 horas

TR	Buena Vista	Pariacoto	Chacchán	Pira	Santiago Antúnez de Mayolo	Cajamarquilla	Yungay
2	3.3	16.2	13.8	24.1	32.3	17.5	27.0
10	6.6	42.1	24.6	32.4	45.5	25.8	40.8
25	8.3	56.8	31.7	36.6	52.2	30.0	47.7
50	9.5	67.8	37.7	39.8	57.2	33.1	52.8
100	10.7	78.8	44.4	42.9	62.1	36.2	57.9
200	12.0	89.8	52.0	45.9	67.0	39.3	62.9
500	13.6	104.0	63.4	50.0	73.5	43.4	69.6
1000	14.8	115.0	73.4	53.1	78.3	46.5	74.7

4.1.4.8 Isoyetas máximas

A partir de los valores puntuales recopilados de precipitación registrados en cada estación dentro de la cuenca y mediante la interpolación se construyen las líneas de igual precipitación, conocidas como isoyetas. Estas isoyetas permiten no solo cuantificar el valor promedio de precipitación, sino también visualizar gráficamente su distribución espacial en la zona estudiada para el período considerado.

Actualmente, con el uso de herramientas de interpolación disponibles en software de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se generó un ráster (rejilla) con valores interpolados que representan una variable, en este caso, la precipitación máxima en 24 horas ($P_{\text{máx}} 24$ horas), de acuerdo con el tamaño del píxel asignado. Posteriormente, para cada tiempo de retorno considerado, la data proporcionada se obtuvo con el ráster de precipitación máxima de 24 horas, al cual se asignó el valor promedio de los píxeles dentro del polígono de cada subcuenca. Esto permitió analizar cómo varía la precipitación según los diferentes periodos de retorno.

Tabla 23

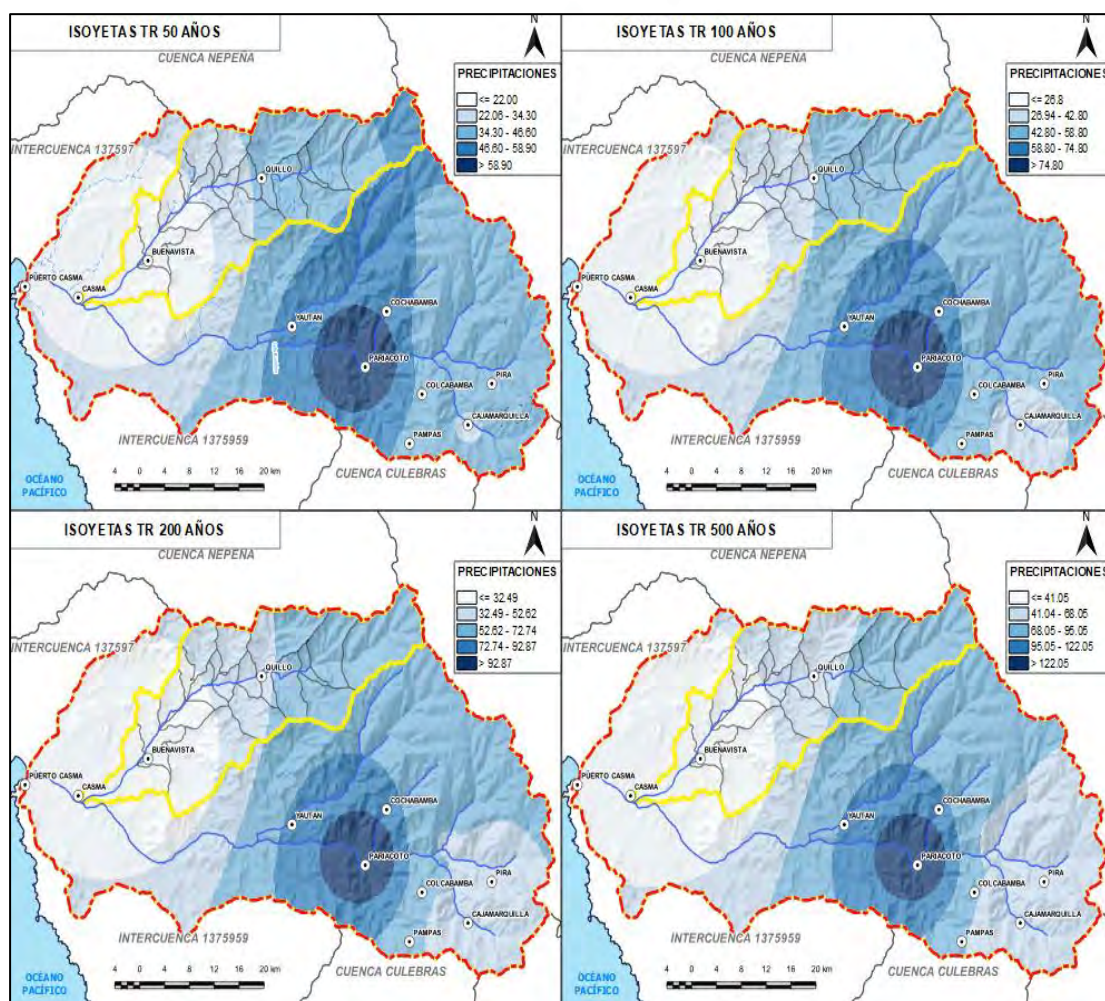
Precipitaciones máximas – isoyetas – por subcuenca

Subcuenca	TR 2	TR 10	TR 25	TR 50	TR 100	TR 200	TR 500	TR 1000
S1	16.0	27.7	34.1	39.0	44.0	49.1	55.9	61.3
S12	16.8	30.7	38.4	44.3	50.4	56.6	64.9	71.6
S14	12.7	23.4	29.4	34.0	38.6	43.3	49.6	54.6
S16	6.2	11.6	14.5	16.6	18.8	21.0	23.9	26.2
S2	20.2	33.5	40.7	46.2	51.9	57.6	65.4	71.5
S24	4.0	7.8	9.8	11.3	12.7	14.2	16.2	17.6
S4	15.4	27.9	34.9	40.2	45.5	51.0	58.4	64.3
S5	10.7	19.2	23.7	27.2	30.7	34.3	39.1	42.9
S55	3.5	7.0	8.8	10.1	11.4	12.8	14.5	15.8
S6	12.7	22.5	27.8	31.9	36.0	40.3	45.9	50.4
S60	16.7	29.5	36.6	42.0	47.5	53.1	60.7	66.7
S65	14.10	25.60	31.90	36.70	41.60	46.60	53.30	58.70
S66	12.90	23.30	29.00	33.40	37.70	42.30	48.30	53.10
S7	7.40	14.00	17.50	20.20	22.90	25.70	29.40	32.30
S70	10.90	19.80	24.60	28.30	32.00	35.90	41.00	45.00

S73	9.00	16.50	20.50	23.60	26.70	29.90	34.10	37.40
S75	6.60	12.30	15.40	17.70	20.00	22.40	25.50	28.00
S78	4.40	8.60	10.70	12.30	13.80	15.50	17.60	19.20
S95	8.50	15.40	19.20	22.00	24.90	27.80	31.70	34.80
S96	10.90	19.60	24.30	27.90	31.50	35.30	40.30	44.20
S98	18.00	31.10	38.20	43.70	49.30	55.00	62.70	68.80

Figura 32

Isoyetas Tr=50, 100, 200 y 500 años



4.1.4.9 Modelo meteorológico

A partir del modelo meteorológico, se asignaron valores de precipitación distribuidos temporalmente a cada una de las subcuencas del modelo hidrológico, considerando una duración total de tormenta de 16 horas (960 minutos). Para ello, se utilizó el método Specified Hyetograph, mediante el cual se define explícitamente la

distribución temporal de la lluvia de diseño.

En este procedimiento, la precipitación máxima en 24 horas ($P_{max\ 24h}$) obtenida para cada subcuenca fue distribuida a lo largo del tiempo empleando perfiles de tormenta tipo Huff, los cuales permiten representar la variabilidad temporal de la precipitación durante el evento. Estos perfiles fueron asociados a cada subcuenca del modelo hidrológico con el fin de reproducir de manera más realista la distribución de la lluvia en el tiempo.

De esta forma, se generaron los hietogramas de precipitación correspondientes al periodo de retorno de 100 años (TR100), los cuales fueron utilizados como datos de entrada en el modelo hidrológico para la estimación de los caudales máximos de avenida. La Tabla 25 presenta la distribución acumulada de precipitación en función del tiempo para cada subcuenca del área de estudio, obtenida a partir de la aplicación del perfil de tormenta seleccionado.



Tabla 24

Perfil de tormenta TR100 para el modelo meteorológico

Nombre	S1	S12	S14	S16	S2	S24	S4	S5	S55	S6	S60	S65	S66	S7	S70	S73	S75	S78	S95	S96	S98
Pmax 24h (mm)	44.0	50.4	38.6	18.8	51.9	12.7	45.5	30.7	11.0	36.0	47.5	41.6	37.7	23.0	32.0	27.0	20.0	13.8	24.9	31.5	49.3
Región Pmax	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4	P4
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	2.2	2.5	1.9	0.9	2.6	0.6	2.3	1.5	0.6	1.8	2.3	2.1	1.9	1.1	1.6	1.3	1.0	0.7	1.2	1.6	2.4
60	4.4	5.0	3.8	1.9	5.1	1.3	4.5	3.0	1.1	3.6	4.7	4.1	3.7	2.3	3.2	2.6	2.0	1.4	2.5	3.1	4.9
90	6.8	7.8	5.9	2.9	8.0	2.0	7.0	4.7	1.8	5.5	7.3	6.4	5.8	3.5	4.9	4.1	3.1	2.1	3.8	4.9	7.6
120	9.5	10.9	8.4	4.1	11.3	2.8	9.9	6.7	2.5	7.8	10.3	9.0	8.2	5.0	7.0	5.8	4.3	3.0	5.4	6.8	10.7
150	13.2	15.2	11.6	5.6	15.6	3.8	13.7	9.2	3.4	10.8	14.3	12.5	11.4	6.9	9.6	8.0	6.0	4.2	7.5	9.5	14.8
180	17.5	20.0	15.3	7.4	20.6	5.0	18.1	12.2	4.5	14.3	18.8	16.5	15.0	9.1	12.7	10.6	7.9	5.5	9.9	12.5	19.6
210	21.9	25.1	19.2	9.4	25.8	6.3	22.7	15.3	5.7	18.0	23.7	20.7	18.8	11.4	16.0	13.3	10.0	6.9	12.4	15.7	24.6
240	26.3	30.1	23.1	11.2	31.0	7.6	27.2	18.4	6.8	21.5	28.4	24.9	22.6	13.7	19.2	16.0	12.0	8.3	14.9	18.9	29.5
270	28.9	33.1	25.3	12.3	34.0	8.3	29.9	20.2	7.5	23.6	31.2	27.3	24.8	15.0	21.0	17.5	13.1	9.1	16.3	20.7	32.4
300	31.7	36.3	27.8	13.5	37.3	9.1	32.8	22.1	8.2	25.9	34.2	29.9	27.2	16.5	23.1	19.2	14.4	10.0	17.9	22.7	35.5
330	34.4	39.4	30.2	14.7	40.6	9.9	35.6	24.0	8.9	28.2	37.2	32.6	29.6	17.9	25.1	20.9	15.7	10.8	19.5	24.7	38.6
360	37.1	42.5	32.5	15.8	43.7	10.7	38.4	25.9	9.6	30.4	40.0	35.1	31.8	19.3	27.0	22.5	16.9	11.7	21.0	26.6	41.5
390	39.1	44.8	34.3	16.7	46.1	11.3	40.5	27.3	10.1	32.1	42.2	37.0	33.6	20.4	28.5	23.7	17.8	12.3	22.1	28.1	43.9
420	40.8	46.8	35.8	17.4	48.2	11.8	42.3	28.5	10.6	33.5	44.1	38.6	35.1	21.3	29.8	24.8	18.6	12.9	23.1	29.3	45.8
450	42.4	48.6	37.2	18.1	50.0	12.3	43.9	29.6	11.0	34.7	45.8	40.1	36.4	22.1	30.9	25.7	19.3	13.4	24.0	30.4	47.5
480	44.0	50.4	38.6	18.8	51.9	12.7	45.5	30.7	11.4	36.0	47.5	41.6	37.7	22.9	32.0	26.7	20.0	13.8	24.9	31.5	49.3

4.1.4.10 Análisis de máximas avenidas

Identificación de puntos clave

Los puntos clave, constituyen zonas estratégicas para la estimación de caudales máximos que servirán de inputs para el modelo hidráulico del área de influencia del Sector 3 – Río Sechín (Tramo 1 y 2). Estos se muestran en la Tabla 26.

Tabla 25

Puntos de interés para estimación de caudales máximos. Sector 3 – Río Sechín (Tramo 1 y 2)

Código Modelo Hidrológico	Código Modelo Hidráulico	Coordenadas Geográficas	
		Latitud (°)	Longitud (°)
Y19(*)	IN-1	-9.339	-78.100
S73	IN-2	-9.340	-78.113
R49, S95	IN-3	-9.356	-78.149
S16	IN-4	-9.367	-78.169
S75	IN-5	-9.377	-78.157
S78	IN-6	-9.396	-78.189
S55, R37	IN-7	-9.434	-78.217
S24	IN-8	-9.454	-78.242

4.1.4.11 Simulación del evento del niño Costero (FEN 2017)

La información de precipitación utilizada en el presente estudio fue obtenida del producto IMERG V06 (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) correspondiente a la misión Global Precipitation Measurement (GPM) desarrollada por la NASA y la JAXA. Este producto proporciona estimaciones de precipitación con una resolución temporal de 30 minutos y una resolución espacial aproximada de 0.1° (~11 km).

Diversos estudios han señalado que los productos satelitales de precipitación pueden presentar sesgos asociados a las condiciones topográficas, intensidad de la precipitación o limitaciones en la estimación de lluvias convectivas. No obstante, el producto IMERG V06 incorpora algoritmos de corrección y calibración mediante datos de estaciones pluviométricas a nivel global, lo que permite mejorar significativamente la precisión de las estimaciones de precipitación (Huffman et al., 2020).

En diferentes evaluaciones realizadas en regiones tropicales y subtropicales, los datos IMERG han demostrado un desempeño satisfactorio para aplicaciones hidrológicas

y modelación de cuencas, especialmente en zonas donde la disponibilidad de estaciones meteorológicas es limitada. Por esta razón, los registros de precipitación obtenidos de IMERG fueron considerados adecuados para su incorporación como datos de entrada en el modelo hidrológico desarrollado en la presente investigación.

Se recopiló la data del modelo FEN 2017 que brinda información pluviométrica satelital, el cual ocupa una mejor distribución de la lluvia en toda la cuenca a diferencia de estaciones puntuales, pues carece de un número adecuado de estaciones en la cuenca del río Casma.

Se reunió información obtenida a través del método de la SCS Curve Number (Número de Curva), cuyos valores iniciales fueron obtenidos según la metodología establecida por la Autoridad Nacional del Agua (2017). A partir del ráster de textura y taxonomía del suelo obtenido del servidor SoilGrid, establecieron los grupos hidrológicos, para la cobertura del suelo basandose en la información generada por el proyecto GlobeLand30 del gobierno chino que brinda un ráster con 10 tipos de cobertura, los cuales fueron asociados a los valores CN II (condiciones normales), de acuerdo con la metodología de la ANA.

Seleccionaron los parámetros en condiciones normales, los mismos que posteriormente fueron calibrados.

Tabla 26

Número de curva condición normal iniciales y calibrados -I

Subcuenca	Área (Km²)	CN teórico	CN Inicial (GlobeLand30 - Suelos SoilGrid)	CN Calibrado
S1	68.15	70 – 80	74.6	72.72
S12	40.74	70 – 80	76.4	72.11
S14	40.32	70 – 80	77.3	70.51
S16	20.50	70 – 80	78.7	76.16
S2	104.12	70 – 80	79.3	73.54
S24	60.93	70 – 80	77.7	75.20
S4	36.38	70 – 80	75.2	72.27
S5	29.09	70 – 85	82.0	70.40

S55	8.83	70 – 90	81.6	84.48
S6	25.53	70 – 80	75.1	70.40
S60	9.10	70 – 80	73.4	72.43

Tabla 27

Número de curva condición normal iniciales y calibrados -2

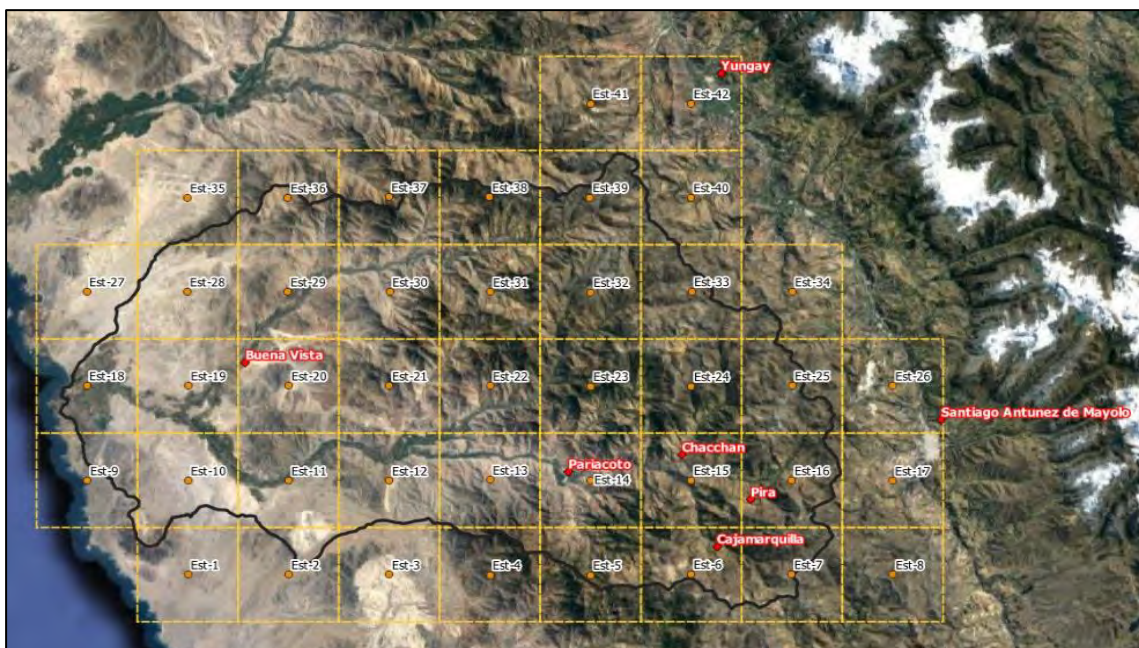
Subcuenca	Área (Km²)	CN teórico	CN Inicial (GlobeLand30 - Suelos SoilGrid)	CN Calibrado
S65	10.88	70 – 80	76.6	71.68
S66	15.48	70 – 80	77.7	71.25
S7	118.24	70 – 85	80.6	73.52
S70	12.09	70 – 80	76.3	71.47
S73	18.64	70 – 80	78.4	72.00
S75	19.12	70 – 80	78.2	75.52
S78	35.63	70 – 80	78.7	81.02
S95	10.76	70 – 85	80.2	71.90
S96	5.04	70 – 80	79.8	70.51
S98	51.54	70 – 80	76.1	72.75

Modelo meteorológico

La lluvia fue obtenida de IMERG v06 de la misión GPM (Global Precipitation Measurement Mission) - NASA de EE. UU. y JAXA de Japón. El intervalo es cada 30 minutos de precipitación acumulada en un píxel de 0.1° de arco (~11km). Dichas precipitaciones fueron ingresadas al modelo.

Figura 33

Distribución de grilla IMERG



4.1.4.12 Hidrograma resultante – Evento FEN 2017

Se muestran los caudales máximos y los hidrogramas resultantes del evento FEN 2017, para los puntos de interés.

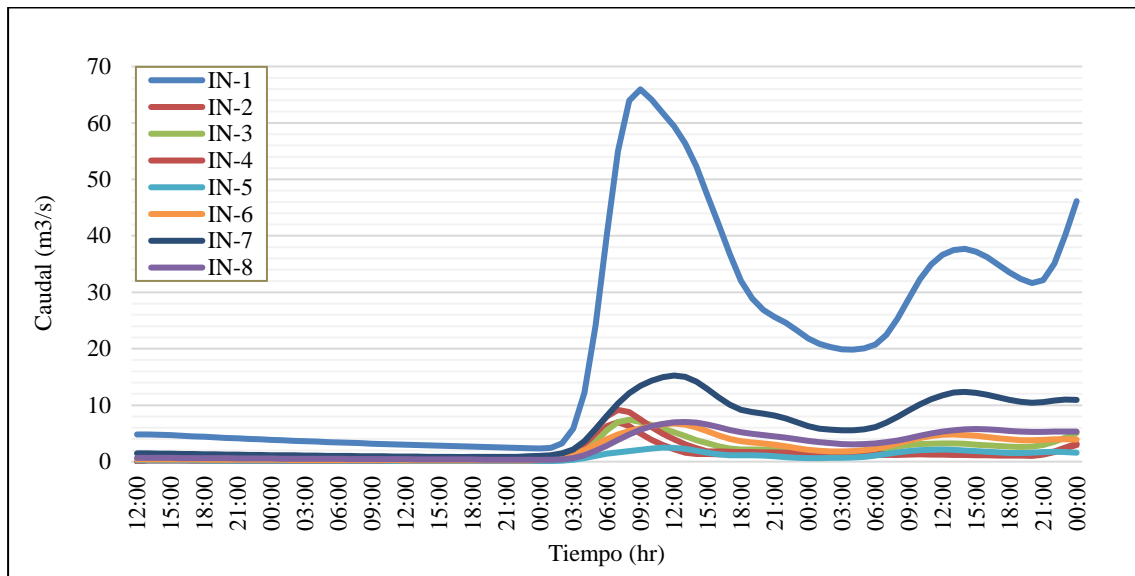
Tabla 28

Caudales FEN 2017

Código	Caudales máximos en los Puntos de Interés (m³/s)							
Modelo Hidráulico	IN-1	IN2	IN-3	IN-4	IN-5	IN-6	IN-7	IN-8
Modelo Hidrológico	Y19(*)	S73	R49, S95	S16	S75	S78	S55, R37	S24
Evento FEN2017	66.0	7.0	7.4	9.2	2.5	6.7	15.3	7.0

Figura 34

Hidrograma de caudales correspondientes al FEN 2017



4.1.4.13 Caudales máximos en determinados periodos de retorno

Para la estimación de los caudales máximos asociados a distintos periodos de retorno se empleó un modelo hidrológico de tipo lluvia–escorrentía implementado en el software HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System). Este modelo fue seleccionado debido a su amplia aplicación en estudios hidrológicos y de gestión de recursos hídricos, así como por su capacidad para representar los procesos de transformación de precipitación en escorrentía a escala de cuenca y subcuenca.

El modelo HEC-HMS permite integrar diferentes componentes del ciclo hidrológico, tales como la estimación de pérdidas por infiltración, la generación de escorrentía directa, la transformación de hidrogramas y el tránsito de caudales en la red de drenaje, lo que lo convierte en una herramienta adecuada para la simulación de eventos hidrológicos extremos.

Asimismo, este modelo presenta ventajas importantes para el análisis hidrológico de cuencas donde la disponibilidad de datos hidrométricos es limitada, ya que permite trabajar con modelos semi-distribuidos basados en parámetros físicos de la cuenca, tales como el uso del suelo, tipo de suelo, pendiente, área de drenaje y características geomorfológicas.

Debido a estas características, el modelo HEC-HMS ha sido ampliamente

utilizado en estudios de estimación de avenidas máximas, diseño de obras hidráulicas y análisis de inundaciones, siendo recomendado por organismos internacionales y entidades de gestión del agua para el análisis hidrológico de cuencas.

Con base en la simulación hidrológica realizada, se estimaron los hidrogramas y caudales máximos de avenida para diferentes periodos de retorno (2, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años) en los puntos de control definidos dentro del modelo hidrológico, cuyos resultados sirven como insumo para el posterior análisis hidráulico y diseño de las obras de protección ribereña.

Figura 35

Código Modelo Hidráulico

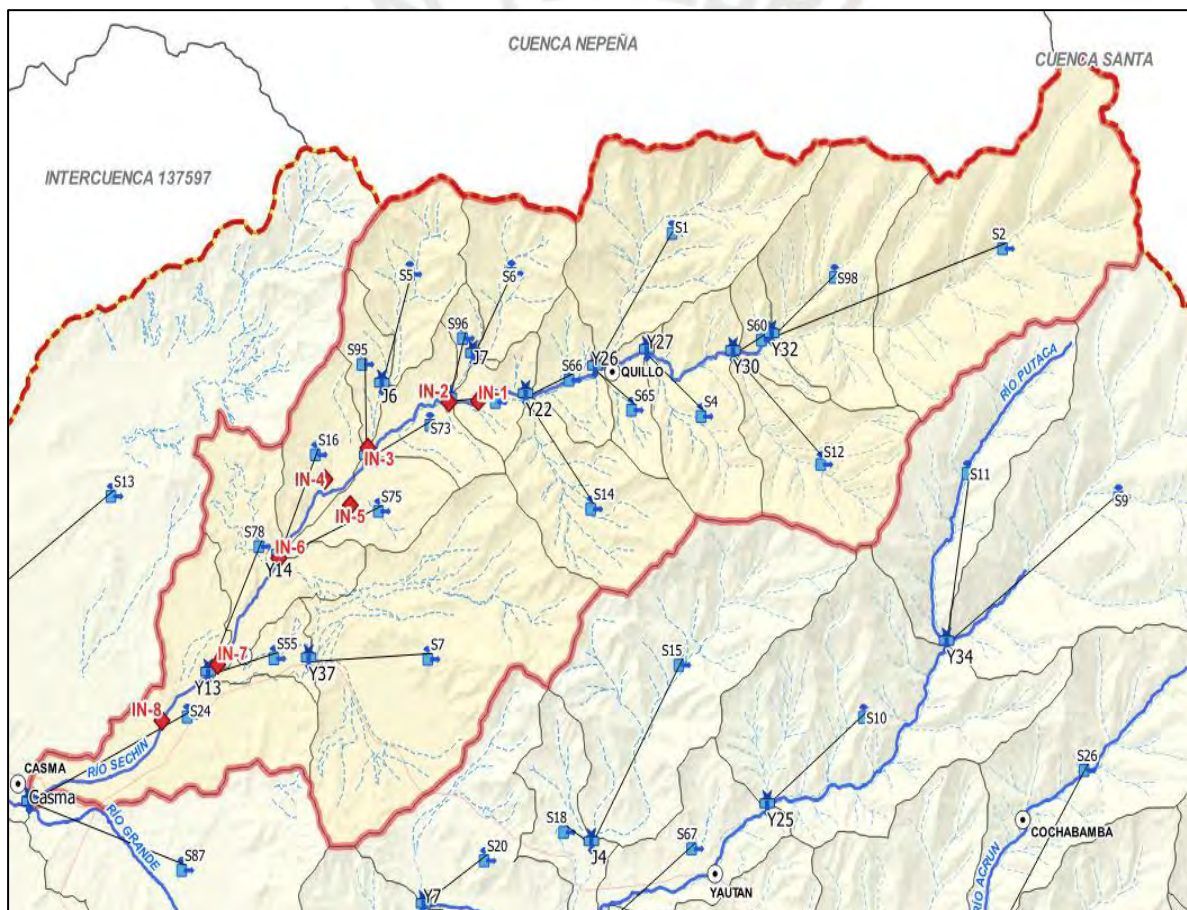


Tabla 29*Caudales máximos del estudio hidrológico*

Código Modelo Hidráulico	Elemento Hidrológico	Caudales máximos por periodos de retorno (m ³ /s)							
		TR 2	TR10	TR25	TR50	TR100	TR200	TR500	TR1000
IN-01	Medio Sechín	4.2	16.8	38.1	59.7	85.3	115.3	160.2	199.4
IN-02	S73	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.9	1.7	2.3
IN-03	R49, S95	0.4	0.4	0.4	0.6	1.3	2.2	3.8	5.4
IN-04	S16	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.7	1.1
IN-05	S75	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.8	1.2
IN-06	S78	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.7	1.1
IN-07	S55, R37	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	2.8	5.4	7.9
IN-08	S24	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

4.1.4.14 Caudales máximos con efecto de cambio climático 15%

Para evaluar el efecto del cambio climático en los caudales máximos se consideraron escenarios climáticos basados en las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP) propuestas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC).

Los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 representan trayectorias de concentración de gases de efecto invernadero asociadas a diferentes niveles de forzamiento radiativo hacia finales del siglo XXI. El escenario RCP 8.5 corresponde a un escenario crítico de altas emisiones, mientras que el RCP 6.0 representa un escenario intermedio de incremento de emisiones.

Diversos estudios hidrológicos han señalado que el cambio climático puede generar un incremento en la intensidad de precipitaciones extremas, lo que se traduce en mayores caudales máximos en eventos de avenida. En base a estas proyecciones climáticas y como medida conservadora para el diseño hidráulico, se consideró un incremento porcentual en los caudales máximos obtenidos del modelo hidrológico.

Bajo este escenario crítico se estimó que el caudal máximo para un periodo de retorno de 100 años alcanza un valor de 98.1 m³/s, el cual fue utilizado para evaluar las

condiciones hidráulicas del sistema y el dimensionamiento de las obras de protección.

Tabla 30

Caudales máximos con efecto de cambio climático

Punto de interés	Caudales Máximos con efecto de cambio climático 15% (m³/s) - Sector 3 – Sechín (Tramo 1 y 2)							
	2	10	25	50	100	200	500	1000
IN-1	4.8	19.4	43.8	68.6	98.1	132.5	184.3	229.3
IN-2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6	1.1	1.9	2.7
IN-3	0.5	0.5	0.5	0.7	1.4	2.5	4.4	6.2
IN-4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4	0.8	1.2
IN-5	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.9	1.4
IN-6	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.8	1.2
IN-7	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	3.2	6.2	9.1
IN-8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

4.1.4.15 Sedimentos

Se emplearon 3 métodos para el cálculo de la erosión, los cuales consideran factores como los patrones de lluvia, tipo de suelo, topografía, uso del suelo y prácticas de manejo del mismo. El objetivo de la investigación, fue estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca, utilizando la metodología RUSLE para el periodo 1964-2020, y las metodologías MUSLE y ONSTAD FOSTER para periodos de retorno de 2, 10, 25, 50, 100, 200, 500 y 1000 años.

Los resultados de la producción de sedimentos para diferentes periodos de retorno (modelos MUSLE y ONSTAD-FOSTER) en el área de influencia del Sector 3 – Río Sechín (Tramo 1 y 2), se muestran a continuación:

Tabla 31*Producción de sedimentos para diferentes periodos de retorno*

TR	Producción de Sedimentos Cuenca del río Sechín	
	Método MUSLE (Tn)	Método Onstad Foster (Tn)
2	6501.90	47449.24
10	22595.10	137588.92
25	47280.50	211748.89
50	73347.50	277632.30
100	105977.30	359742.16
200	145302.10	455896.09
500	206998.70	601520.06
1	262113.90	736477.04

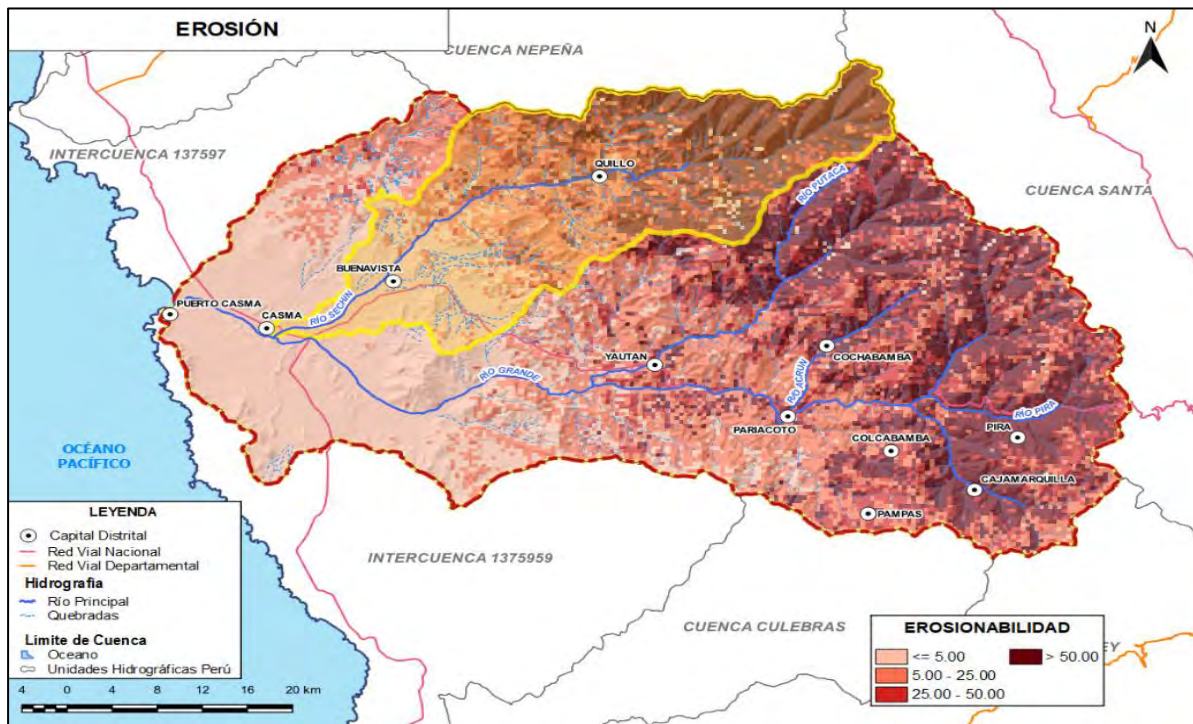
Por otro lado, el método de RUSLE estimó las pérdidas anuales de suelo causadas por la erosión superficial en función de factores como clima, suelo, relieve, vegetación y uso del suelo, considerando la precipitación como el principal agente de erosión. Un ejemplo de su aplicación es el Mapa de Pérdida de Suelo generado para la cuenca del río Casma.

Tabla 32*Tipo de erosión según el modelo RUSLE, en la cuenca del río Casma*

Tipo	Rango (ton/ha/año)	Área (ha)	%	Erosión total anual (Ton/año)
Baja	0 - 5	92,825	31.08%	152,701
Moderada	5 - 25	81,539	27.31%	1'121,730
Media	25 - 50	44,160	14.79%	1'604,480
Alta	más de 50	80,096	26.82%	10'515,936
Total general		298,620	100.00%	13'394,847

Figura 36

Mapa de erosión de la cuenca del río Casma



4.1.5 Estudio hidráulico

Para la estimación de los caudales máximos en la cuenca del río Casma se desarrolló un modelo hidrológico a escala de cuenca, aplicando el enfoque hidrometeorológico de precipitación–escorrentía mediante el software HEC-HMS versión 4.8 (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE).

Este modelo permite simular los procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca hidrográfica, tales como la interceptación, infiltración, almacenamiento superficial, escorrentía directa y propagación del flujo, a partir de la información de precipitación y las características físicas de la cuenca. Su aplicación es ampliamente reconocida en estudios hidrológicos para la estimación de hidrogramas de crecida, análisis de avenidas y determinación de caudales de diseño para diferentes periodos de retorno.

El uso del modelo HEC-HMS permite representar de manera integrada los procesos de transformación de la lluvia en escorrentía, considerando parámetros asociados a la topografía, uso del suelo, tipo de suelo y características geomorfológicas de la cuenca. Esto permite generar escenarios hidrológicos suficientemente representativos que brindan

un grado adecuado de confiabilidad para la evaluación del comportamiento hidrológico de la cuenca y el dimensionamiento de obras hidráulicas.

En el contexto de la gestión del riesgo de inundaciones, este tipo de modelamiento constituye una herramienta fundamental para apoyar la planificación territorial, el diseño de infraestructuras hidráulicas y la definición de medidas de prevención frente a eventos hidrometeorológicos extremos.

4.1.5.1 Sectorización del río

La solución integral del control de inundación en el Sector 3 - Río Sechín ha sido sectorizado a fin de presentar los detalles de la solución. Asimismo, en la Tabla adjunta se presenta la ubicación de los sectores sobre los ríos Casma, Sechín y Grande.

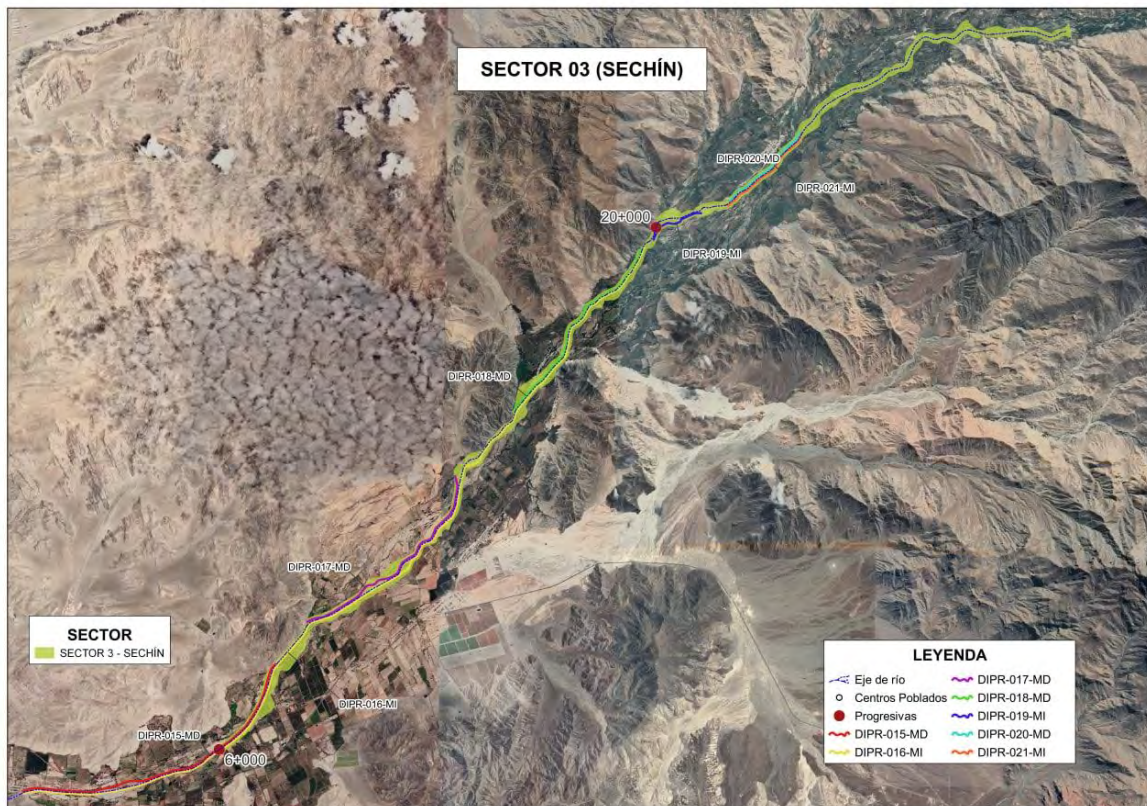
Tabla 33

Sectorización de la zona de estudio

Paquete – sector	Prog .Inic ial	Prog. Final	Ubicación inicio utm 17s		Ubicación final utm 17s	
			Este	Norte	Este	Norte
Sector 3 – Río Sechín Tramo 2	6+0 00	20+0 00	8018 43.49	895220 5.76	810 446. 57	89624 68.79
Sector 3 – Río Sechín Tramo 1	20+ 000	29+7 31	8104 46.57	896246 8.79	818 536. 59	89663 15.35

Figura 37

Sectorización del Sector 3 – Río Sechín



4.1.5.2 Ancho estable

Los resultados del ancho estable para cada tramo (metodología SIMONS Y HENDERSON, ALTUNIN – MANNING, BLENCH y PETTIS) en el área de influencia del Sector 3 – Río Sechín (Tramo 1 y 2), se muestran a continuación:

Tabla 34

Resumen de cálculo ancho estable

Tramo	Pend. Min. (m/m)	TR	Q diseño (m ³ /seg)	Resumen de metodología				Prom.	Prom. Pond.	Valor Reco m.	Valor Recom. Redon.	70 % Recom.	Perfi l
				Simons y Henderson	Altunin - Manning	Blench	Pettis						
				B (m)	B (m)	B (m)	B (m)						
Km 06+000	0.010	50	70.55	24.36	28.60	43.00	37.29	33.31	29.21	31.57	32.00	22.40	34.00
	0.010	100	101.87	29.27	34.36	51.67	44.81	40.03	35.10				
Km 23+535	0.010	200	139.21	34.22	40.17	60.40	52.39	46.80	41.04				
Km 23+535	0.043	50	68.59	24.02	23.86	36.72	36.77	30.34	26.50	28.57	29.00	20.30	24.00
	0.043	100	98.14	28.73	28.54	43.92	43.99	36.29	31.70				
Km 29+731	0.043	200	132.55	33.39	33.17	51.04	51.12	42.18	36.84				

CAPÍTULO VI: RESULTADOS

5.1 Identificación de tipo de defensa ribereña

En primer lugar, se elaboró una matriz de selección para identificar y elegir la defensa ribereña más eficaz, por lo que se requirió estructurar criterios de evaluación que permitieron comparar alternativas. Por ello, se definió los siguientes tipos de defensas ribereñas:

Tabla 35

Definición de las alternativas de defensa ribereña

Tipos de defensa ribereña	Ventajas	Desventajas
Enrocado	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia al flujo de agua y erosión. • Capacidad de adaptarse a deformaciones del terreno. • Bajo mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere disponibilidad de roca adecuada. • Puede tener un impacto visual negativo. • Alto costo de transporte en áreas remotas.
Gaviones	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibles y adaptables a asentamientos del terreno. • Buen drenaje interno que evita la acumulación de presión hidrostática. • Relativamente económicos en comparación con estructuras rígidas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren mantenimiento de la malla para evitar corrosión. • Tiempo de instalación mayor que el enrocado.
Muros de contención	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistencia estructural. • Control preciso de caudales y forma del río. • Larga vida útil si se diseñan adecuadamente. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costos de construcción y mantenimiento. • Bajo impacto ambiental positivo; pueden alterar el ecosistema. • Menor capacidad de adaptación a asentamientos del terreno.

Espigones	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la velocidad del flujo para disminuir la erosión. • Favorecen la deposición de sedimentos en áreas específicas. • Relativamente económicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pueden desviar el problema de erosión aguas abajo. • Impacto ecológico en la dinámica del río. • Requieren mantenimiento para evitar degradación.
Obras de protección con geosintéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Alta durabilidad frente a degradación química, biológica y rayos UV. • Reducción de costos en transporte, logística y materiales. • Versatilidad en aplicaciones (estabilización, filtración, drenaje, etc.). • Instalación rápida y eficiente. • Promoción de la sostenibilidad al reducir el impacto ambiental. • Mejora de la capacidad de carga y estabilidad estructural. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costos iniciales elevados en algunos casos. • Requiere instalación técnica especializada. • Susceptible a daños físicos durante transporte e instalación. • Limitaciones en ambientes extremos (altas temperaturas o químicos). • Dependencia de tecnología y capacitación específica.

Tabla 36

Criterios para la evaluación de los tipos de defensa ribereña

Criterios	Subcriterios
Eficiencia hidráulica	Capacidad para reducir erosión Contener caudales
Durabilidad	Vida útil estimada bajo condiciones locales
Costo	Inversión inicial Costos de mantenimiento
Facilidad de construcción y mantenimiento	Facilidad y tiempo de construcción

Impacto ambiental	Nivel de alteración al ecosistema ribereño Impacto directo e indirecto en el ecosistema
Estabilidad estructural	Resistencia a eventos externos

Tabla 37

Eficiencia hidráulica para la evaluación de los tipos de defensa ribereña

Criterio	Tipos				
	Enrocado	Gaviones	Muros de contención	Espigones	Obras de protección con geosintéticos
Eficiencia Hidráulica	Buena capacidad para disipar la energía del agua; ideal para controlar erosión.	Eficientes en controlar erosión y estabilizar taludes; permiten el paso controlado del agua.	Alta resistencia hidráulica, pero pueden causar rebote de energía del agua, aumentando la erosión aguas abajo.	Redirigen el flujo del agua para proteger áreas específicas; variable según diseño.	Altamente eficientes como revestimientos impermeables o estabilizadores, pero su resistencia depende del diseño y tipo utilizado.

Tabla 38*Estabilidad estructural para la evaluación de los tipos de defensa ribereña*

Tipos	Obras de protección con geosintéticos				
	Enrocado	Gaviones	Muros de contención	Espigones	
Criterio					
Estabilidad estructural	Estable bajo flujos moderados; puede ser vulnerable en caudales extremos.	Estables gracias a su diseño modular y capacidad de adaptación al terreno.	Altamente estables, siempre que sean diseñados y fundados adecuadamente.	Estables si se diseñan y anclan correctamente, pero sufren desgaste por sedimentos y corrientes.	Dependientes de la calidad del suelo subyacente y la correcta instalación.

Tabla 39*Facilidad de construcción y mantenimiento para la evaluación de los tipos de defensa ribereña*

Tipos	Obras de protección con geosintéticos				
	Enrocado	Gaviones	Muros de contención	Espigones	
Criterio					
Facilidad de construcción y mantenimiento	Fácil de instalar y reparar, pero requiere maquinaria para grandes volúmenes.	Relativamente fácil, aunque su ensamblaje manual puede ser laborioso.	Complejo de construir y mantener, especialmente en suelos inestables.	Requiere diseño técnico especializado y puede ser difícil de reparar.	Fácil instalación, pero necesita personal capacitado y supervisión adecuada.

Tabla 40*Viabilidad económica para la evaluación de los tipos de defensa ribereña*

Tipos	Enrocado	Gaviones	Muros de contención	Espigones	Obras de protección con geosintéticos
	Criterio				
Viabilidad económica	Económico, especialmente si hay materiales disponibles en la zona.	Moderado; requieren más mano de obra y materiales.	Alto costo debido a materiales y complejidad constructiva.	Variable según diseño y materiales; generalmente más costosos.	Costos iniciales variables; puede ser más económico a largo plazo por menor mantenimiento.

Tabla 41*Impacto ambiental para la evaluación de los tipos de defensa ribereña*

Tipos	Enrocado	Gaviones	Muros de contención	Espigones	Obras de protección con geosintéticos
	Criterio				
Impacto ambiental	Moderado; puede alterar ligeramente el ecosistema.	Bajo impacto; permite la regeneración de vegetación en su interior.	Alto impacto, ya que limita la interacción del río con su entorno.	Medio a alto, dependiendo de cómo alteren el flujo natural del río.	Variable; algunos materiales pueden ser sostenibles y de bajo impacto.

Tabla 42*Resumen del análisis comparativo de los tipos de defensa ribereña*

Características	Enrocado	Gaviones	Muros de contención	Espigones	Obras de protección con geosintéticos
Eficiencia Hidráulica	Alta eficiencia	Moderada eficiencia	Alta eficiencia	Media eficiencia	Alta eficiencia
Estabilidad estructural	Estable bajo flujos moderados	Estables	Altamente estables	Estables si se diseña y ancla correctamente	Dependientes de la calidad del suelo
Costo	Medio bajo	Medio	Alto	Bajo	Alto
Facilidad de construcción y mantenimiento	Fácil de instalar.	Relativamente fácil	Complejo de construir y mantener	Requiere diseño técnico especializado y puede ser difícil de reparar.	Fácil instalación (personal capacitado)
Impacto ambiental	Moderado	Bajo	Alto	Medio - Alto	Baja-media

Por ello, bajo este análisis multicriterio ponderado de las ventajas y desventajas de cada alternativa, se utilizó el Método de Ponderación de Criterios (Weighted Scoring Method), permitiendo evaluar y comparar en base a criterios definidos.

Para ello, se realizó la ponderación de los criterios, determinando la importancia relativa de cada criterio utilizando una escala del 0 al 100%.

- Eficiencia hidráulica: 30%.
- Durabilidad: 25%.
- Costo: 20%.
- Impacto ambiental: 15%.
- Constructibilidad: 10%.

Posteriormente, se asignó mediante una calificación a cada alternativa para cada criterio en una escala uniforme.

Tabla 43*Matriz de selección de los tipos de defensa ribereña*

Alternativas	Eficiencia hidráulica (30)	Durabilidad (25%)	Costo (20%)	Impacto Ambiental (15%)	Constructibilidad (10%)	Total
Enrocado	4 (1.2)	5 (1.25)	4 (0.8)	3 (0.45)	4 (0.4)	4.1
Gaviones	3 (0.9)	4 (1.0)	4 (0.8)	4 (0.6)	4 (0.4)	3.7
Muros de contención	5 (1.5)	5 (1.25)	2 (0.4)	2 (0.3)	3 (0.3)	3.75
Espigones	3 (0.9)	4 (1.0)	4 (0.8)	3 (0.45)	4 (0.4)	3.55
Obras con geosintéticos	4 (1.2)	3 (0.75)	4 (0.8)	5 (0.75)	5 (0.5)	4.1

En consecuencia, la alternativa con el puntaje más alto fue el enrocado con geosintéticos (4.1), lo que indicó que era la opción más adecuada de acuerdo con los criterios establecidos, destacándose principalmente en aspectos como costo, impacto ambiental y constructibilidad. En función de estos resultados, se seleccionó la alternativa de enrocado con la incorporación de geosintéticos.

Para ello, se consideró un ancho mínimo basado en el ancho de referencia del río y se priorizó el aprovechamiento de diques existentes que se encontraban en buen estado, compuestos por núcleo, enrocado y ña. En estos casos, los diques aprovechables solo requirieron trabajos de reperfilado y la incorporación de protección adicional mediante enrocado. Asimismo, cuando se identificaron diques paralelos, se verificó que al menos uno alcanzara el 70% del ancho estable; en caso contrario, se planteó la construcción de un nuevo dique en la margen opuesta. Del mismo modo, cuando los diques existentes presentaban un estado deficiente, se proyectaron nuevas defensas ribereñas con el objetivo de reducir al mínimo la afectación predial.

De este modo, se consideraron dos tipos de diques: DIPR-020-MD y DIPR-021-MI. En ambos casos, el análisis geotécnico de los suelos permitió detallar las características de las unidades geológicas presentes, así como los resultados obtenidos en los ensayos geofísicos. En el dique DIPR-020-MD se identificaron dos unidades principales. La primera, denominada UG-03, correspondía a depósitos aluviales con espesores entre 5,0 m y 8,0 m, compuestos por gravas mal gradadas, bolonería y bloques heterométricos en una matriz arenosa con trazas de limos. Los ensayos mostraron velocidades de onda de corte (V_s) entre 340 y 558 m/s, y velocidades de onda superficial (V_p) entre 650 y 1400

m/s, lo que evidenciaba una compacidad densa. Por debajo de esta unidad se encontraba la UG-02, caracterizada por la presencia de bloques y bolonería de origen ígneo en una matriz areno-limosa. En esta unidad, las velocidades de onda de corte oscilaron entre 503 y 967 m/s, mientras que las velocidades de onda superficial alcanzaron los 1400 m/s, indicando una compacidad muy densa.

Finalmente, en el dique DIPR-021-MI se registraron dos unidades geológicas con características similares. La unidad UG-03 presentó depósitos aluviales con espesores entre 6,0 m y 8,0 m, compuestos por gravas mal gradadas, bolonería y bloques subangulosos en una matriz arenosa con presencia de limos. Los ensayos de penetración realizados en el sondeo S-S-08 arrojaron resultados de rechazo, mientras que las velocidades de onda de corte variaron entre 375 y 448 m/s, y las velocidades de onda superficial fluctuaron entre 900 y 1400 m/s, lo que indicaba una compacidad densa. Por su parte, la unidad UG-02, ubicada por debajo de la anterior, estaba conformada por bloques y bolonería en una matriz areno-limosa. La elevada densidad del material también generó rechazo en los ensayos de penetración, registrándose velocidades de onda de corte entre 503 y 967 m/s y velocidades de onda superficial de hasta 1400 m/s. Esta información resultó fundamental para la planificación y el diseño constructivo de ambos diques, al proporcionar una caracterización detallada de la estructura y compacidad de los suelos presentes.

5.2 Diseño de la defensa ribereña

Se selecciono el enrocado y geosintético para el diseño, se procedió a realizar el diseño, de acuerdo a los estudios previos, una vez definido el ancho estable según la Tabla 35 y el caudal de diseño se procede a realizar el cálculo del diseño de socavación general, borde libre y el dimensionamiento del enrocado, estos cálculos se adjuntan en el ANEXO 11.

En la Tabla 45 se presenta la definición en planta de las defensas proyectadas en el Sector 3 – Río Sechín.

Tabla 44*Trazado en planta de las infraestructuras proyectadas*

Ubicación de defensas ribereñas								
Código de defensa	Marg	Prog. Inicial	Prog. Final	Long. (m)	Coordenada de inicio		Coordenada de Fin	
					X	Y	X	Y
DIPR-020-MD	Der.	0+00	0+85	855.0	811890.46	8962980.46	813269.32	8964326.17
DIPR-021-MI	Izq.	0+00	2+05	2057.0	811865.00	8962897.00	813298.74	8964307.61

Asimismo, en la Tabla 46 y 47, se muestra las intervenciones de los diques 20 y 21 con enrocado, contemplando la construcción de uñas antisocavacantes.

Tabla 45*Resumen del tipo de intervención del DIPR-020-MD*

Código de defensa	Marg	Prog. Inicial	Prog. Final	Long. (m)	Tipología del dique
DIPR-020-MD	Der.	0+000	0+855	855.0	Enrocado de Dique Masivo Existente

Tabla 46*Resumen del tipo de intervención del DIPR-021-MI*

Código de defensa	Marg	Prog. Inicial	Prog. Final	Long. (m)	Tipología del dique
DIPR-021-MI	Izq.	0+000	0+050	50.0	Dique Nuevo con Enrocado
DIPR-021-MI	Izq.	0+050	1+600	1550.0	Enrocado de Dique Masivo Existente
DIPR-021-MI	Izq.	1+600	1+840	240.0	Dique Nuevo con Enrocado
DIPR-021-MI	Izq.	1+840	2+050	210.0	Enrocado de Dique Masivo Existente

Por otro lado, se presenta las profundidades de socavación picos calculadas para cada dique por tramos de 20m.

Tabla 47*Resumen de profundidad de socavación*

Código de defensa	Margen	Prog. Inicial	Prog. Final	Socavación máxima calculada (m)				Socavación asumida (m)
				Lischtvan – lebediev	Maza & echavarría	Blench	Hec-ras	
DIPR-020-MD	Der.	0+000	0+855	0.06	1.12	1.76	0.62	1.8
DIPR-021-MI	Izq.	0+000	2+050	0.37	0.53	1.12	0.58	1.5

Debido a la complejidad del fenómeno de socavación y a la variabilidad de las condiciones hidráulicas y sedimentológicas en ríos aluviales, es recomendable aplicar diversas metodologías de estimación con el fin de comparar los resultados obtenidos y reducir la incertidumbre asociada al cálculo.

En el presente estudio se emplearon los métodos de Lischtvan–Lebediev, Maza & Echavarría, Blench y el modelo HEC-RAS, ya que estos enfoques combinan metodologías empíricas y modelación hidráulica numérica. La comparación de los resultados obtenidos mediante estas metodologías permitió seleccionar una socavación de diseño representativa, adoptando un valor conservador que garantice la estabilidad de las defensas ribereñas frente a eventos hidrológicos extremos. Asimismo, en la Figura 37 y 38, se calculó mediante los métodos Lischtvan – Levediev, Maza & Echavarría, Blench y HEC RAS en el área de influencia del Sector 3 – Río Sechin, estos cálculos se encuentran en el ANEXO 11, a continuación, se presenta la socavación que se produce en cada dique y por progresivas.

Figura 38

Socavación general del DIPR-020-MD

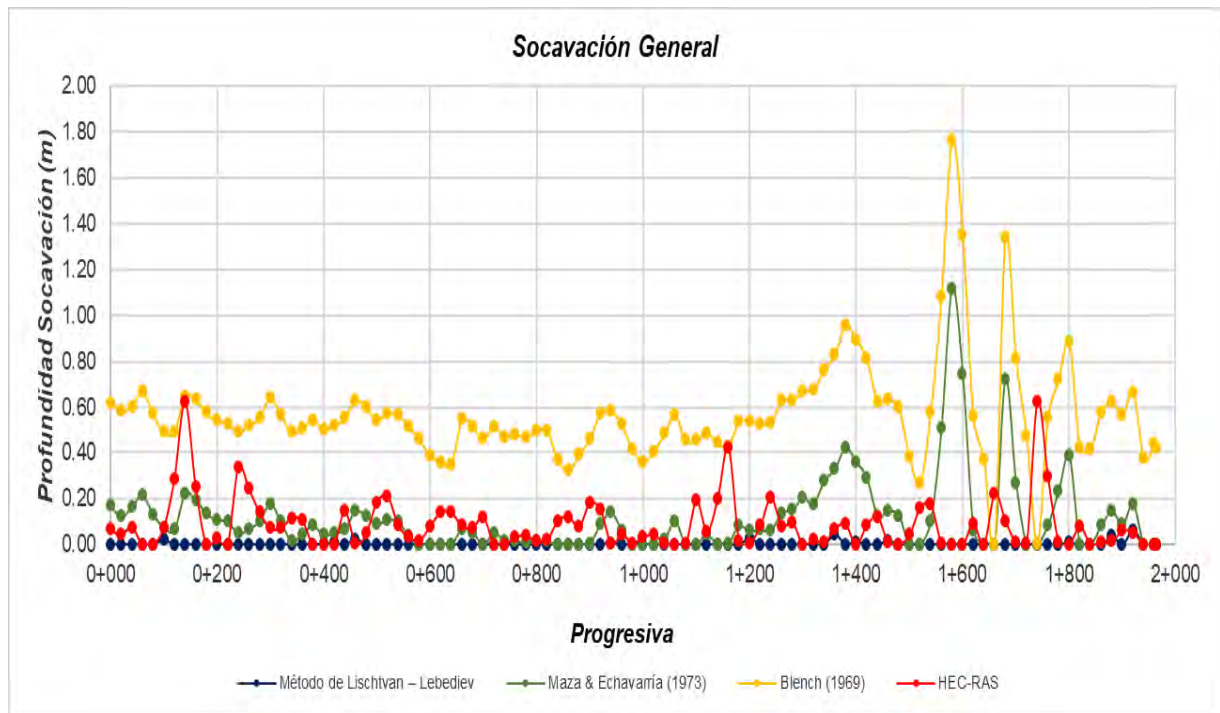
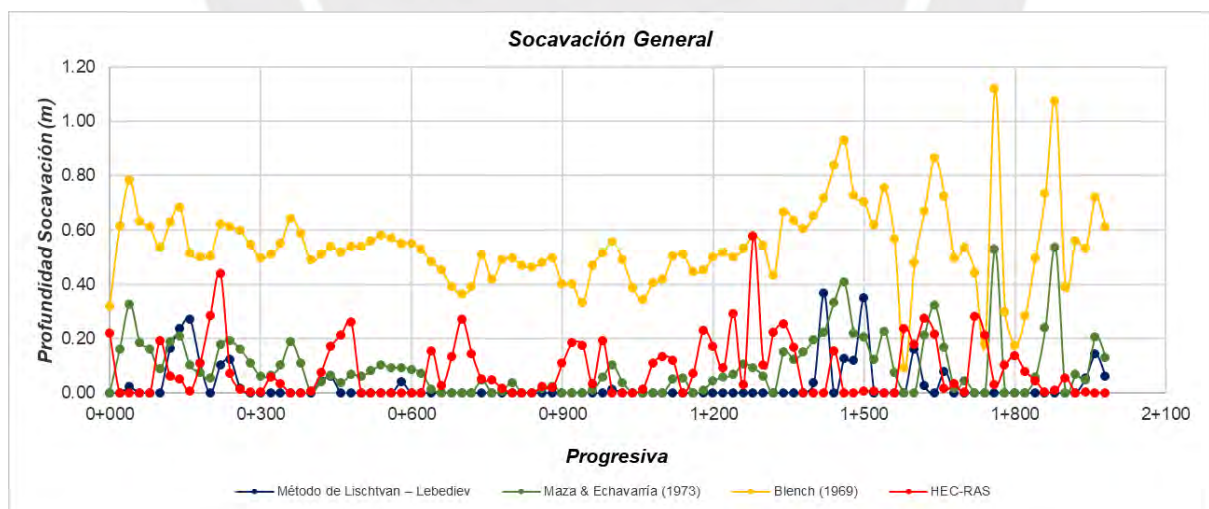


Figura 39

Socavación general del DIPR-021-MI



Para calcular el diámetro del enrocado se utilizaron las metodologías de U.S. Departamento of Transportation, Maynard y Isbash, en los cálculos se puede observar en el ANEXO 11. Adicionalmente a ello, se realizó el cálculo del borde libre bajo el método de Mannig – Strickler.

Posteriormente, se delimitó los diámetros del enrocado, socavación u longitud de uña asumido para los diques DIPR-020-MD y DIPR-021. A continuación, se presentará el cuadro resumen de los cálculos realizados:

Tabla 48

Resumen del cálculo del enrocado del DIPR-020-MD y DIPR-021-MI

Estructura	Prog. Inicio (km)	Prog. Fin (km)	Longitud (m)	Tipología de defensa	Diámetro De Enrocado	Tipo de enrocado	Socavación	Longitud de uña
DIPR-020-MD	0+00 0	0+85 5	855.0	Enrocado de Dique Masivo Existente	0.9	II	1.8	1.5
DIPR-021-MI	0+00 0	0+05 0	50.0	Dique Nuevo con Enrocado	0.5	II	1.0	1.5
DIPR-021-MI	0+05 0	1+60 0	1550.0	Enrocado de Dique Masivo Existente	0.9	II	1.0	1.5
DIPR-021-MI	1+60 0	1+84 0	240.0	Dique Nuevo con Enrocado	0.9	II	1.5	1.5
DIPR-021-MI	1+84 0	2+05 0	210.0	Enrocado de Dique Masivo Existente	0.9	II	1.5	1.5

5.3 Áreas inundables

5.3.1 Mancha de inundación antes del proyecto

En las imágenes de áreas inundadas previas a la implementación del proyecto de la defensa ribereña, en las Figuras 39 y 40 se reflejó en la altura del agua acumulada, observándose mayores niveles en zonas donde esta cubrió carreteras, viviendas o vegetación, lo que indicó la severidad de la inundación. Por otro lado, en las Figuras 43 se mostraron los mapas de velocidades de flujo en donde se evidenciaron en corrientes rápidas y turbulentas, especialmente en ríos desbordados o agua desplazándose por llanuras, lo que generó erosión en márgenes y desplazamiento de suelos, poniendo en riesgo infraestructuras. Además, en la Figura 41 y 42, se evidenció el mapa de sedimentos en donde se mostró en la acumulación de materiales, como lodo, arena o escombros, visibles en los depósitos dejados tras el retroceso del agua o en la formación de bancos de arena y grava en cauces y márgenes del río.

Figura 40

Mapa de calados del modelo base (m²) para TR 100 años, Sector Sechín 17+000 km – 25+000 km



Figura 41

Mapa de calados del modelo base (m²) para TR 100 años, Sector Sechín 25+000 km – 29+731 km



Figura 42

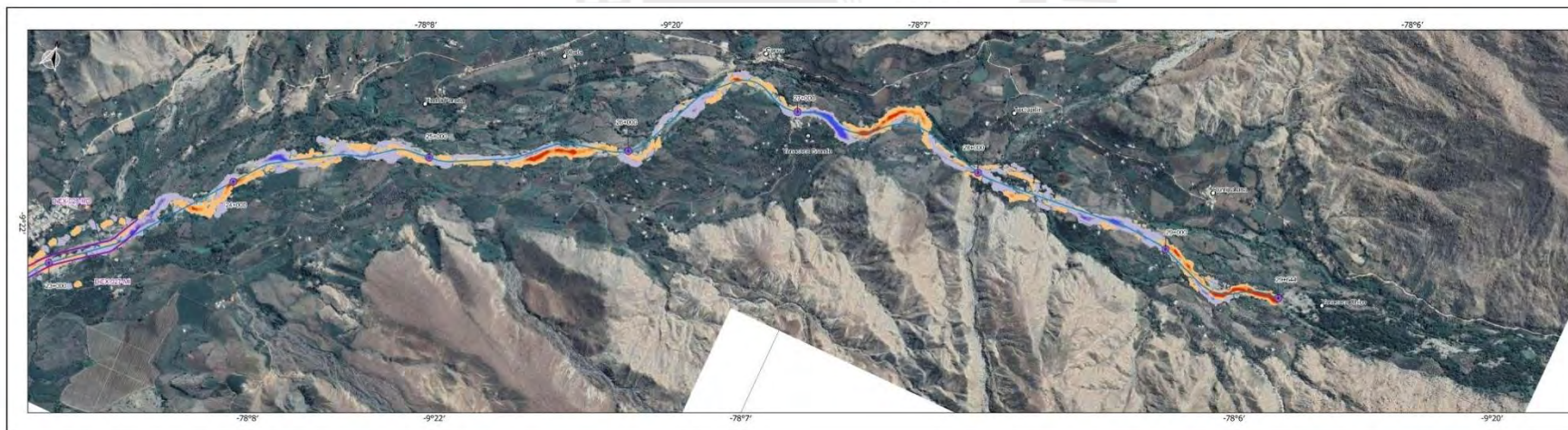
Mapa de sedimentos del modelo base (m²) para TR 100 años, Sector Sechín 00+000 km – 22+000 km





Figura 43

Mapa de sedimentos del modelo base (m²) para TR 100 años, Sector Sechín 22+000 km – 25+000 km



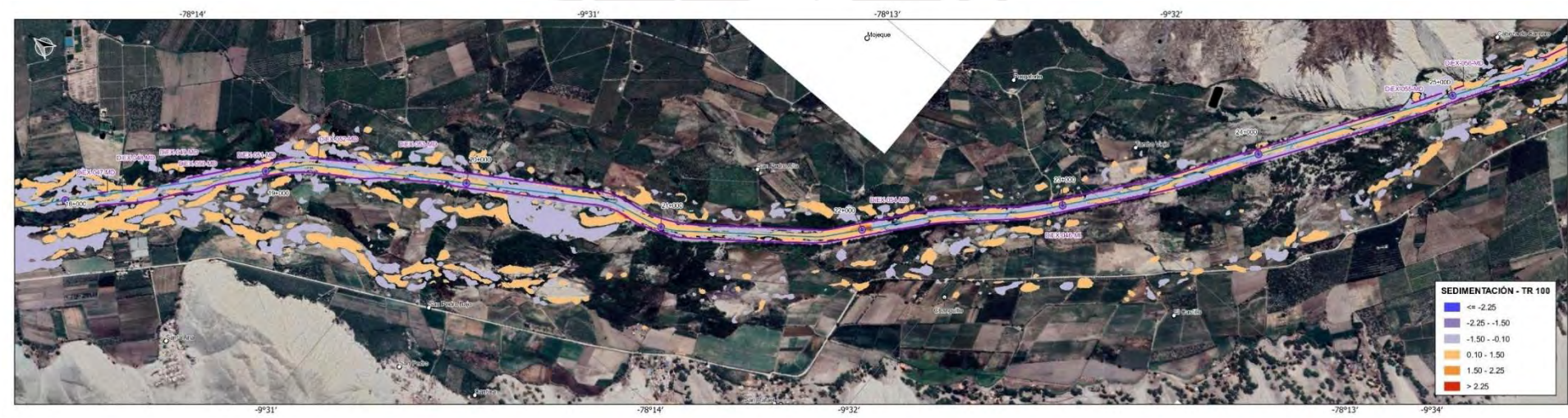
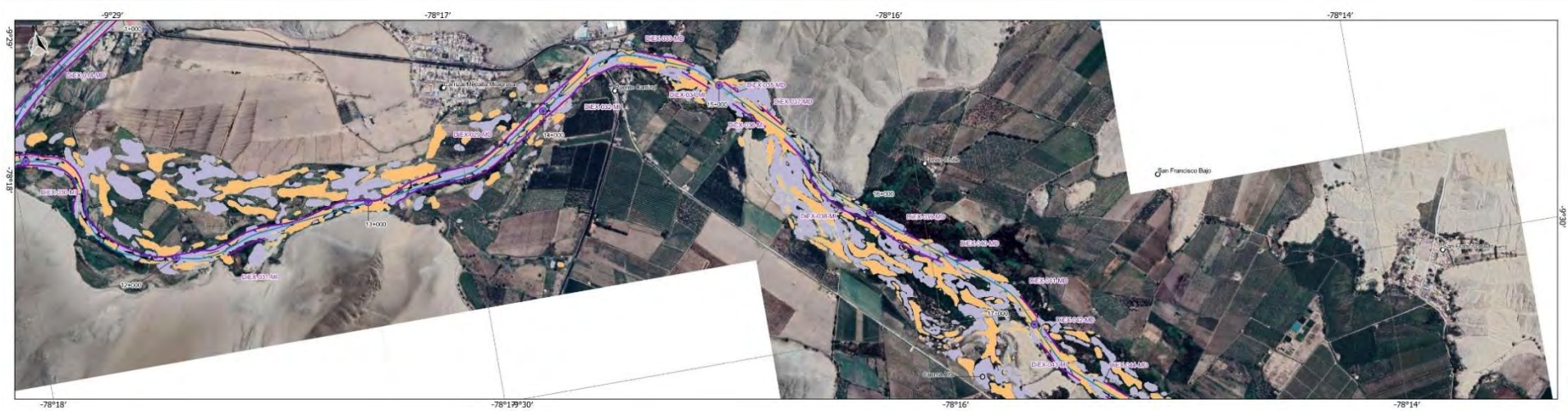
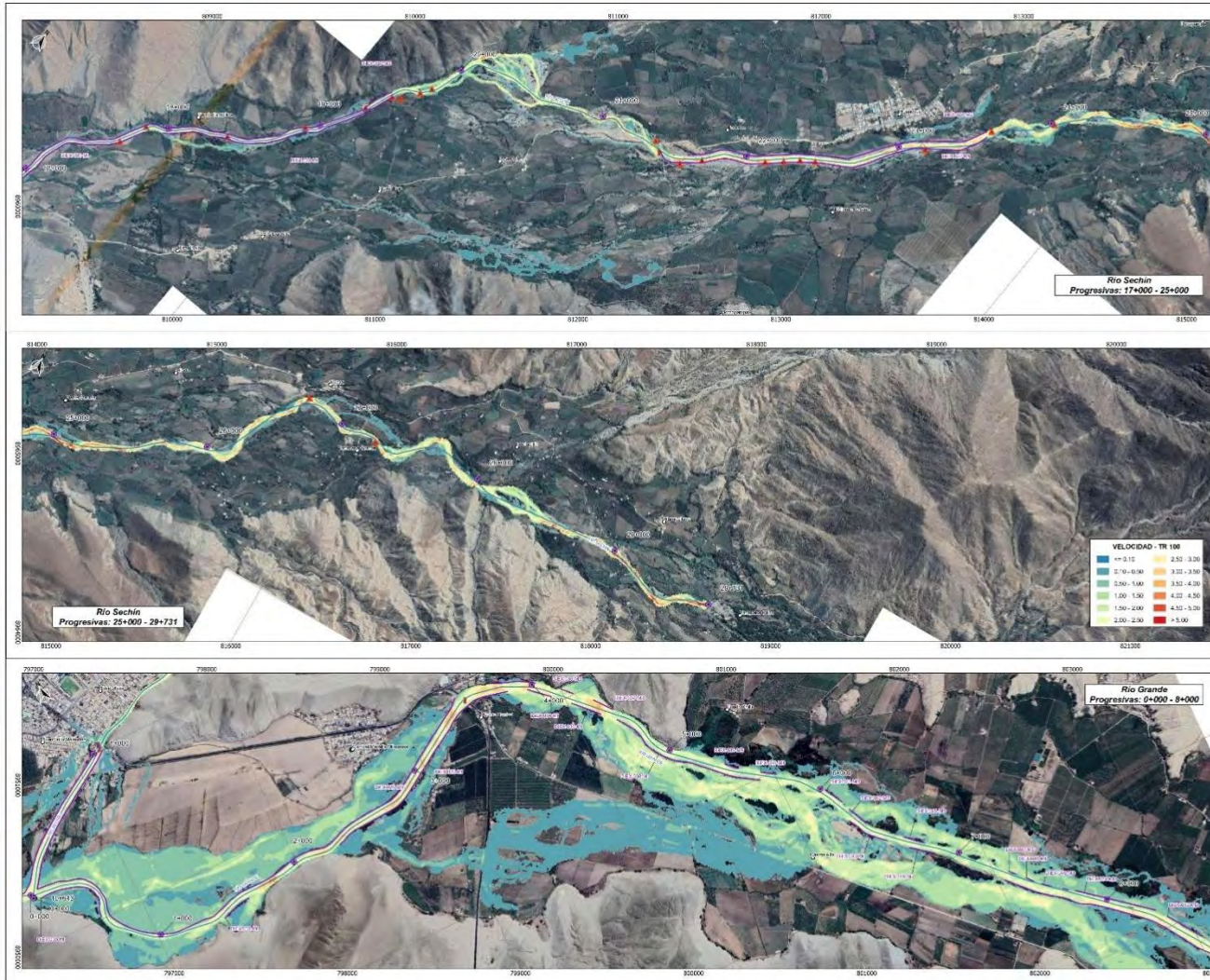


Figura 44

Mapa de velocidad del modelo base (m2) para TR 100 años, Sector Sechín 8+000 km – 17+000 km



5.3.2 Mancha de inundación después de la implementación de la Defensa Ribereña

Después del proyecto, se buscó minimizar el impacto en terrenos privados, garantizando el respeto al ancho mínimo establecido. Además, se incorporaron zonas naturales al cauce, evitando la configuración del río como un canal con diques paralelos. En la parte alta de la cuenca, se redujo el número de diques para optimizar costos, ya que no se identificaron desbordamientos significativos que afectaran unidades productivas. Las zonas inundadas del sector de Sechín (23+000 km – 29+731 km) se documentaron en las Figuras 44,45 y 46.

Figura 45

Mancha de agua después del proyecto del modelo hidráulico TR100, Sector Sechín 23+000 km – 25+000 km

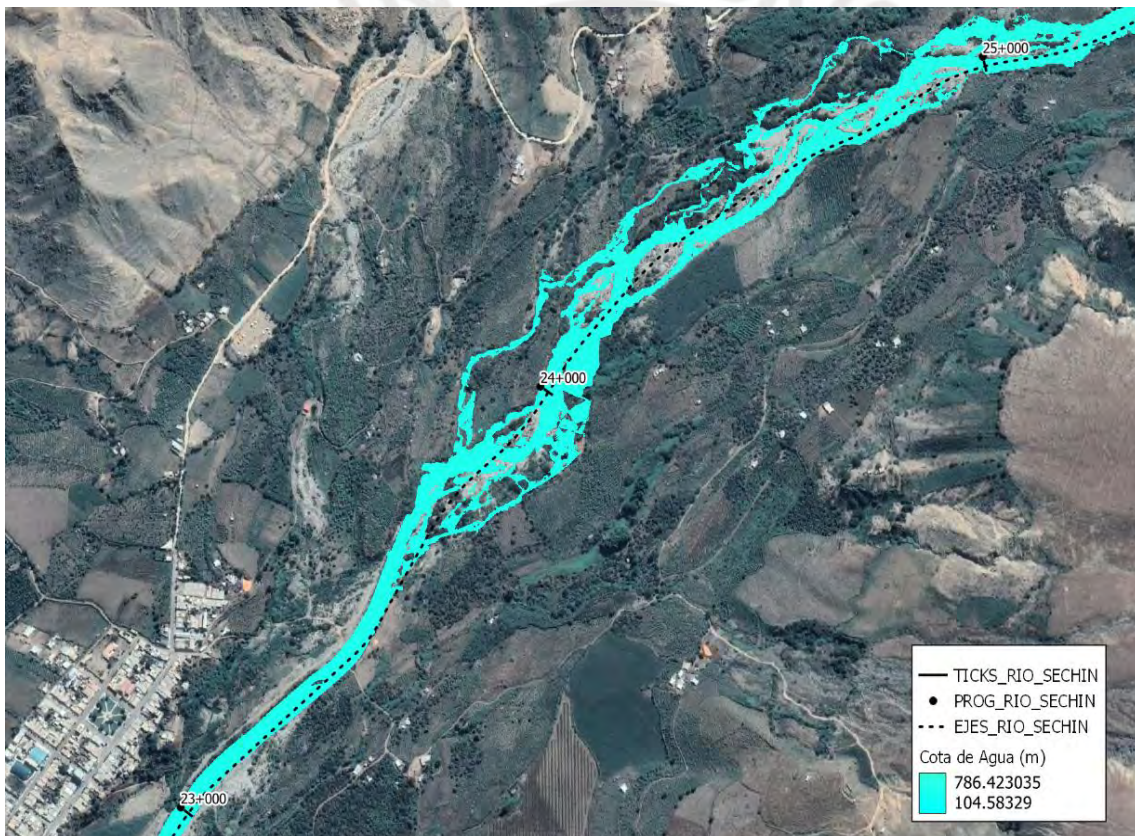


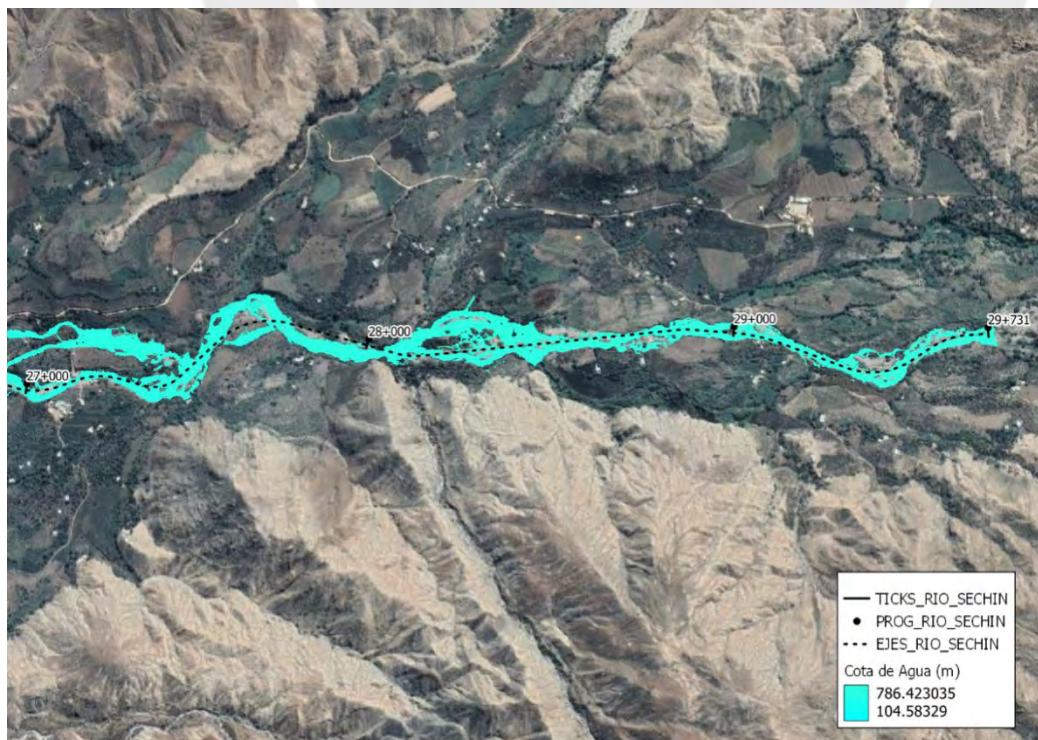
Figura 46

Mancha de agua después del proyecto del modelo hidráulico TR100, Sector Sechín
25+000 km – 27+000 km



Figura 47

Mancha de agua después del proyecto del modelo hidráulico TR100, Sector Sechín
27+000 km – 29+731 km



5.4 Especificaciones técnicas

5.4.1 Especificaciones técnicas para operación y explotación de canteras

5.4.1.1 Obras provisionales

PARTIDA 101.D: Trámite, gestión y obtención de permisos para explotación de canteras

La partida consistió en gestionar y obtener todos los permisos necesarios para la explotación y voladura de rocas en canteras, incluyendo licencias de SUCAMEC para el uso y manejo de explosivos. El subcontratista empleó fuentes de materiales de acuerdo con el expediente técnico, asegurándose de que cumplieran con las certificaciones ambientales y estimando las necesidades de acceso a las canteras. Además, fue responsable de obtener permisos de las autoridades, proponer nuevas canteras si era necesario, y gestionar las licencias para la explotación de canteras. La medición se realizó de forma global (glb).

PARTIDA 103.A: Instalación de campamentos, patio, taller y oficinas

La partida se dedicó a la construcción de las instalaciones provisionales necesarias para alojar a trabajadores, insumos, maquinaria y equipos durante el proyecto. Incluyó la propuesta y aprobación del diseño y ubicación del campamento, siguiendo los requisitos del Plan de Manejo Ambiental. El trabajo comprendió la construcción, operación, mantenimiento y eventual desmontaje de las instalaciones, garantizando su desarmado y transportabilidad, y asegurando que no se afectara el entorno natural o cultural. Se establecieron medidas para el manejo de residuos y el mantenimiento del campamento, con una unidad de medida global (glb) para la medición.

5.4.1.2 Operación y explotación de material

PARTIDA 301.A: Extracción de roca en cantera

El proyecto consistió en el suministro de roca para la escollera de diques mediante perforación y explosivos, conforme a los planos técnicos. La extracción implicó la organización de actividades para obtener roca, empleando explosivos bajo estricta supervisión y normativas de la SUCAMEC. El material removido fue clasificado y almacenado temporalmente, optimizando su uso según granulometría. Las canteras fueron inspeccionadas para asegurar la calidad de las rocas, y el subcontratista gestionó los excedentes de acuerdo con las condiciones del terreno. Se utilizó equipo especializado, y el control de calidad fue garantizado por la supervisión mediante ensayos técnicos y

medición de volúmenes ejecutados. La unidad de medida fue el metro cúbico.

PARTIDA 302.A: Ensayos de roca

Los ensayos se realizaron durante la ejecución de la obra, confirmando el diseño y validando los materiales propuestos. Los principales ensayos fueron el análisis petrográfico, abrasión Los Ángeles, densidad y gravedad específica. Las rocas utilizadas debían cumplir con parámetros de resistencia y durabilidad específicos, como un peso mínimo de 2.5 ton/m³ y una absorción menor al 2%. La unidad de medida fue el global (glb).

PARTIDA 303.A: Selección y acopio de roca

La partida consistió en la selección y acopio de roca en la cantera para la defensa ribereña, ejecutada con una excavadora sobre oruga según un cronograma para evitar retrasos y optimizar costos. Se llevó un control diario del volumen seleccionado para monitorear costos y avance de obra. El proceso fue mecánico, con maquinaria pesada y personal especializado. La supervisión aprobó los trabajos si cumplían los planos y especificaciones, y exigió correcciones cuando hubo deficiencias. El control técnico incluyó la verificación de ensayos, procedimientos y el cumplimiento del programa de trabajo. La unidad de medida fue el metro cúbico (m³).

5.4.1.3 Movimiento de tierras

PARTIDA 410.A: Conformación de DME/DMO

La partida consistió en la descarga, esparcido, compactado y acondicionamiento de material excedente en los Depósitos de Material Excedente (DME), utilizando medios mecánicos para garantizar su estabilidad. El material orgánico fue almacenado temporalmente en los Depósitos de Material Orgánico (DMO) para su posterior uso en la restauración del terreno afectado. Se realizaron levantamientos topográficos antes y después de los trabajos, y se controló la compactación, estabilidad de taludes, y drenaje. La disposición final del material excedente siguió un método gradual y controlado, asegurando pendientes adecuadas y evitando impactos ambientales. La medición se realizó en metros cúbicos (m³), excluyendo el transporte del material.

5.4.1.4 Transporte de materiales

PARTIDA 503.A: Transporte de material granular para D <= 1KM

La partida consistió en la eliminación de material generado por excavaciones y

demoliciones en el área destinada para la construcción, excepto el material aprobado para relleno. El trabajo incluyó la carga mediante cargadores frontales y el transporte con volquetes. Además, la partida 503.B abarcó el carguío y transporte de material excedente en trasdós de dique a distancias menores de 1 km. El material excedente se depositó en botaderos autorizados, con permisos gestionados por el Subcontratista. La unidad de medida utilizada fue el metro cúbico (m³).

PARTIDA 504.A: Transporte de desechos y excedentes a d > 1km

La partida incluyó la eliminación de todo el material generado por las excavaciones y demoliciones en el área de construcción, a excepción de aquel aprobado para ser utilizado en relleno. El proceso consistió en cargar el material con cargadores frontales y transportarlo mediante volquetes. Además, la partida 504.B contempló el transporte de material excedente en el trasdós del dique a distancias mayores de 1 km. El material excedente se depositó en botaderos autorizados, con permisos gestionados por el Subcontratista, y la unidad de medida utilizada fue el metro cúbico (m³).

PARTIDA 505.A: Transporte de material interno para acopio D ≤ 1km

El trabajo incluyó el transporte de materiales desde canteras autorizadas hacia sitios de utilización, como pedraplenes, badenes y enrocados, siguiendo las especificaciones del proyecto. Los vehículos empleados debían cumplir con normas ambientales y de seguridad, evitando contaminación y sobrecarga, además de contar con alarmas acústicas para operaciones. El Supervisor verificó las condiciones del equipo, la limpieza de las vías y la ruta más corta y segura para el transporte. La medición del trabajo se realizó en metros cúbicos-kilómetros (m³-km), calculando la distancia recorrida desde el centro de gravedad del material transportado hasta su ubicación final.

5.4.2 Especificaciones técnicas para construcción de defensas ribereñas

5.4.2.1 Obras provisionales

PARTIDA 102.A: Cartel de identificación de la obra

La partida incluyó la elaboración, traslado e instalación de una gigantografía en los sitios indicados por la Supervisión, así como su retiro una vez concluido los trabajos. El Subcontratista debió proveer e instalar un Letrero de Obra al inicio de los trabajos, con las dimensiones y características establecidas, y desmontarlo antes de la Recepción Total. Cualquier otra cartelera requería autorización de la Supervisión. La medición se realizó por unidad (und).

PARTIDA 103.B: Instalación de facilidades y campamentos

La partida abarcó la construcción y gestión de las instalaciones provisionales necesarias para albergar trabajadores, insumos, maquinaria y equipos durante la construcción de la obra. Incluyó la propuesta y aprobación del diseño y ubicación del campamento por parte del Subcontratista y del Contratista, cumpliendo con los requisitos del Plan de Manejo Ambiental. Este trabajo contempló la provisión de instalaciones adecuadas, mantenimiento, y conservación durante el proyecto, así como el desmontaje y limpieza final del área. Se exigió el uso de materiales desarmables y transportables, la obtención de permisos, y la implementación de sistemas para el manejo de residuos y el control de contaminación. La unidad de medida fue global (glb).

5.4.2.2 Obras preliminares

PARTIDA 201.B: Movilización y desmovilización de equipos y/o maquinaria

La partida abarcó la movilización y desmovilización de maquinaria, equipos, herramientas y vehículos necesarios para la obra. Incluyó el traslado de equipos al sitio de construcción y su retiro al finalizar los trabajos. El Subcontratista debía listar el equipo mínimo esencial para la partida y presentar un calendario detallado de movilización y desmovilización, asegurando que el equipo cumpliera con las especificaciones y estuviera en buen estado. La movilización se realizó mediante camiones de cama baja para equipo pesado y por sus propios medios para el equipo liviano. La medición de la partida se hizo en forma global (glb).

PARTIDA 202.A: Trazo, nivelación y replanteo preliminar

La partida incluyó el trazo, nivelación y replanteo preliminar del eje del dique, con el objetivo de georreferenciar y ajustar el replanteo general de la obra según las condiciones reales del terreno. El subcontratista fue responsable de realizar el replanteo, protegiendo los puntos físicos y estacas instaladas, y de proporcionar personal calificado, equipo y materiales necesarios para el replanteo y registro de datos. El trabajo comenzó con una coordinación con el supervisor sobre puntos de control y referencias. La aceptación de los trabajos se basó en inspección visual, calidad, tolerancias y mediciones de control. La unidad de medida para estos trabajos fue el kilómetro (km).

PARTIDA 203.B: Control topográfico durante la ejecución

La partida incluyó el control topográfico durante la ejecución de los trabajos, que

abarcó la georreferenciación, replanteo y nivelación del eje de la obra definitiva. El responsable realizó el replanteo general, ajustándolo a las condiciones reales del terreno y protegiendo los puntos físicos y estacas instaladas. Para ello, se requirió personal calificado, equipo y materiales adecuados, los cuales debían cumplir con especificaciones y tolerancias definidas. Los puntos de control fueron reubicados si era necesario, y se tomaron secciones transversales y estacas para marcar taludes y referencias. La aceptación de los trabajos se basó en la conformidad con las tolerancias, planes de calidad y procedimientos de medición. Los trabajos se midieron mensualmente.

PARTIDA 204.B: Habilitación de accesos

Se construyeron caminos de acceso a las canteras, botaderos, planta de proceso de agregados y fuentes de agua, con un ancho mínimo de 4 metros y longitud aprobada por la supervisión. El subcontratista presentó opciones para los accesos, considerando factores como longitud, pendiente, calidad de suelos y la no interferencia con terceros. La construcción y mejoramiento de estos accesos se realizaron utilizando maquinaria pesada como tractores y retroexcavadoras, y se transportó material de cantera cuando fue necesario. El ancho de los accesos no superó el límite máximo para evitar daños al suelo y la cobertura vegetal. Los trabajos se midieron por kilómetro.

PARTIDA 206.A: Desvío y manejo de aguas superficiales

Se realizaron trabajos de movimiento de tierras en los cauces de quebradas y ríos para llevar a cabo obras de defensa ribereña, incluyendo el saneamiento y encauzamiento de los cauces. El objetivo era desviar el flujo de agua para permitir el acceso y salida de vehículos y maquinaria, excavando el fondo y las laderas de los cauces con maquinaria adecuada. También se construyeron ataguías para desviar el curso del agua y mantener seco el área de trabajo. El subcontratista debía informar al Supervisor antes de iniciar los trabajos, obtener su autorización para el replanteo topográfico y asegurar que el encauzamiento siguiera los taludes especificados. El material excavado se eliminó con la aprobación del Supervisor, y se restablecieron los requisitos del cauce una vez concluidos los trabajos. Los trabajos se midieron por metro cúbico.

PARTIDA 207.A: Mantenimiento de tránsito y seguridad vial en accesos a la obra y áreas auxiliares

Dentro de la Categoría se incluyó la Subcategoría 207.A, que abarcó el mantenimiento de tránsito y seguridad vial en los accesos a la obra y áreas auxiliares como

canteras, DME/DMO, y fuentes de agua. Se realizaron actividades para conservar y mantener la vialidad durante la ejecución de las obras, asegurando el tránsito vehicular y la protección de los trabajadores. Esto implicó el mantenimiento de desvíos, provisión de facilidades para el acceso a servicios, instalación de dispositivos de control de tránsito y seguridad, control de polvo, y transporte de personal. El subcontratista debía coordinar con el Supervisor, usar materiales y señales conforme a las normas vigentes, y mantener las áreas de circulación. Los trabajos se midieron mensualmente.

5.4.2.3 Operación y explotación de canteras

PARTIDA 304.C: Explotación y preparación de material para afirmado

Consistió en el suministro y procesamiento de material granular proveniente de canteras de río para la construcción de diques y capas de afirmado. La ejecución de estos trabajos requería la aprobación del Supervisor, quien debía evaluar las canteras, los volúmenes a extraer y la superficie a explotar. Se exigió que los procedimientos de explotación, trituración, clasificación y almacenamiento garantizaran un producto uniforme según las especificaciones técnicas. Además, se estipuló la recuperación del terreno mediante cobertura vegetal u otras obras, conservando los suelos orgánicos para la restauración de la vegetación nativa. El material excedente debía reacomodarse en la cantera y el no seleccionado, almacenarse para usos futuros. La medida utilizada para esta partida fue el metro cúbico (m³).

PARTIDA 305.A: Preparación de material propio

Abarcó la preparación de material granular proveniente de excavaciones en el cauce del río, destinado a la conformación de diques según las especificaciones de granulometría y humedad establecidas. Estos trabajos se realizaron fuera del nivel del agua, sobre las playas del lecho, para evitar la turbidez y preservar la morfología del río, utilizando las áreas más anchas de las playas. Además, se implementaron medidas para proteger los márgenes y evitar desbordes en épocas de crecida. Los procedimientos de clasificación, trituración, lavado y almacenamiento debían asegurar un producto uniforme, incluyendo el transporte interno del material en la cantera. La unidad de medida fue el metro cúbico (m³).

5.4.2.4 Movimiento de tierras

PARTIDA 401: Desbroce y limpieza

Abordó el desbroce y limpieza de áreas destinadas a obras permanentes,

provisionales, y zonas de extracción y almacenamiento de materiales. Este trabajo incluyó la remoción de árboles, arbustos y residuos, utilizando herramientas mecánicas y manuales, evitando desbroces innecesarios. Previamente, se realizó una inspección por un especialista para manejar especies de flora protegidas, siguiendo las directrices del Plan de Manejo Ambiental. El objetivo fue dejar el terreno limpio, nivelado y listo para cimentaciones o estructuras temporales, con los materiales extraídos acopiados temporalmente y dispuestos según el tipo de residuo. También se removió suelo orgánico en las zonas requeridas hasta 0.50 m de profundidad, ajustando el proceso según las condiciones in situ. La unidad de medida utilizada fue la hectárea (ha).

PARTIDA 402: Excavación de material

Se encontraron contempladas dentro de esta categoría, las subcategorías que se indican a continuación:

- Subcategoría 402.A: Excavación en material suelto, con equipo.
- Subcategoría 402.B: Excavación masiva en material suelto, con equipo.
- Subcategoría 402.C: Excavación en roca suelta con equipo.
- Subcategoría 402.D: Excavación de roca fija con martillo hidráulico.
- Subcategoría 402.E: Excavación de uña en material con nivel freático.

La partida incluyó la excavación y remoción de materiales en cortes necesarios para la construcción y refuerzo de diques, siguiendo planos y supervisión del proyecto. Se realizó la eliminación de capa vegetal y materiales blandos, así como excavaciones para explanación, drenajes, taludes y zonas de préstamo, garantizando que los materiales extraídos cumplieran con las especificaciones para su reutilización. Se establecieron controles para evitar daños ambientales, como el manejo adecuado del agua superficial y la preservación del ecosistema. Todo el proceso fue supervisado para asegurar alineamiento, perfil y compactación correctos, corrigiendo cualquier desviación a costo del subcontratista. La unidad de medida fue el metro cúbico (m³).

PARTIDA 403: Conformación y compactación de dique

Se abordó la ejecución de rellenos compactados para formar el cuerpo de diques, utilizando materiales extraídos de excavaciones de lechos de ríos y canteras específicas, libres de materia orgánica y elementos perjudiciales, bajo supervisión estricta para asegurar la calidad. El subcontratista pudo modificar las áreas de extracción dentro de límites establecidos para optimizar las operaciones, verificando la granulometría antes del

transporte. La preparación del terreno base incluyó desbroce, limpieza y nivelación, seguido de compactación con rodillos en capas de 0.50 m. Se establecieron controles rigurosos de calidad mediante ensayos de densidad, humedad y permeabilidad, aplicando normativas internacionales. Un laboratorio en sitio verificó las características de los materiales, y el supervisor aseguró la correcta ejecución del proyecto mediante inspecciones, aprobaciones por capa y cumplimiento de las especificaciones técnicas, midiendo el avance en metros cúbicos compactados.

PARTIDA 404: Enrocado y acomodo de roca

Se encontraron contempladas dentro de esta Categoría, las Subcategorías que se indican a continuación:

- Subcategoría 404.B: Enrocado y Acomodo para protección de talud Tipo 2.
- Subcategoría 404.E: Enrocado y Acomodo en uña antisocavante Tipo 2.

Se describió que los enrocados debían componerse de fragmentos de roca de diferentes tamaños, asegurando una adecuada distribución para minimizar los vacíos en la superficie del relleno. El coeficiente de forma de las rocas no podía exceder de 3, y su estructura debía presentar una porosidad adecuada para reducir las subpresiones. Se prefería utilizar bolonería existente o material de enrocado ya existente, reemplazándolo por nuevo solo si era necesario. El material debía ser roca sólida, dura y angular, con características específicas de calidad y peso, y provenir de canteras designadas. El subcontratista debía planificar el sistema de extracción y obtener la aprobación del Supervisor, además de asegurar que la colocación de las rocas se realizó adecuadamente para evitar fracturas y daños al geotextil. La supervisión evaluaría y aprobaría los trabajos basándose en la conformidad con los planos y especificaciones, siendo la unidad de medida establecida en metros cúbicos (m³).

PARTIDA 404: Refine y perfilado de talud

Se incluyó en esta categoría la Subcategoría 406.A, que se enfocó en el refine y perfilado de talud. Esta actividad consistió en uniformizar los taludes de los nuevos y existentes diques, así como de la fundación del dique, abordando irregularidades superficiales. Se utilizaron equipos y herramientas manuales para garantizar la estabilidad de los taludes, evitando caídas de material y deslizamientos que pudieran poner en riesgo a los trabajadores. La ejecución no requirió suministros de materiales, pero sí la utilización de excavadoras y herramientas manuales. Se establecieron procedimientos de seguridad

y se realizó una inspección visual para verificar que el talud quedara uniformemente perfilado y libre de materiales sueltos. La unidad de medida para esta actividad fue el metro cuadrado (m²).

PARTIDA 409.A: Geotextil no tejido clase 1, incluye instalación

Esta partida abarcó la provisión de material y la ejecución de trabajos para la colocación de un manto geotextil no tejido Clase 1. El geotextil Clase 1 se utilizó para la interfase entre el enrocado y los diques, asegurando el libre paso del agua y reteniendo partículas finas. Se especificaron materiales que debían ser de polímeros sintéticos con un mínimo del 95% de poliolefinas o poliéster, cumpliendo con estrictos requisitos de propiedades mecánicas e hidráulicas. Se implementó un riguroso control de calidad, exigiendo que el subcontratista realizó pruebas cada 5,000 metros cuadrados del material entregado y asegurara que el geotextil se instaló sin dañar su integridad. La unidad de medida para todas las aplicaciones de geotextiles fue el metro cuadrado (m²).

PARTIDA 410.A: Conformación de DME/DMO

La subcategoría 410.A, que abarcó la conformación de Depósitos de Material Excedente (DME) y Material Orgánico (DMO), incluyó la descarga, esparcido, compactado y acondicionamiento del material excedente mediante medios mecánicos. Se requirió el almacenamiento temporal de suelo orgánico en DMO para su posterior reutilización en la limpieza y readecuación del terreno. Se establecieron consideraciones generales sobre la ubicación de los DME, asegurando que no se encontraran en áreas inestables o de alta importancia ambiental. El subcontratista debió realizar levantamientos topográficos antes y después de la ejecución, garantizando condiciones adecuadas para la estabilidad de los depósitos. También se implementaron medidas para proteger los DME de la erosión y se dispuso la colocación adecuada de los materiales, asegurando un proceso de compactación efectivo. Finalmente, la unidad de medida para la construcción de los depósitos fue el metro cúbico (m³), excluyendo el transporte del material excedente.

PARTIDA 412.A: Relleno compactado con material para afirmado en corona

El trabajo consistió en la construcción de una capa de afirmado, utilizando material granular seleccionado como superficie de rodadura en la corona del dique, el cual fue aprobado y provenía de canteras o fuentes autorizadas. Se incluyó el suministro, colocación y compactación del material de acuerdo con las especificaciones del proyecto. Para garantizar la calidad, los materiales granulares debieron cumplir requisitos

específicos de granulometría y resistencia, además de ser transportados de manera que se evitó la contaminación. Se llevó a cabo la verificación de la superficie existente antes de la colocación del material, y se realizó un control de calidad a través de ensayos estandarizados durante la construcción. Finalmente, el volumen de afirmado se midió en metros cúbicos (m³) en su posición final, conforme a lo aprobado por el Supervisor.

PARTIDA 413.A: Relleno con material propio

La partida consistió en trasladar materiales excavados de la propia obra para utilizarlos como relleno sobre otra superficie, como la cobertura de la uña de enrocado del dique. El material de relleno se distribuyó uniformemente hasta alcanzar el nivel de rasante indicado en los planos, sin requerir compactación adicional, ya que el peso del equipo utilizado aseguraba la compactación necesaria. Todos los materiales utilizados provinieron de las excavaciones, sin restricciones de granulometría ni calidad. Al finalizar los trabajos, se verificó que la superficie del relleno cumpliera con la uniformidad del terreno establecida en el proyecto. El volumen del relleno se midió en metros cúbicos (m³) en su posición final, conforme a lo aprobado por el Supervisor.

5.4.2.5 Transporte de materiales

PARTIDA 501.A/D: Carguío y acarreo de material propio p/dique y afirmado D≤1km

Las subcategorías 501.A y 501.D se ocuparon de la carga, transporte y descarga de materiales granulares, excedentes, roca y derrumbes, a distancias menores o iguales a 1 km, conforme a las especificaciones del proyecto. El transporte se clasificó según la naturaleza y procedencia de los materiales, incluyendo granulares para mejoramiento de suelos y excedentes de excavaciones. Se utilizaron equipos adecuados para garantizar la seguridad vial y evitar contaminación, y los materiales debieron ser cubiertos para prevenir dispersión. La aceptación del trabajo fue medida por el Supervisor de acuerdo con el material transportado y la ruta utilizada. La unidad de medida fue el metro cúbico-kilómetro (m³-km), que incluyó la carga y descarga, y se aplicaron criterios de cálculo específicos para determinar las distancias y volúmenes correspondientes.

5.5 Presupuesto

El costo total de la Construcción de Defensas Ribereñas ascendió a S/ 7,741,393.12, distribuido en diversas partidas: S/ 545,391.19 para obras provisionales, S/ 1,772,114.84 en obras preliminares, S/ 188,425.31 para la operación y explotación de

material, S/ 2,886,812.48 en movimiento de tierras, S/ 1,998,956.04 en transporte de material y, finalmente, S/ 349,693.26 destinados a los trabajos de cierre.

Tabla 49

Presupuesto de la construcción de defensas ribereñas

CONSTRUCCIÓN DE DEFENSAS RIBEREÑAS	UND	METRADP	COSTO UNITARIO	TOTAL
OBRAS PROVISIONALES				545.391,19
Cartel de identificación de la obra de 3.60m x 2.40m.	und	1,00	1.053,92	1.053,92
Instalación de facilidades y campamentos	glb	1,00	544.337,27	544.337,27
OBRAS PRELIMINARES				1.772.114,84
Movilización y desmovilización de equipos y/o maquinaria	glb	1,00	1.085.616,67	1.085.616,67
Trazo, nivelación y replanteo preliminar	km	2,91	2.751,43	7.992,90
Control topográfico durante la ejecución	mes	3,00	31.658,12	94.974,36
Habilitación de accesos	km	3,18	74.490,63	237.062,56
Desvío y manejo de aguas superficiales	m3	900,00	9,97	8.973,00
Mantenimiento de tránsito y seguridad vial en accesos a la obra y áreas auxiliares (canteras, DME/DMO, fuentes de agua)	mes	3,00	112.498,45	337.495,35
OPERACIÓN Y EXPLOTACION DE MATERIAL				188.425,31
Explotación y preparación de material para afirmado	m3	2.011,54	57,78	116.227,01
Preparación de material propio	m3	3.059,25	23,60	72.198,30
MOVIMIENTO DE TIERRAS				2.886.812,48
Construcción de dique nuevo				732.435,66
Desbroce y limpieza	ha	0,03	6.551,32	171,19
Excavación masiva en material suelto, con equipo	m3	9.503,22	7,42	70.513,87
Excavación en roca suelta con equipo	m3	96,97	17,90	1.735,79
Excavación de roca fija con martillo hidráulico	m3	96,97	132,64	12.862,31
Excavación de uña en material con nivel freático	m3	2.337,07	10,02	23.417,39

Conformación y compactación de dique	m3	1.791,10	14,01	25.093,35
Enrocado y acomodo para protección de talud tipo 2	m3	3.485,33	41,73	145.442,99
Enrocado y acomodo en uña antisocavante tipo 2	m3	2.332,84	18,77	43.787,41
Refine y perfilado de talud	m2	58,29	2,69	156,80
Geotextil no tejido clase 1, incluye instalación	m2	3.237,50	12,30	39.821,25
Conformación de dme/dmo	m3	83.712,43	4,28	358.289,21
Relleno compactado con material para afirmado en corona	m3	220,94	20,56	4.542,57
Relleno con material propio	m3	1.274,43	5,18	6.601,53
Refuerzo en diques existentes				2.154.376,82
Excavación en material suelto, con equipo	m3	52.208,76	10,39	542.448,99
Excavación en roca suelta con equipo	m3	527,36	17,90	9.439,77
Excavación de uña en material con nivel freático	m3	16.890,56	10,02	169.243,38
Conformación y compactación de dique	m3	1.268,15	15,54	19.707,00
Enrocado y acomodo de roca en talud de dique existente	m3	18.355,89	41,73	765.991,25
Enrocado y acomodo de roca en uña de dique existente	m3	16.830,39	18,77	315.906,38
Geotextil no tejido clase 1, incluye instalación	m2	19.486,40	12,30	239.682,72
Relleno compactado con material para afirmado en corona	m3	1.790,60	20,56	36.814,78
Relleno con material propio	m3	10.645,28	5,18	55.142,55
TRANSPORTES DE MATERIAL				1.998.956,04
Carguío y acarreo de material propio p/dique d≤1km	m3- km	6.431,94	9,34	60.074,32
Carguío y transporte de material afirmado d≤1km	m3- km	2.405,06	9,34	22.463,26
Transporte de material afirmado d>1km	m3- km	41.496,50	2,52	104.571,18
Carguío y transporte de material excedente con equipo d≤ 1km	m3- km	73.666,94	9,68	713.095,98

Transporte de material excedente con equipo d> 1km	m3-km	215.546,66	2,64	569.043,18
Carguío y transporte de roca seleccionada d≤1km	m3-km	36.194,36	12,41	449.172,01
Transporte de roca seleccionada d >1km	m3-km	27.580,86	2,92	80.536,11
TRABAJOS DE CIERRE				349.693,26
Medidas de manejo ambiental	glb	1,00	94.539,82	94.539,82
Medidas de manejo de residuos sólidos	glb	1,00	34.944,00	34.944,00
Monitoreo de calidad aire	und	4,00	2.806,40	11.225,60
Monitoreo de calidad ruido	und	4,00	305,76	1.223,04
Monitoreo de calidad agua	und	4,00	3.549,00	14.196,00
Monitoreo de calidad suelo	und	1,00	546,00	546,00
Medidas de contingencias y cierre de obra	glb	1,00	193.018,80	193.018,80
COSTO DIRECTO				7.741.393,12

5.6 Cronograma de obra

El cronograma de obra propuesto contempla una duración aproximadamente de 4 meses, equivalentes a 120 días laborables. Así mismo, se adjunta el ANEXO 01, en la cual se detalla el cronograma específico de cada una de las actividades programadas.

CAPÍTULO VII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El estudio realizado en el río Sechín, que incluyó la excavación de 77 calicatas y la clasificación de materiales, siendo consistente con la investigación de Natarajan y Radhakrishnan (2020), donde se enfatiza la importancia de determinar el tipo de suelo en el análisis hidráulico y el diseño de defensas ribereñas. Además, los niveles freáticos identificados y la clasificación según el SUCS subrayan la necesidad de un enfoque detallado, como sugieren Uday y Jayalumar (2021), para analizar las causas de las inundaciones antes de realizar un diseño efectivo. Por otro lado, el levantamiento topográfico realizado en la cuenca del río Casma, utilizando tecnologías avanzadas como drones y equipos GNSS, se alinea con las recomendaciones de Munna et al., (2021) y Natarajan y Radhakrishnan (2020) sobre la utilización de mapas satelitales georreferenciados y levantamientos topográficos precisos para definir el área de estudio. Esto refuerza la importancia de tener datos topográficos exactos para el diseño de defensas ribereñas, como se destacó en la cuenca de Gołuchów a través de la investigación de Dąbrowska et al., (2018).

Además, la identificación de parámetros clave en la cuenca del río Sechín, como el área y el tiempo de concentración, fue fundamental para entender la escorrentía superficial, similar a lo que se describió en el estudio hidrológico en la cuenca de Narayanapura en la India, donde se midieron profundidades de agua y velocidades guardando semejanza con la investigación de Uday y Jayakumar (2021). También, el modelado hidrológico que se realizó con HEC-HMS también coincidió con la práctica recomendada por Mattos et al. (2022) para simular la escorrentía y analizar eventos de lluvia, lo que valida la metodología empleada en el estudio.

La proyección de dos tipos de defensa ribereña, junto con su diseño y longitud, está en línea con el enfoque sistemático descrito por Marijnissen et al. (2021), que señaló la necesidad de un diseño ordenado basado en un análisis de las condiciones locales. Además, la implementación de enrocado con geosintéticos como medidas específicas para mitigar la socavación es consistente con prácticas estándar en la ingeniería de defensa ribereña, como se evidencia en investigaciones recientes.

No obstante, los cálculos de las defensas ribereñas, con especificaciones sobre socavación y longitudes totales, reforzó la necesidad de seguir normativas establecidas para el diseño, como se discutió en el trabajo de Marijnissen et al. (2021); esto aseguró

que las defensas sean efectivas y seguras ante eventos de inundación.

Por otra parte, las especificaciones técnicas abordadas para la operación de canteras, que incluyen gestión de permisos y sostenibilidad, son congruentes con el enfoque ambiental y normativo mencionado en investigaciones previas. Este énfasis en la sostenibilidad es fundamental en proyectos de infraestructura hidráulica, como se ha resaltado en estudios recientes.

Finalmente, el cronograma de obra y el presupuesto total para la construcción de las defensas ribereñas reflejó una planificación financiera detallada, que es crucial para la ejecución exitosa de proyectos de infraestructura, tal como se sugiere en estudios de sistemas de defensa en los Países Bajos (Klerk et al., 2024). Esto demostró la importancia de un enfoque integral que abarca desde el diseño hasta la ejecución y la gestión de recursos.



CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

- Los resultados de la evaluación de los estudios básicos desarrollados en la cuenca del río Sechín permitieron caracterizar las condiciones topográficas, geotécnicas e hidráulicas del tramo ubicado en el sector del puente Huanchuy. El estudio de mecánica de suelos, mediante la ejecución de 77 calicatas, permitió identificar un subsuelo conformado principalmente por gravas, arenas y bolones, materiales que presentan condiciones favorables para la cimentación de estructuras hidráulicas. Asimismo, el análisis de los parámetros geotécnicos y la presencia de cloruros y sulfatos en niveles moderados permitió establecer criterios adecuados para la selección de materiales resistentes a procesos de corrosión, lo cual constituye un insumo fundamental para el diseño de las defensas ribereñas en la zona de estudio.
- El análisis hidrológico realizado en la cuenca del río Sechín permitió determinar los parámetros hidrológicos fundamentales para el diseño de las obras de protección ribereña. Mediante el modelamiento hidrológico realizado con el software HEC-HMS se estimó la respuesta de la cuenca ante eventos de precipitación extrema, obteniéndose un tiempo de concentración de 5.15 horas y un caudal máximo de 98.1 m³/s para un periodo de retorno de 100 años. Estos resultados permitieron definir los caudales de diseño utilizados en el dimensionamiento hidráulico de las defensas ribereñas, constituyendo parámetros fundamentales para evaluar el comportamiento del flujo y la capacidad hidráulica del cauce frente a eventos hidrológicos extremos.
- La evaluación de diferentes alternativas de protección ribereña se realizó mediante un análisis comparativo utilizando el método de ponderación de criterios, considerando aspectos técnicos, hidráulicos, ambientales y constructivos. Como resultado de este análisis se determinó que la alternativa de defensa ribereña mediante enrocado y con geotextil constituye la solución más adecuada para el tramo del río Sechín en estudio, debido a su mayor estabilidad frente a procesos de erosión y socavación, su adaptabilidad a las condiciones geomorfológicas del cauce y su adecuada relación costo–beneficio frente a otras alternativas de protección.
- El diseño hidráulico y estructural desarrollado para las defensas ribereñas permitió proyectar estructuras de protección mediante enrocado en ambas márgenes del río Sechín. Como resultado del proceso de dimensionamiento se proyectó una longitud

total aproximada de 2,912 m, conformada por el dique DIPR-020-MD en la margen derecha con una longitud de 855 m, y el dique DIPR-021-MI en la margen izquierda con una longitud de 2,057 m. Asimismo, el diseño consideró medidas orientadas a controlar los procesos de socavación, identificándose profundidades máximas de 1.76 m para el dique DIPR-020-MD y 1.12 m para el dique DIPR-021-MI, lo cual permitió establecer criterios adecuados para garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras proyectadas.

- El desarrollo del proyecto permitió establecer las especificaciones técnicas necesarias para la ejecución de las defensas ribereñas, definiéndose los lineamientos constructivos relacionados con la explotación y operación de canteras, el control de calidad de materiales, la colocación del enrocado, el uso de geotextiles y los procedimientos constructivos requeridos para la conformación de los diques. Estas especificaciones contribuyen a garantizar el cumplimiento de los estándares técnicos y ambientales durante la ejecución de la obra, asegurando la estabilidad estructural y la durabilidad de las defensas ribereñas frente a las condiciones hidráulicas del río.
- El análisis del presupuesto y del cronograma de obra permitió determinar que el proyecto presenta viabilidad técnica y económica, estimándose un costo total de S/ 7,741,393.12 y un plazo de ejecución de 120 días calendario. El presupuesto considera las principales partidas de obra, tales como obras provisionales, obras preliminares, operación y explotación de material, movimiento de tierras, transporte de material y trabajos de cierre, lo cual evidencia que la solución propuesta puede ejecutarse dentro de parámetros constructivos convencionales y acorde con las condiciones técnicas del proyecto.
- En consecuencia, a partir de los resultados obtenidos en los estudios básicos, el análisis hidrológico, el modelamiento hidráulico y el diseño estructural desarrollado en la presente investigación, se concluye que el diseño de defensas ribereñas mediante enrocado y geotextil en el tramo del río Sechín correspondiente al sector del puente Huanchuy constituye una solución técnicamente adecuada y económicamente viable, ya que permite reducir el riesgo de inundación y los procesos de erosión en las márgenes del río, contribuyendo a la protección de la infraestructura existente y a la gestión del riesgo frente a eventos hidrológicos extremos.

7.2 Recomendaciones

- Resulta conveniente fortalecer los estudios básicos mediante la incorporación de tecnologías avanzadas de levantamiento topográfico, tales como drones y escaneo láser (LiDAR), con el propósito de obtener información más precisa y actualizada de la topografía y del uso del suelo en la cuenca. De igual manera, es importante implementar programas de monitoreo hidrológico continuo, que permitan registrar niveles de agua, caudales y condiciones del suelo a lo largo del tiempo, lo cual contribuirá a mejorar la confiabilidad de la información utilizada en futuros estudios y proyectos de defensas ribereñas.
- Es pertinente incorporar criterios de sostenibilidad ambiental y diseño ecológico durante el proceso de selección de alternativas de defensa ribereña, con la finalidad de minimizar los impactos ambientales en el cauce del río y favorecer la conservación del ecosistema fluvial, manteniendo al mismo tiempo la estabilidad hidráulica del cauce.
- Conviene complementar el diseño de las defensas ribereñas mediante análisis hidrológicos adicionales que consideren tanto registros históricos de precipitación como escenarios futuros asociados al cambio climático, con el objetivo de verificar que las estructuras proyectadas sean capaces de soportar caudales extremos y distintos escenarios de inundación.
- Se considera importante evaluar la incorporación de materiales innovadores y técnicas constructivas optimizadas que permitan mejorar la durabilidad y eficiencia de las defensas ribereñas. Asimismo, resulta necesario considerar criterios relacionados con la geometría del dique, el perfil de las estructuras y su resistencia frente a procesos de erosión y socavación, con la finalidad de incrementar la vida útil de las obras proyectadas.
- Es recomendable que durante la planificación y ejecución de proyectos similares se incorpore un plan integral de gestión de riesgos, el cual contemple no solo las actividades constructivas de las defensas ribereñas, sino también estrategias de respuesta ante emergencias y programas de capacitación dirigidos a la población, con el propósito de fortalecer la gestión del riesgo de inundaciones en la zona de influencia.
- Finalmente, para futuras investigaciones y proyectos de protección ribereña en la cuenca del río Sechín, resulta importante desarrollar estudios integrales de modelamiento hidrológico e hidráulico, incorporando herramientas de simulación y análisis de escenarios que permitan evaluar el comportamiento del río ante diferentes

condiciones hidrometeorológicas. Este enfoque contribuirá a mejorar la planificación y el diseño de obras de control de inundaciones, promoviendo una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico y de los riesgos asociados a eventos hidrológicos extremos.



Referencias bibliográficas

- Altunin, V. V. (1970). *Hydraulic Design of Stable Channels*. Hydrometeorological Publishing House.
- Al-Ogaili, M., Etemad-Shahidi, A., Cartwright, N., & Sigurdarson, S. (2022). The stability of berm breakwaters, state of art and sensitivity analysis. *Coastal Engineering*, 172, 104059. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104059>
- Alvarez, J., & Quilumbaquin, A. (2021). Análisis de Inundación por Rotura de Presa Utilizando el Modelo HEC-RAS 2D: Caso de Estudio de la Presa Mulacorral, Provincia de Tungurahua, Ecuador. *Revista Politécnica*, 48(1), 51-64. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n1.05>
- Arias, J., Villasís, M., & Guadalupe, M. (2021). Metodología de la investigación: El protocolo de investigación III: la población de estudio. *Revista Alergia México*, 63(2), 201-206.
- Arriola, G., Coronado, O., Sotomayor, G., Villegas, D., Caballero, R., & Olaya, W. (2022). Evaluación del riesgo de inundación empleando un sistema de información geográfica y modelamiento hidráulico aplicados al Río la leche Lambayeque. *Revista Científica Episternia*, 6(1), 60-73. <https://doi.org/10.26495/re.v6i1.2132>
- Bergsma, E., Almar, R., Rolland, A., Binet, R., Brodie, K., & Bak, A. (2021). Coastal morphology from space: A showcase of monitoring the topography-bathymetry continuum. *Remote Sensing of Environment*, 261, 112469. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112469>
- Blench, T. (1957). *Regime Behaviour of Canals and Rivers*. Butterworths Scientific Publications.
- Brunner, G. W. (2023). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual Version 6.x*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers
- California Department of Transportation – Caltrans. (2007). *Highway Design Manual – Hydrology*. Sacramento, California.
- Cely, N., Galvis, A., & Carrillo, G. (2023). Estimación del diámetro del enrocado para protección de la base de muros longitudinales en ríos con lecho granular bien gradado. *Ingeniería y Competitividad*, 25, e-20213114. <https://doi.org/10.25100/iyv.v25i4.13114>

- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*.
- Chorley, R. J., Schumm, S. A., & Sugden, D. E. (1984). *Geomorphology*. London: Methuen.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. McGraw-Hill.
- Chatpattananan, V., Kongsomboon, T., & Ratanavaraha, V. (2021). Designing gabion structures under multi-criteria objectives with goal programming. *Geomate Journal*, 20(82), 121–131. <https://geomatejournal.com/geomate/article/view/167>
- Chikute, G., & Sonar, I. (2021). Gabion Wall: Eco-friendly and Cost-Efficient Retaining Wall. *Advances in Sustainable Construction Materials*, 124, 229–249. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4590-4_22
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., & Barca, P. (2021). Is HEC-RAS 2D accurate enough for storm-event hazard assessment? Lessons learnt from a benchmarking study based on rain-on-grid modelling. *Journal of Hydrology*, 603(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126962>
- Craswell, T., & Akib, S. (2020). Reducing Bridge Pier Scour Using Gabion Mattresses Filled with Recycled and Alternative Materials. *Eng*, 1(2), 188-210. <https://doi.org/10.3390/eng1020013>
- Dąbrowska, J., Dąbek, P., & Lejcuś, I. (2018). A GIS based approach for the mitigation of surface runoff to a shallow lowland reservoir. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(4), 420-430. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.07.002>
- De La Cruz, S., Mendoza, C., Llatas, F., & Garrido, J. (2022). Erosión de estructuras ribereñas y su efecto en inundaciones de zonas agrícolas: Una revisión sistemática. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 6(17), 260-269. <https://doi.org/https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v6i17.166>
- El-Saoud, W., & Othman, A. (2022). An integrated hydrological and hydraulic modelling approach for flash flood hazard assessment in eastern Makkah city, Saudi Arabia. *Journal of King Saud University - Science*, 34(4), 102045. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102045>
- Fang, L., Huang, J., Cai, J., & Nitivattananon, V. (2022). Hybrid approach for flood

- susceptibility assessment in a flood-prone mountainous catchment in China. *Journal of Hydrology*, 621(1), 128091. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128091>
- Fischer, G. (2021). El aumento de las inundaciones generado por el cambio climático afectará nuestros cultivos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 74(3), 9619-9620. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0304-28472021000309619&script=sci_arttext
- Fivash, G., Stüben, D., Bachmann, M., Walles, B., Belzen, J., Diddenen, K., . . . Bouma, T. (2021). Can we enhance ecosystem-based coastal defense by connecting oysters to marsh edges? Analyzing the limits of oyster reef establishment. *Ecological Engineering*, 165, 106221. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106221>
- Google maps. (20 de Febrero de 2022). Google maps. <https://www.google.com/maps/@-6.778728,-79.8365994,15.75z?entry=ttu>
- Guerrero, A., Rodríguez, E., & Leiva, S. (2021). Natural disasters: risk assessment and debris flow of San Idelfonso torrent, Trujillo, La Libertad, Peru. *Arnaldoa*, 28(3), 557-576. <https://doi.org/10.22497/arnaldoa.283.28305>
- Guillén, C., Muciño, A., Guerrero, L., & Cruz, F. (2022). Optimización del proceso de elaboración de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) mediante el control granulométrico de las partículas del Suelo. *Nova scientia*, 13(27), 1-28. <https://doi.org/10.21640/ns.v13i27.2891>
- Hasan, Z., & Toda, Y. (2024). Enhancing Riverbank Protection along the Jamuna River, Bangladesh: Review of Previous Countermeasures and Morphological Assessment through Groyne-Based Solutions Using Numerical Modeling. *Water*, 16(2), 297. <https://doi.org/10.3390/w16020297>
- Hathaway, G. A. (1945). Time of concentration and lag in small drainage basins. *Transactions of the American Geophysical Union*.
- IECS. (2020). Cable concrete. IECUSA, 1-8. https://rhmooreassociates.com/images/pdf/InternationalErosionControl_Brochure18-.pdf
- IECS. (2024). Cable Concrete®, an Articulating Concrete Block (ACB) system. Reinforced Earth, 1-8. <https://www.reinforcedearth.ca/wp->

content/uploads/sites/15/2024/01/cable-concrete.pdf

- Jiménez, A., Berezowsky, M., Hernández, E., & Caballero, C. (2020). Calibración y verificación de fórmulas para calcular el caudal en compuertas radiales con descarga sumergida. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(2), 1-14. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.012>
- Keller, E. A., & Pinter, N. (2002). *Active Tectonics: Earthquakes, Uplift and Landscape*. Prentice Hall.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of concentration of small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10(6), 362.
- Klerk, W., Bergeijk, V., Kanning, W., Wolfert, R., & Kok, M. (2024). Risk-based maintenance and inspection of riverine flood defence systems. *Structural Safety*, 106, 102406. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2023.102406>
- Kumar, A., Kanga, S., Taloor, A., Singh, S., & Đurin, B. (2021). Surface runoff estimation of Sind river basin using integrated SCS-CN and GIS techniques. *HydroResearch*, 4, 61-74. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2021.08.001>
- Lawrence, D. (2020). Uncertainty introduced by flood frequency analysis in projections for changes in flood magnitudes under a future climate in Norway. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 28, 100675. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100675>
- León, F., & Cáceres, J. (2023). Gestión del riesgo de desastre en los espacios urbanos de Jesús Nazareno. *Alfa Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinaria*, 7(20), 354 - 375. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v7i20.221>
- Lischtvan, L., & Lebediev, V. (1959). *River Channel Processes and Scour*. Hydrometeorological Publishing House.
- Loayza-Aguilar, R. (2021). Evidencia de procesos erosivos en la bahía El Ferrol en Perú, para el periodo 1974-2020. *Revista De Ciencias Ambientales*, 55(1), 86-117. <https://doi.org/10.15359/rca.55-1.5>
- Mahdi, H., & Aziz, L. (2023). Influence of Water on Anchor Plate Behavior in Sandy Soil with and Without Improvement. *E3S Web of Conferences*, 427, 1001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202342701001>

- Marijnissen, R., Kok, M., Kroeze, C., & Loon-Steensma, J. (2021). Flood risk reduction by parallel flood defences – Case-study of a coastal multifunctional flood protection zone. *Coastal Engineering*, 167, 103903. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.103903>
- Mattos, T., Oliveira, P., Bruno, L., Carvalho, G., Pereira, R., Crivellaro, L., . . . Roy, T. (2022). Towards reducing flood risk disasters in a tropical urban basin by the development of flood alert web application. *Environmental Modelling & Software*, 151, 105367. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105367>
- Maza, J. A., & García, M. (1996). *Hidráulica de ríos y procesos de socavación*. Instituto de Ingeniería UNAM.
- McCuen, R. H. (2004). *Hydrologic Analysis and Design*. Prentice Hall.
- Mira, E., Rousteau, A., Tournebize, R., Labbouz, L., Robert, M., & Evette, A. (2022). The Conservation and Restoration of Riparian Forests along Caribbean Riverbanks Using Legume Trees. *Sustainability*, 14(7), 3709. <https://doi.org/10.3390/su14073709>
- Mummadisingh, J., & Sengupta, A. (2023). Study of the dynamic performance of a gabion wall. *Structures*, 50, 576-589. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.01.133>
- Munna, G., Alam, M., Uddin, M., Islam, N., Orthee, A., & Hasan, K. (2021). Runoff prediction of Surma basin by curve number (CN) method using ARC-GIS and HEC-RAS. *Environmental and Sustainability Indicators*, 11(1), 100129. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100129>
- Muñoz, C. (2020). *Metodología de la investigación*. OXFORD.
- Narkus, V., Šadzevičius, R., Sankauskienė, T., & Brandyk, A. (2023). The Research On The Technical State Of Retaining Walls Of Hydro Schemes In The Jonava District. *Rural Development: Proceedings of the International Scientific Conference*, 94-99. <https://doi.org/10.15544/RD.2023.013>
- Natarajan, S., & Radhakrishnan, N. (2020). An Integrated Hydrologic and Hydraulic Flood Modeling Study for a Medium-Sized Ungauged Urban Catchment Area: A Case Study of Tiruchirappalli City Using HEC-HMS and HEC-RAS. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 101(2), 381–398. [10.1007/s40030-019-00427-2](https://doi.org/10.1007/s40030-019-00427-2)

- Nayono, S., Prabowo, Y., Wibowo, D., & Purwantoro, D. (2020). Protecting Riverbank's Environment Towards Scour with Combined Reinforcement of Gabion and Tetrapod: a Laboratory Model Study. *Journal of Physics: Conference Series*, 1625(1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012064>
- Ndidi, F., Innocent, E., & Ganiy, I. (2022). Flood risk mapping and urban infrastructural susceptibility assessment using a GIS and analytic hierarchical raster fusion approach in the Ona River Basin, Nigeria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 77, 103097. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103097>
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*.
- Nogueira, R., Neto, T., & Rafael, C. (2022). Contra a correnteza: Rio Madre de Dios em Puerto Maldonado–Peru. *Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasilera de geografia*(56), 1-12. <https://doi.org/10.4000/confins.47128>
- Núñez, L. (2022). Reforestación del bosque seco para la prevención de desbordes fluviales en el Perú: el caso del distrito de Íllimo, provincia y región Lambayeque (2018-2019). *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*(9), 108-123. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202201.005>
- Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J., & Romero, H. (2018). Metodología de la investigación. Cuantitativa – Cualitativa y redacción de la tesis (5.ª ed.). Ediciones de la U. http://www.biblioteca.cij.gob.mx/Archivos/Materiales_de_consulta/Drogas_de_Abuso/Articulos/MetodologiaInvestigacionNaupas.pdf
- Oberhagemann, K., Haque, A., & Thompson, A. (2020). A Century of Riverbank Protection and River Training in Bangladesh. *Water*, 12(11), 3018. <https://doi.org/10.3390/w12113018>
- Osei, B., Ahenkorah, I., Ewusi, A., & Fiadonu, E. (2021). Assessment of flood prone zones in the Tarkwa mining area of Ghana using a GIS-based approach. *Environmental Challenges*, 3, 100028. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100028>

- Pettis, K. (1964). Stable Channel Design for Alluvial Streams. Hydraulic Engineering Studies.
- Polomčić, D., Bajić, D., Hajdin, B., & Pamučar, D. (2022). Numerical Modeling and Simulation of the Effectiveness of Groundwater Source Protection Management Plans: Riverbank Filtration Case Study in Serbia. *Water*, 14(13), 1993. <https://doi.org/10.3390/w14131993>
- Rachelly, C., Friedl, F., Boes, R., & Weitbrecht, V. (2021). Morphological Response of Channelized, Sinuous Gravel-Bed Rivers to Sediment Replenishment. *Water Resources Research*, 57(6), e2020WR029178. <https://doi.org/10.1029/2020WR029178>
- Richardson, E., & Davis, S. (2001). Evaluating Scour at Bridges. Federal Highway Administration
- Rimoldi, P., Shamrock, J., Kawalec, J., & Touze, N. (2021). Sustainable Use of Geosynthetics in Dykes. *Sustainability*, 13(8), 4445. <https://doi.org/10.3390/su13084445>
- Rivera-Trejo, F., & Hernández-Cruz, A. (2020). Protección marginal con espigones, simulación numérica 1D / Riverbank protection with groynes, numerical simulation 1D *Tecnología Y Ciencias Del Agua*. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 11(1), 342-374. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-01-09>
- Rodas, M., Timbe, L., & Campozano, L. (2023). Sensibilidad del coeficiente de Manning en la estimación de los niveles de crecida para el mapeo de inundaciones en un río de la región interandina de Ecuador. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 32(1), 35-49. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v32n1.94764>
- RSD. (7 de diciembre de 2023). Entregan terreno para culminación del puente Huanchuy en Buenavista Alta. RSD Noticias: <https://radiorsd.pe/noticias/entregan-terreno-para-culminacion-del-puente-huanchay-en-buenavista-alta>
- Sandoval, D., & Molina, A. (2024). Guía práctica para los protocolos de trabajos en altura para muros de retención en gaviones y suelo reforzado con fachada en gavión. *LATAM Revista Latinoamericana De Ciencias Sociales Y Humanidades*, 5(2), 625 – 633. <https://doi.org/10.56712/latam.v5i2.1904>
- Shin, E., Lee, S., Lee, J., & Song, C. (2022). Effectiveness of an adaptive flood

- management strategy using riparian risk assessment and a tolerability criterion. *Journal of Flood Risk Management*, 15(1), e12756. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12756>
- Sistema de información para la gestión del riesgo de desastres. (10 de noviembre de 2022). Reporte de Camas (Puntos Críticos Por Inundación). SIGRID: <https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/ReporteTerritorial/>
- Simons, D. B., & Henderson, F. M. (1961). Stability of Alluvial Channels. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*.
- Šoltész, A., Zeleňáková, M., Čubanová, L., Šugareková, M., & Abd-Elhamid, H. (2021). Environmental Impact Assessment and Hydraulic Modelling of Different Flood Protection Measures. *Water*, 13(6), 786. <https://doi.org/10.3390/w13060786>
- Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area–altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63(11), 1117–1142.
- Sugianto, S., Deli, A., Miswar, E., Rusdi, M., & Irham, M. (2022). The Effect of Land Use and Land Cover Changes on Flood Occurrence in Teunom Watershed, Aceh Jaya. *Land*, 11(8), 1271. <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2016). An automated technique for generating georectified mosaics from UAV imagery. *Remote Sensing*.
- Uday, A., & Jayakumar, K. (2021). Modelling of environmental flow requirements using hydraulic and habitation models. *Ecological Indicators*, 121, 107046. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107046>
- USACE (2016). HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers
- Van-Wesenbeeck, B., Griffin, J., Smith, C., Valdez, S., Van-Koningsveld, M., Gedan, K., . . . Silliman, B. (2024). Nature-Based Coastal Defenses: Can Biodiversity Help? *Encyclopedia of Biodiversity (Third Edition)*, 3, 808-818. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822562-2.00006-2>
- Verma, G., & Kumar, B. (2021). Statistical Analysis of Factors Influencing the Liquid and Plastic Limits of Fine-Grained Soil Mixtures. *Advances in Sustainable Construction Materials*, 124, 331–339. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4590-4_31

- Wang, B., Smith, L., Yang, X., Pavelsky, T., Altenau, E., Gleason, C., . . . Bates, P. (2022). Remote sensing of broad-scale controls on large river anabranching. *Remote Sensing of Environment*, 281, 113243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113243>
- Wang, L., Cui, S., Tang, J., Fang, L., Fang, X., Shrestha, S., . . . Nitivattananon, V. (2023). Riverine flood risk assessment with a combined model chain in southeastern China. *Ecological Indicators*, 154, 110686. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110686>
- Weather Spark. (12 de enero de 2023). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Casma. Cedar Lake Ventures: <https://es.weatherspark.com/y/19905/Clima-promedio-en-Casma-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Temperature>
- William, J., James, E., Zaini, Z., & Khan, M. (2022). Petrography of The Main Range Granite Characterization in Titiwangsa Rest Stop, Perak, Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1102(1), 12021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1102/1/012021>
- Xu, C., Fu, H., Yang, J., & Wang, L. (2022). Assessment of the Relationship between Land Use and Flood Risk Based on a Coupled Hydrological–Hydraulic Model: A Case Study of Zhaojue River Basin in Southwestern China. *Land*, 11(8), 1182. <https://doi.org/10.3390/land11081182>
- Zelst, V., Dijkstra, J., Wesenbeeck, B., Eilander, D., Morris, E., Winsemius, H., . . . Vries, M. (2021). Cutting the costs of coastal protection by integrating vegetation in flood defences. *Nature communications*, 12(1), 6533. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-26887-4>

7.3 Anexo

ANEXO 01. CRONOGRAMA DE OBRA

ANEXO 02. RESUMEN PRESUPUESTO – DISEÑO DE UNA DEFENSA RIBEREÑA PARA EL TRAMO DEL PUENTE HUANCHUY DEL RIO SECHIN

ANEXO 03. DETALLE CONSTRUCTIVO DEL DIQUE EXISTENTE

ANEXO 04. DETALLE CONSTRUCTIVO DEL DIQUE NUEVO

ANEXO 05. PLANTA GENERAL

ANEXO 06. PLANTA GENERAL DIQUE 20 Y 21

ANEXO 07. DIQUE 20 SECCION TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL

ANEXO 08. DIQUE 21 SECCION TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL

ANEXO 09. COMUNICACIÓN DE SOLICITUD A AUTORIZAR EL USO DE LA INFORMACION DEL PROYECTO

ANEXO 10. CARTA DE SOLICITUD DE USO DE INFORMACION DEL PROYECTO CO-PE-1PE325-GP-TC-2290

ANEXO 11. CALCULOS HIDRAULICOS, SOCAVACION Y ROCA

