



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Diseño hidráulico de diques con protección de
enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha,
Ica, Perú**

MONOGRAFÍA TÉCNICA

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Gonzalo GUERRERO AVILÉS

Lima, Perú

2022



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Guerrero, G. (2022). *Diseño hidráulico de diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú*. [Monografía técnica de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Gonzalo Guerrero Avilés
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72194008
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5550-4746
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	
Tipo de documento	
Número de documento de identidad	
URL de ORCID	
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Eusebio Melchor Vega Bueza
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08566064
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Miguel Ernesto Arámbulo Manrique
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07418845
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Beatriz Luisa Salvador Gutiérrez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10054063
Miembro del jurado 3	
Nombres y apellidos	
Tipo de documento	
Número de documento de identidad	

Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.2. Recursos Hídricos
Grupo de investigación	
Agencia de financiamiento	Propia
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ica Provincia: Chincha Distrito: Chincha Baja Latitud: -13°31'37" Longitud: 76°11'20"
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022
URL de disciplinas OCDE	Oceanografía, Hidrología, Recursos Hídricos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
(Universidad del PERÚ, Decana de América)

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

XIII CAP DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA DE FLUIDOS

ACTA DE SUSTENTACIÓN VIRTUAL DE LA MONOGRAFÍA TÉCNICA PARA OPTAR EL
TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS, MODALIDAD DE
TITULACIÓN M-3 - POR SUFICIENCIA PROFESIONAL

Siendo las 11:00 a.m. del día sábado 8 de octubre de 2022, en la Sala de Sesión Virtual de la Facultad de Ciencias Físicas, bajo la presidencia del Dr. Ing. EUSEBIO MELCHOR VEGA BUEZA y con la asistencia de los miembros Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE y la Mg. Ing. BEATRIZ LUISA SALVADOR GUTIÉRREZ, se dio inicio a la Sesión Pública Virtual de Sustentación de la Monografía Técnica para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la Modalidad de Titulación M-3 Por Suficiencia Profesional, del Bachiller:

GONZALO GUERRERO AVILÉS

El Presidente del Jurado Examinador dio lectura del Resumen del Expediente, e invitó al Bachiller GONZALO GUERRERO AVILÉS, a realizar la Exposición del trabajo de la Monografía Técnica titulada "DISEÑO HIDRÁULICO DE DIQUES CON PROTECCIÓN DE ENROCADO EN EL RÍO MATAGENTE, PROVINCIA DE CHINCHA, ICA, PERÚ"

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado Examinador, el Presidente invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la sala de sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado. Se procedió a promediar la nota final del curso de actualización y la nota de la sustentación para obtener la calificación final.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la sala de sesión para dar lectura a la calificación final obtenida por el Bachiller, la misma que fue:

DIECISEIS (16)

El Presidente del Jurado Dr. Ing. EUSEBIO MELCHOR VEGA BUEZA, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller GONZALO GUERRERO AVILÉS Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 12:20 horas, del mismo día, se levantó la sesión.

Dr. Ing. EUSEBIO MELCHOR VEGA BUEZA
PRESIDENTE DEL JURADO

Ing. MIGUEL ERNESTO ARÁMBULO MANRIQUE
MIEMBRO DEL JURADO



Firmado digitalmente por SALVADOR
GUTIÉRREZ Beatriz Luisa FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 23.10.2022 00:04:59 -05:00

Mg. Ing. BEATRIZ LUISA SALVADOR GUTIÉRREZ
MIEMBRO DEL JURADO



Firmado digitalmente por LOZANO
BARTRA Whualkuer Enrique FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 05.11.2022 08:16:59 -05:00

DR. WHUALKUER ENRIQUE LOZANO BARTRA
VICEDECANO ACADÉMICO FCF

Datos de la plataforma virtual institucional del acto de sustentación:

<https://us06web.zoom.us/j/84965379475?pwd=RDRDMWNVczdJVjhWbEFMMTI2cDQyZz09>

ID: ID de reunión: 849 6537 9475

Código de acceso: 797277

Grabación archivada en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1t2bwPPCeJCE6e8HQYzOjp8PzPhtdeH5q/view?usp=sharing>

Anexo 1

Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)
"DISEÑO HIDRÁULICO DE DIQUES CON PROTECCIÓN DE ENROCADO EN EL RÍO MATAGENTE, PROVINCIA DE CHINCHA, ICA, PERÚ"
7. Autor del documento (2)
GONZALO GUERRERO AVILÉS
8. Fecha de recepción del documento 26/09/22
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 29/09/22
10. Software utilizado
 - Turnitin (X)
 - Ithenticate
 - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Incluye Bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes³
2%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas⁴
14. Observaciones
Ninguna
15. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
 - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
 - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 8 /11 /22



Firmado digitalmente por SARANGO
JULCA Douglas Donal FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 09.11.2022 08:24:41 -05:00

DR. ING. Douglas Sarango Julca
DIRECTOR (e) DE LA EPIMF

-
- 1 Otro (especificar) Monografía Técnica Modalidad de Titulación M-3
Suficiencia Profesional
 - 2 Apellidos y Nombres completos
 - 3 En letras y números
 - 4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje

*A mi amada familia,
especialmente a mi mamá Gaby
a mi tío Pepe q.e.p.d. y a Joha.*

Resumen

El presente estudio plantea un procedimiento de cálculo, entre diversas metodologías, para la obtención del diseño hidráulico de diques con protección de enrocado, iniciando por una recopilación de fórmulas o métodos provistos por la literatura de diseño para obras de protección contra la erosión e inundación fluvial producidas por máximas avenidas. Debido a la tipología de obra elegida y el factor erosión existente, se presentan al menos tres metodologías para el cálculo de la socavación y el diámetro medio del enrocado en el que se realiza un análisis conciso de las fórmulas para la adopción final del parámetro. El caso de estudio es el río Matagente, ubicado en el valle de Chíncha, donde se hizo uso del simulador de flujos de agua en canales abiertos BASEMENT-ETH para su caracterización hidráulica, refiriéndose al cálculo máximo de manchas de inundación, tirantes y velocidades. La ubicación de las obras en planta tomó en cuenta diversos criterios como la sección estable del río, la estricta la faja marginal, minimización de movimientos tierra o afectación predial, etc. Finalmente, se procedió con los cálculos tabulares por tramos de cada parámetro en base a los resultados del modelo hidráulico obteniendo un resumen de los elementos diseño de una sección típica para cada tramo de dique propuesto.

Palabras clave: defensas ribereñas, diseño hidráulico de diques, hidráulica fluvial, criterios de diseño, modelamiento numérico.

Abstract

The present study proposes a calculation procedure, among various methodologies, to obtain the hydraulic design of dikes with rock protection starting with a compilation of formulas or methods provided by the design literature for protection works against erosion and fluvial flooding produced by maximum avenues. Due to the type of work chosen and the existing erosion factor, at least three methodologies are presented for the calculation of the undermining and the average diameter of the rocking in which a concise analysis of the formulas for the final adoption of the parameter is carried out. The case study is the Matagente River, located in the Chincha Valley, where the BASEMENT-ETH open channel water flow simulator was used for its hydraulic characterization, referring to the maximum calculation of flooding, depth and velocities. Then, the location of the works in plan took into account various criteria such as the stable section of the river, the strict marginal belt, minimization of earth movements or property affectation, among others. Finally, we proceeded with the tabular calculations by sections of each parameter based on the results of the hydraulic model obtaining a summary of the design elements of a typical section for each proposed dam section.

Keywords: flood control structures, hydraulic design of dikes, fluvial hydraulics, design criteria, numerical modeling.

Contenido

Capítulo I. Generalidades	1
1.1 Introducción	1
1.2 Importancia del Tema	1
1.3 Justificación del Trabajo.....	4
1.4 Identificación del Problema	4
1.5 Propuesta de Solución	5
1.6 Objetivos.....	6
1.6.1 Objetivo General	6
1.6.2 Objetivos Específicos.....	6
1.7 Alcances	7
1.8 Limitaciones.....	8
Capítulo II. Marco Teórico	9
2.1 Antecedentes.....	9
2.2 Bases Teóricas Fundamentales.....	12
2.2.1 Hidráulica Fluvial.....	12
2.2.2 Socavación	16
2.3 Bases Teóricas de Ingeniería.....	19
2.3.1 Estructuras de Protección contra Inundaciones.....	19
2.3.2 Criterios de Diseño Hidráulico de Diques	24
2.4 Glosario	32
Capítulo III. Proceso Metodológico	33
3.1 Ubicación del Proyecto	33
3.2 Descripción de los Datos de Trabajo.....	34
3.2.1 Topografía.....	34
3.2.2 Hidrología.....	35
3.2.3 Granulometría	36
3.3 Instrumentos de Trabajo	37

3.3.1	Modelo Hidráulico: BASEMENT-ETH.....	37
3.3.2	Sistema de Información Geográfica: Quantum GIS.....	41
3.3.3	Normatividades.....	41
3.4	Cálculos fundamentales.....	43
3.4.1	Coefficientes de Fricción del Cauce y Llanuras de Inundación.....	43
3.4.2	Modelo Numérico del Escenario en Condición Actual.....	46
3.4.3	Estimación del Ancho Estable.....	46
3.4.4	Escenario con Diques Proyectados.....	48
3.4.5	Proceso de Cálculo de Socavación General.....	51
Capítulo IV. Resultados y Discusión.....		52
4.1	Resultados de Borde Libre.....	52
4.2	Proyecciones de Cresta y Altura.....	52
4.3	Resultados de Socavación.....	58
4.4	Resultados del Diámetro de Enrocado.....	58
4.5	Resultados Elementos Complementarios.....	61
Conclusiones.....		62
Recomendaciones.....		64
Referencias.....		65

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Coeficiente K1 de los materiales de fondo (lecho) y orilla (bancos o márgenes)</i>	15
Tabla 2 <i>Coeficiente K sobre el tipo de material</i>	16
Tabla 3 <i>Coeficientes en función al caudal de diseño.....</i>	25
Tabla 4 <i>Borde mínimo requerido según caudal.....</i>	26
Tabla 5 <i>Coeficientes de corrección en función a la condición del cauce</i>	28
Tabla 6 <i>Condiciones de roca y canal para los coeficientes de corrección</i>	30
Tabla 7 <i>Ancho de cresta del dique.....</i>	30
Tabla 8 <i>Datos tabulares de los ensayos de granulometría extendida.....</i>	36
Tabla 9 <i>Método de Cowan para el cálculo de coeficiente de Manning del lecho del río</i>	
<i>Matagente.....</i>	43
Tabla 10 <i>Factores de fricción adoptados para cada uso de suelo.....</i>	45
Tabla 11 <i>Resultado de ancho estable según metodología.....</i>	47
Tabla 12 <i>Ubicación y longitud de los diques de protección</i>	49
Tabla 13 <i>Resultado de borde libre para cada tramo según velocidad promedio.....</i>	52
Tabla 14 <i>Resumen de profundidad de uña antisocavante.....</i>	58
Tabla 15 <i>Cálculos del diámetro de roca – Método Isbash.....</i>	59
Tabla 16 <i>Cálculos del diámetro de roca – Método Maynard.....</i>	59
Tabla 17 <i>Cálculos del diámetro de roca – Método CALTRANS.....</i>	59
Tabla 18 <i>Cálculos del diámetro de roca – Método USACE</i>	60
Tabla 19 <i>Resumen de resultados de diámetros de roca</i>	61
Tabla 20 <i>Resultado de cálculo de elementos complementarios de los diques</i>	61
Tabla 21 <i>Sección tipo y resumen de parámetros de diseño</i>	63

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Población propensa a daños por inundaciones</i>	2
Figura 2	<i>Población afectada y damnificada: 2003-2019</i>	3
Figura 3	<i>Desborde del río Matagente - Sector Cañapay</i>	5
Figura 4	<i>Factores de ajuste para el cómputo del valor de Manning según Cowan</i>	13
Figura 5	<i>Esquema de cálculo de socavación general</i>	18
Figura 6	<i>Conformación de un terraplén con protección de enrocado</i>	20
Figura 7	<i>Pedraplén existente en el río Cañete, en el departamento de Lima</i>	21
Figura 8	<i>Muro de protección a base de gaviones para el control de erosión</i>	22
Figura 9	<i>Malla de alambros deterioradas por la corrosión</i>	22
Figura 10	<i>Muro de concreto emplazado en el río Rímac</i>	23
Figura 11	<i>Partes de un dique con protección de enrocado</i>	24
Figura 12	<i>Esquema de uña antisocavante</i>	31
Figura 13	<i>Diagrama de flujo para el diseño hidráulico de la sección típica del dique</i>	33
Figura 14	<i>Ubicación política del caso de aplicación: Río Matagente - Chincha</i>	34
Figura 15	<i>Imagen topográfica del cauce con fina resolución para el modelo hidráulico</i>	35
Figura 16	<i>Hidrograma de caudales aguas arriba del Partidor Conta – TR 100 años</i>	36
Figura 17	<i>Curvas granulométricas de los ensayos – río Matagente</i>	37
Figura 18	<i>Interfaz del software BASEMENT</i>	38
Figura 19	<i>Interfaz gráfica de usuario de QGIS</i>	41
Figura 20	<i>Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje</i>	42
Figura 21	<i>Guía de Protección frente a inundaciones</i>	42
Figura 22	<i>Lecho característico del río Matagente</i>	43
Figura 23	<i>Coeficientes de rugosidad recomendados según tipo de superficie</i>	44
Figura 24	<i>Mapa de usos del suelo y rugosidad de Manning</i>	45
Figura 25	<i>Mancha de inundación máxima en el río Matagente – Escenario sin proyecto</i>	46
Figura 26	<i>Mancha de inundación máxima en el río Matagente – Escenario con proyecto</i> ... 49	
Figura 27	<i>Perfil longitudinal de tirantes máximos</i>	50

Figura 28 <i>Perfil longitudinal de velocidades máximas</i>	50
Figura 29 <i>Calculadora ráster del QGIS con la fórmula de socavación general de Lacey</i>	51
Figura 30 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-1 (1/2)</i>	53
Figura 31 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-1 (2/2)</i>	53
Figura 32 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-2 (1/2)</i>	53
Figura 33 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-2 (2/2)</i>	54
Figura 34 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-3 (1/2)</i>	54
Figura 35 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-3 (2/2)</i>	54
Figura 36 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-4</i>	55
Figura 37 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-5</i>	55
Figura 38 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-1 (1/2)</i>	55
Figura 39 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-1 (2/2)</i>	56
Figura 40 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-2</i>	56
Figura 41 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-3</i>	56
Figura 42 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-4 (1/2)</i>	57
Figura 43 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-4 (2/2)</i>	57
Figura 44 <i>Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-5</i>	57

Capítulo I. Generalidades

1.1 Introducción

Los diques son estructuras conformadas generalmente con material del mismo río emplazado en forma trapezoidal, también llamado terraplén, y protegidos con roca pesada en el talud cuya cara está en contacto con el agua del río que puede desbordar. El correcto diseño de diques con protección de enrocado toma relevancia al ser parte de la necesidad de un proyecto involucrado en instaurar soluciones de prevención para el control de inundación en las márgenes de los ríos. La altura del dique representa uno de los cálculos más importantes en su diseño porque influye directamente en el costo económico de la obra y existen numerosas metodologías para su determinación; entre las más usadas y conservadoras, como por ejemplo la formulación analítica de Manning-Strickler, sin embargo, hoy en día gracias al avance y desarrollo tecnológico de los métodos numéricos, se hace uso de modelos hidráulicos bidimensionales para la obtención de los parámetros hidráulicos de inundación, herramienta que se utilizará en el presente trabajo para establecer un plan de encauzamiento y los criterios de diseño para el cálculo del borde libre, la cota de cresta, el diámetro medio de roca, profundidad de uña antisocavante y otros aspectos complementarios para el diseño hidráulico del dique con protección de enrocado en el río Matagente del valle de Chíncha, como caso de aplicación.

1.2 Importancia del Tema

Las obras de protección contra inundaciones fluviales toman mayor importancia cuando la causa se relaciona con la problemática y no solo es de índole nacional sino también a nivel mundial y/o global. Los desbordes ocasionados por avenidas máximas afectan recurrentemente con mayor impacto a países subdesarrollados dado que, las estructuras como puentes, obras de drenaje o protección antisocavante, son habitualmente menos sofisticados debido a la metodología de su diseño.

El riesgo de afectación no discrimina entre países de primer y tercer mundo, sin embargo, actualmente el balance no es equitativo: el Banco Mundial estima que el 89% de

las personas expuestas a este riesgo pertenecen a los países de poco desarrollo. En lo siguiente, se presentan datos generales sobre ambos aspectos que exigen la necesidad del empleo de obras de protección para la defensa contra estos desastres naturales que pueden afectar a millones de personas en el mundo.

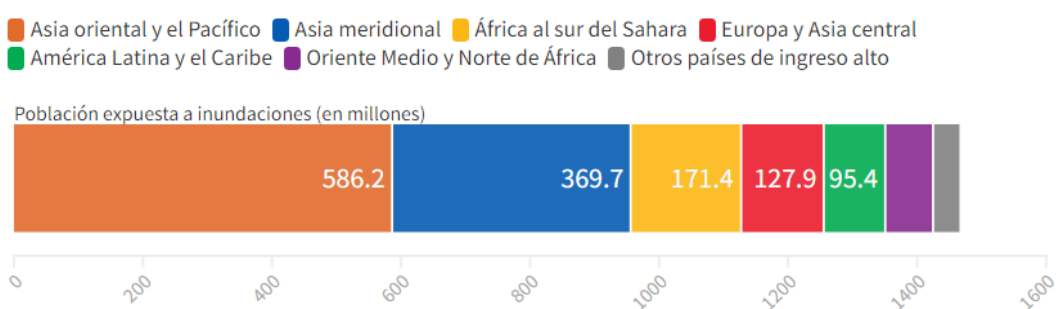
En relación con la situación global

De acuerdo con una investigación reciente (Rentschler & Salhab, 2020) elaborada a partir del análisis de mapas de riesgo de inundaciones con la información proporcionada de la base de datos del Banco Mundial, se expuso lo siguiente: más de 1.4 billones de personas (cerca del 18% de la población mundial) están directamente expuestas a ser afectados por inundaciones extremas donde aproximadamente 0.6 billones se encuentran en condiciones de pobreza; la estimación considera un riesgo de exposición de más de 0.15 metros de altura de inundación.

Por otro lado, alrededor del 28% de la población mundial viven en zonas sujetas a inundaciones con el 1% de probabilidad de ocurrencia, es decir, un periodo de retorno de 100 años significando que el evento tiene una probabilidad del 50% de ocurrir en una vida (68 años).

Figura 1

Población propensa a daños por inundaciones



Nota. Adaptado de *People in Harm's Way: Flood Exposure and Poverty in 189 Countries* [Figura], por J. Rentschler y M. Salhab, 2020, documento de trabajo sobre investigaciones relativas a políticas de desarrollo, n.o 9447, Washington, DC, Banco Mundial.

En relación con la situación nacional

El Perú se encuentra clasificado como uno de los países de poco desarrollo. Según lo estimado por el Banco Mundial, el país está expuesto a daños de gran impacto por

inundaciones fluviales y dada su ubicación geográfica, cercana a la línea ecuatorial y colindante con el océano Pacífico, está sometido a un evento anómalo denominado el Fenómeno de El Niño (FEN) que ha sido el principal motivo de daños y emergencias, cuyas consecuencias se traducen en extremas precipitaciones que generan el aumento excesivo de caudales en la gran mayoría de los ríos del territorio nacional. Las regiones más golpeadas por estos eventos extremos son las localidades norteñas de la costa peruana y del Amazonas, sin embargo, la sierra no es ajena a estos daños importantes.

Conforme al reciente Compendio Estadístico del Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI, 2020), la mayor cantidad de damnificados según el tipo de fenómeno durante el periodo 2003-2019 ha sido generado por las inundaciones con 542 mil 712 personas por delante de lluvias intensas y sismos. En la siguiente figura se muestra un resumen de daños personales de los cinco fenómenos de mayor recurrencia en el país, siendo la inundación el fenómeno que ocupa el tercer lugar en la lista con más de 2.5 millones de personas damnificadas y afectadas.

Figura 2

Población afectada y damnificada: 2003-2019

N°	Fenómenos	Total Eventos	Personas Afectadas y Damnificadas	Porcentaje
	Total	72,399	15,003,883	100%
1	Lluvias Intensas	22,603	4,295,840	29%
2	Incendios	22,320	183,118	1%
3	Bajas Temperaturas	11,869	7,578,560	51%
4	Vientos Fuertes	10,322	367,656	2%
5	Inundación	5,285	2,578,709	17%

Nota. Fuente: SINPAD-COEN-INDECI / Elaboración: SD Aplicaciones Estadísticas-DIPPE-INDECI.

Es posible concluir que las inundaciones son un problema de tipo universal y el mundo está en constante riesgo de ser afectado por este fenómeno, en particular el Perú, siendo uno de los países con mayor impacto latente de daños, dada sus condiciones geográficas, económicas y sociales. Al ser un problema existente e inminente en todas partes del mundo que trae consigo daños personales y pérdidas económicas, surge la exigencia de la creación de proyectos sobre obras para la protección contra inundaciones fluviales dentro de las cuales, unas de las alternativas más frecuentes y usadas es el

planteamiento de diques con protección de enrocado, que a su vez y no menos importante, conlleva a realizar un correcto y criterioso procedimiento en su diseño.

1.3 Justificación del Trabajo

Más allá de conocerse que el Perú se encuentra dentro de los países expuestos a mayores impactos de desbordes (por eventos extremos y/o condiciones geográficas hidrometeorológicas), otra razón de vulnerabilidad es la baja calidad en el procedimiento del diseño en sus obras protección. De acuerdo con esto último, el presente trabajo tiene la finalidad de establecer una metodología de diseño de diques de protección de enrocado basada en la revisión y análisis de cada formulación sumada al criterio que se ha de ejercer para la adopción final de los parámetros de diseño.

La realidad nacional ha demostrado la vulnerabilidad no solo de nuestras obras de protección de riberas sino también de otros tipos como las obras viales, que deja incomunicada a algún sector en el país en cada evento extremo, un motivo que se suma a la justificación desde un contexto social. Desde otro punto de vista, el buen ejercicio en el procedimiento de diseño no solo radica en reducir los impactos en desastres, sino también representa un beneficio económico en la construcción de la obra, incluso en los daños económicos evitados.

En síntesis, el presente trabajo desarrolla el tema del diseño hidráulico de diques con protección de enrocado a fin de otorgar un procedimiento criterioso, coherente y válido realizado mediante el uso de instrumentos tecnológicos actuales que brindan mayor provecho en el ámbito del buen ejercicio del diseño de estructuras de control de inundaciones.

1.4 Identificación del Problema

En el Valle de Chincha, en Ica del sur del Perú, la actividad social económica más importante es la agrícola, que consecuentemente motiva otras labores productivas como el transporte, comercio y consumo. Esto se debe a la ubicación privilegiada del valle que colinda con dos ríos importantes: los ríos Chico y Matagente que nacen de la bifurcación del

río San Juan, el más representativo de su cuenca del mismo nombre ubicada en su parte baja. El fenómeno de El Niño (FEN) y otros eventos anómalos de precipitación han generado inundaciones en la cuenca del río San Juan tanto en su cabecera como en las áreas cercanas a la vertiente del Océano Pacífico. El último evento FEN 2017 provocó el desborde del río Matagente afectando al menos a 200 familias y más de 100 hectáreas de cultivos. La máxima avenida también trajo la destrucción del puente Chamorro, dejando sin una vía de comunicación terrestre importante a los pobladores de la zona (Mujica, 2017).

Figura 3

Desborde del río Matagente - Sector Cañapay



Nota. Adaptado de Ica: nuevo desborde del río Matagente afecta a 172 familias [Fotografía], por El Comercio, 2017 (<https://elcomercio.pe/>).

El mayor uso de suelo es para fines agrícolas y dada su importancia, es conveniente prevenir y mitigar los riesgos de desastres ocasionados por estos fenómenos extraordinarios mediante el planteamiento de estructuras de protección de riberas en los ríos Chico y Matagente, este último es el caso de aplicación.

1.5 Propuesta de Solución

La solución más conveniente es el planteamiento de obras de encauzamiento y como punto de partida, es necesario identificar previamente las zonas vulnerables a la inundación fluvial en un escenario de máxima avenida; para tal fin se usará el software libre

BASEMENT-ETH como herramienta para realizar la simulación hidráulica. Determinada las zonas inundadas, se procederá a plantear las defensas ribereñas en planta bajo criterios importantes como respetar la faja marginal actualizada, evitar o minimizar la afectación a predios agrícolas o urbanos, considerar el ancho estable del río según los cálculos a obtener y proyectar las coronas sobre diques existentes para minimizar movimientos de tierra. Realizada la evaluación de las condiciones actuales en horizontal y definido el encauzamiento en planta, se realiza la evaluación en vertical mediante el modelamiento hidráulico del terreno con las obras proyectadas a fin de obtener los parámetros necesarios (tirantes, velocidades, cotas de agua, socavación) para el cálculo de los elementos del diseño hidráulico definitivo del dique con protección de enrocado.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Diseñar diques con protección de enrocado, bajo el enfoque hidráulico, en el río Matagente del valle de Chincha.

1.6.2 Objetivos Específicos

- Elaborar el modelamiento hidráulico mediante el código numérico de BASEMENT-ETH.
- Diseñar el esquema metodológico del procedimiento del diseño hidráulico de diques con protección de enrocado.
- Calcular la socavación general en un entorno bidimensional en base a los resultados de tirantes y velocidades del modelo BASEMENT-ETH.
- Establecer las metodologías, los análisis y los criterios de diseño para el cálculo del ancho estable, borde libre, espesor, diámetro de enrocado y otros elementos complementarios.
- Obtener el resumen de elementos geométricos de la sección típica de dique para cada tramo de protección.

1.7 Alcances

El tema del diseño de obras de encauzamiento, en particular, de diques con protección de enrocado, involucra la intervención de diversas especialidades en el ámbito de la Ingeniería de Proyectos. Este apartado tiene por objetivo delimitar la extensión del trabajo de la Monografía Técnica en base a la especialidad en la que pertenece el tema, mediante los siguientes aspectos:

- El diseño del dique con protección de enrocado se realizará considerando únicamente los aspectos hidráulicos, entendiéndose que forma parte de un diseño integral que requiere el aporte técnico de profesionales de otras especialidades.
- Se presentará la información relacionada a la hidrología, topografía y granulometría como puntos base de partida, sin detallar en el origen de los datos al tratarse de información privada y obtenida con permisos para fines estrictamente académicos.
- Es importante reiterar que el diseño de la obra de encauzamiento requiere el aporte técnico de diversas especialidades: ingeniería civil, geotecnia, ingeniería estructural, mecánica de suelos, ingeniería de cimentación, arquitectura, ingeniería ambiental, entre otros. Ante esto, cualquier aspecto o elemento de diseño dependiente de estas especialidades, externo del enfoque hidráulico, será asumido o supuesto por lo cual, no será materia de estudio en el presente trabajo y cualquier información relacionada a otras especialidades será omitida (ejemplos: estudio de paisajismo, estudio de impacto ambiental, estudio de mecánica de suelos y cimentación, costos y presupuestos, etc).
- La definición en planta de los diques de encauzamiento tendrá como criterio único la evaluación de las posibles inundaciones fluviales y sus aspectos hidráulicos.
- Los detalles constructivos, estructurales, de operación y mantenimiento, costos y presupuestos no serán abordados en el presente trabajo.

1.8 Limitaciones

Todo proyecto de investigación presenta obstáculos para el logro absoluto de sus objetivos y el presente trabajo no es ajeno a ello, por lo cual, se establecen las limitaciones más importantes en el ámbito de este estudio:

- La asignación del factor de fricción por cada uso de suelo tendrá como único sustento la formulación y la bibliografía presentadas en el presente texto debido a la complejidad, tiempo y costo que significa obtener datos para calibrar el modelo y posteriormente validarlos.
- Se cuenta con la mayor parte de la topografía del cauce del río Matagente de origen LiDAR, representando de forma muy eficiente el relieve, sin embargo, dada su naturaleza no brinda el detalle suficiente de las estructuras de cruce por lo cual estas serán asumidas de forma práctica en el modelo hidráulico (herramienta para la obtención de parámetros hidráulicos). Se destaca que esta suposición no modifica o condiciona la metodología propuesta en esta monografía que permanece en el enfoque del tema (diseño hidráulico) y solo se emplea para superar la limitación referida.

Capítulo II. Marco Teórico

2.1 Antecedentes

Los antecedentes encontrados tienen como fuente instituciones y organismos gubernamentales como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), la reciente Autoridad para la Reconstrucción con Cambios (ARCC), el Proyecto Especial Tambo Ccaracocha (PETACC), entre otros, involucrados en estudios de hidráulica fluvial del río Matagente y en proyectos de medidas de prevención contra inundaciones fluviales. Entre lo que se puede encontrar como información antecedente en la base de datos de estudios académicos o del gobierno es lo siguiente:

- Informe técnico: “Delimitación de la faja marginal del río Matagente: Resumen ejecutivo” elaborado por el ANA (1999)

El texto realiza una revisión de las condiciones actuales y/o características físicas e hidráulicas del río: perfil del río, secciones transversales, etc., elaborando un modelo hidráulico mediante el antiguo software HEC-2 con el cual se determinaron los niveles que alcanzan las aguas en ambas márgenes durante las máximas avenidas extraordinarias para un periodo de 25 años y también, obteniendo el área de inundación a través de los resultados de la simulación del flujo en el río basado en las secciones transversales. El estudio concluye con la determinación de la faja marginal a lo largo de los 23 km del río indicando a su vez que la topografía del río es crítica y accidentada siendo propenso a sufrir problemas de inundación durante épocas de avenidas, puntos donde se deben ejecutar proyectos de protección de riberas.

- Informe técnico: “Diagnóstico de las Defensas Ribereñas en los ríos Chico y Matagente, Provincia de Chincha” elaborado por el Gobierno Regional de Ica (2012)

El informe tuvo como objetivo conocer las zonas de mayor riesgo de desbordes e inundaciones de los distritos localizados en las riberas de ambos ríos y participar en el desarrollo de acciones preventivas frente a este tipo de desastres. El estudio efectuó el recorrido de la totalidad del río Matagente observando que se encontraba colmatado

haciendo que las aguas divaguen y en efecto, debiliten las riberas por erosión y socavación, las mismas que han producido daños y pérdidas de terrenos de cultivos además de aumentar el peligro y el riesgo potencial de pérdidas de vidas humanas y materiales. En el estudio se determinó una sección estable promedio de 100 metros y una socavación general estimada de 1.81 metros, asimismo, proponen diques con altura constante de 2.5 metros, una profundidad de 2.0 metros con una sección trapezoidal que se conforma con 12.5 m de base mayor y 5.0 m de base menor.

- Informe de Estudio de Prefactibilidad: “Estudio Preparatorio sobre el Programa de Protección de Valles y Poblaciones Rurales y Vulnerables ante Inundaciones en la República del Perú” elaborado por el Ministerio de Agricultura República del Perú en conjunto con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (2013)

El estudio determina dos tramos críticos en el río Matagente para la ejecución de obras de protección sustentando que en estos tramos por sus condiciones hidráulicas (sección angosta, presencia de estructuras de cruce, riberas debilitadas, tramos socavados, curvas existentes, colmatación, etc) han provocado en el pasado el desbordamiento de agua en ambos márgenes causando daños en áreas de cultivo y pérdidas en materia económica. La propuesta consiste en la reconfiguración de diques en estado deteriorado, el planteamiento de diques con protección de enrocado en reemplazo de diques existentes que deben ser removidos a causa de generar estrechamiento del río y la descolmatación producida por la dinámica fluvial del río para la obtención de mayor área hidráulica.

- Estudio: “Creación del Servicio de Protección en ribera del río Matagente vulnerable ante el peligro en los sectores San Carlos-Sra. Vargas – Distrito de El Carmen – Provincia de Chincha – Departamento de Ica” elaborado por el PETACC (2019)

Debido a las consecuencias negativas suscitadas por los Fenómenos de El Niño en el año 1998 mediante el Decreto Supremo N° 021-2003-VIVIENDA, el 22 de agosto del 2003, transfieren el Proyecto Especial Tambo Ccaracocha (PETACC) al Gobierno Regional de Ica, constituida en 1995 que inicialmente operaba como un Organismo Descentralizado

del Instituto Nacional de Desarrollo (INADE). El PETACC venía realizando obras de control de inundaciones y huacos en el río Ica y quebradas afluentes bajo la disposición del INADE ejecutando el Plan de Emergencia Fenómeno de El Niño en una coyuntura declarada por el gobierno “Estado de Emergencia” en el departamento de Ica. Posteriormente se establece la Resolución Ejecutiva Regional N° 0473-2011-GORE-ICA/PR, de fecha 28/09/2011 que indica: “se encarga al PETACC la ejecución de obras y actividades destinadas a la protección de centros poblados, infraestructura de riego y tierras de cultivo expuestas a inundaciones ocasionados por las avenidas de los diferentes ríos de la región Ica y quebradas tributarias”. Dentro de su información relevante, su estudio de hidrología determinó que el caudal de la subcuenca del río San Juan se distribuye en partes iguales tanto para el río Chico como para el río Matagente, siendo el caudal para este último de 618 m³/s para un periodo de retorno de 100 años. Cabe indicar que el estudio se desarrolló en un sector del río Matagente. En aspectos de diseño, el proyecto determinó el empleo de un dique de 1.04 km en la margen derecha del río con una altura constante de 5.0 metros, una corona de 4.0 metros, un talud del terraplén de 1.5H:1.0V, un diámetro promedio de 1.5 m para el revestimiento de enrocado y una profundidad de uña de 3.4 metros.

- Estudio: “Instalación – Implementación de medidas de prevención para el control de Desbordes e Inundaciones del río Chíncha – Provincia de Chíncha – Departamento de Ica” elaborado por el PSI-MIDAGRI (2021)

Otros estudios antecedentes en el río Matagente han sido realizados bajo alianzas entre entidades gubernamentales y extranjeras; mediante el Decreto Supremo N°308-2014-EF se aprobó la Operación de Endeudamiento Externo con la Agencia de Cooperación Internacional del Japón – JICA, hasta por la suma de US\$ 95,0 millones destinados a financiar el “Programa de Protección de Valles y Poblaciones Rurales Vulnerables ante Inundaciones”, cuya Unidad Ejecutora es el Ministerio de Agricultura y Riego, a través del Programa Subsectorial de Irrigaciones (PSI). Su respectivo estudio de hidrología determinó un caudal máximo de 639.5 m³/s para un periodo de retorno (TR) de 100 años, sin embargo,

el caudal para el diseño de las obras de encauzamiento se seleccionó en base al TR de 50 años. Es importante indicar que el estudio evalúa al río Matagente por tramos, es decir, no realiza una evaluación integral a detalle del río Matagente sino una evaluación sectorizada. En aspectos de diseño, el proyecto determinó el empleo de un total 8.15 kilómetros de dique repartidos en dos tramos abarcando ambas márgenes del río Matagente con alturas variables, una corona de 3.5 metros con borde libre de 1.0 metro, un talud del terraplén de 2.0H:1.0V, un diámetro promedio de 1.5 metros para el revestimiento de enrocado con espesor de 1.0 metro y una profundidad de uña de 1.5 metros.

En la actualidad existe la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios creado en el marco legal mediante la Ley N° 30556 luego de la destrucción producida por el Fenómeno de El Niño Costero ocurrida en el verano de 2017, contexto en el que el gobierno peruano buscaba coordinar entre los distintos niveles de gobierno y expeditas la ejecución de obras para restituir el bienestar perdido a los ciudadanos afectados por este evento anómalo. La ARCC está encargada de implementar soluciones de carácter integral de 17 cuencas hidrográficas de siete regiones del país incluidos en el Plan Integral de la Reconstrucción con Cambios (PIRCC). La cuenca del río San Juan, que en cuya bifurcación nace el río Matagente, está incluida dentro del PIRCC, por lo cual será objeto de intervención según el cronograma que estipule la entidad gubernamental.

2.2 Bases Teóricas Fundamentales

2.2.1 Hidráulica Fluvial

2.2.1.1 *Coficiente de Fricción – Manning*

El parámetro “n” de Manning está relacionado con definir la capacidad de resistencia que un canal ejerce sobre un flujo líquido (Chow, 1959). Este valor es importante por ser altamente sensible en la modelación numérica de canales, dado que, un cambio mínimo repercute directamente sobre los resultados de profundidades y velocidades del modelo. Cowan (1956) estableció un proceso de cálculo para la estimación del factor de fricción de Manning mediante la siguiente formulación:

$$n = (n_o + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \quad (1)$$

Donde n_o es valor base en función al material predominante del canal; n_1 , representa el grado de irregularidad del perímetro mojado; n_2 , es un valor añadido por la variación del canal; n_3 , que incorpora el efecto por presencia de obstáculos; n_4 , introduce el efecto de la densidad de vegetación y m un factor de ajuste en función a la sinuosidad del cauce. La Figura 4 determina el rango de estos valores en función a la condición del canal en estudio.

Figura 4

Factores de ajuste para el cómputo del valor de Manning según Cowan

Condiciones del canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0.020
	Corte en roca		0.025
	Grava fina		0.024
	Grava gruesa		0.028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0.000
	Menor		0.005
	Moderado		0.010
	Severo		0.020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0.000
	Ocasionalmente alternante		0.005
	Frecuentemente alternante		0.010-0.015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0.000
	Menor		0.010-0.015
	Apreciable		0.020-0.030
	Severo		0.040-0.060
Vegetación	Baja	n_4	0.005-0.010
	Media		0.010-0.025
	Alta		0.025-0.050
	Muy alta		0.050-0.100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m_5	1.000
	Apreciable		1.150
	Severo		1.300

Nota. Adaptado de *Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering*, por W.L. Cowan, 1956, p. 473-475, con modificaciones de Chow (1959), Bray (1979), entre otros autores.

2.2.1.2 Ancho Estable

El ancho estable de un cauce se refiere a la permanencia uniforme de su sección geométrica y pendiente que guarda relación con el equilibrio geomorfológico que un río ha alcanzado (Maza & García, 2018). Se presentan los siguientes métodos para el cálculo del ancho mínimo estable.

Método de Blench

El método involucra dos variables: corrección de fondo (F_b) y corrección de orilla (F_s) que relacionan el sedimento arrastrado, el diámetro característico y la capacidad de resistencia de las márgenes a ser erosionadas. Los valores adoptados por Blench (1957) para estos dos parámetros son:

$$F_b = 0.8 \quad \text{lecho fino, } D_m \leq 0.5 \text{ mm}$$

$$F_b = 1.2 \quad \text{lecho grueso, } D_m \geq 0.5 \text{ mm}$$

$$F_s = 0.1 \quad \text{poco cohesivo}$$

$$F_s = 0.2 \quad \text{medianamente cohesivo}$$

$$F_s = 0.3 \quad \text{muy cohesivo}$$

Blench (1957) propuso ecuaciones básicas donde deduce las ecuaciones de diseño para cauces estables, siendo las siguientes expresiones:

$$b_m = 1.81 \left(\frac{F_b Q}{F_s} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$d = \left(\frac{F_s Q}{F_b^2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$s = \frac{F_b^{5/6} F_s^{1/12}}{3.28 K Q^{1/6} (1 + C / 2330)} \quad (4)$$

Donde:

b_m : ancho medio de la sección, m

d : tirante, m

C : concentración del sedimento de fondo arrastrado, ppm

Método de Simons y Henderson

Considera el caudal de diseño más un factor de condición de lecho. El cálculo del ancho de cauce se realiza mediante la siguiente formulación:

$$b_m = K_1 (Q)^{1/2} \quad (5)$$

Donde K_1 caracteriza los tipos de sedimentos del lecho del río; la Tabla 1 muestra los valores K_1 de acuerdo con las condiciones dadas en el fondo del río. Asimismo, se sugieren condiciones en las que esta fórmula debe ser aplicada: la pendiente del río debe estar en el rango de 0.06 % al 10 %; el diámetro característico, desde 0.03 - 80 mm y el caudal desde un rango que va del 0.15 – 250 m³/s.

Tabla 1

Coeficiente K1 de los materiales de fondo (lecho) y orilla (bancos o márgenes)

Características	K_1
Lecho y márgenes de arena fina	5.70
Lecho de arena y márgenes con suelos cohesivos	4.20
Lecho y bancos con suelos cohesivos	3.60
Lecho y márgenes con material grueso no cohesivo	2.90
Lecho y márgenes de partículas no cohesivas	2.80

Nota. Adaptado de *Diseño y construcción de defensas ribereñas*, por R. Terán, 1998, p. 35.

Método de Altunin-Manning (1962)

El método involucra el factor de fricción de Manning n , material del cauce K y un coeficiente de cauce m :

$$b_m = \frac{Q^{0.5} (n \cdot K^{5/3})^{\frac{3}{3+5m}}}{S^{0.2}} \quad (6)$$

Los valores que K puede adoptar según condición en el cauce se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2*Coeficiente K sobre el tipo de material*

Condición	K
Cauce formado en material aluvial	8–12
Ríos con orillas muy difícilmente erosionables	3–5
Cauces con orillas muy fácilmente erosionables	16–20

Nota. Adaptado de *Estabilidad de cauces - Manual de Ingeniería de Ríos*, por J.A. Maza & M. García, p. 37, 2018.

En cuanto al coeficiente de cauce, este adopta el valor de 0.5, para cauces de montaña; 0.7, para cauces con material fino arenoso y 1.0, para cauces aluviales.

2.2.2 Socavación

Consiste en un efecto físico que sufre el cauce fluvial cuando ocurre una profundización de su lecho producida por una diferencia entre los volúmenes de entrada y salida del sedimento en un determinado tramo. Esta diferencia ocurre debido a un aumento zonificado de la remoción de sedimentos generado por la aceleración del flujo. El cálculo de este parámetro es muy importante para el diseño correcto de los componentes antisocavantes de las estructuras hidráulicas. Los siguientes métodos permiten calcular la profundidad socavada.

2.2.2.1 Método de Lacey

Gerald Lacey (1930) expone la siguiente formulación para la estimación de la máxima profundidad de socavación:

$$R = 0,91 \cdot (q^2 / f)^{1/3} \quad (7)$$

Donde:

R : profundidad hidráulica para el caudal de diseño en, ft

q : caudal unitario de diseño, ft³/s/ft

f : factor de Lacey = $1.76 Dm^{1/2}$

Dm : diámetro característico del lecho, mm

La máxima socavación se calcula de la siguiente forma:

$$D_{\max} = c \cdot R \quad (8)$$

Donde c es un factor que Lacey brinda de acuerdo con la condición del río:

cauce recto: $c = 1.27$

con curvas moderadas: $c = 1.5$

con curvas severas: $c = 1.75$

con curvas en ángulo recto: $c = 2.0$

2.2.2.2 Método de Blench

Blench (1969) establece la siguiente formulación:

$$y_{f0} = q_f^{2/3} / F_{b0}^{1/3} \quad (9)$$

Donde:

y_{f0} : profundidad socavada, ft

q_f : caudal unitario de diseño, $\text{ft}^3/\text{s}/\text{ft}$

F_{b0} : factor de Blench, ft/s^2

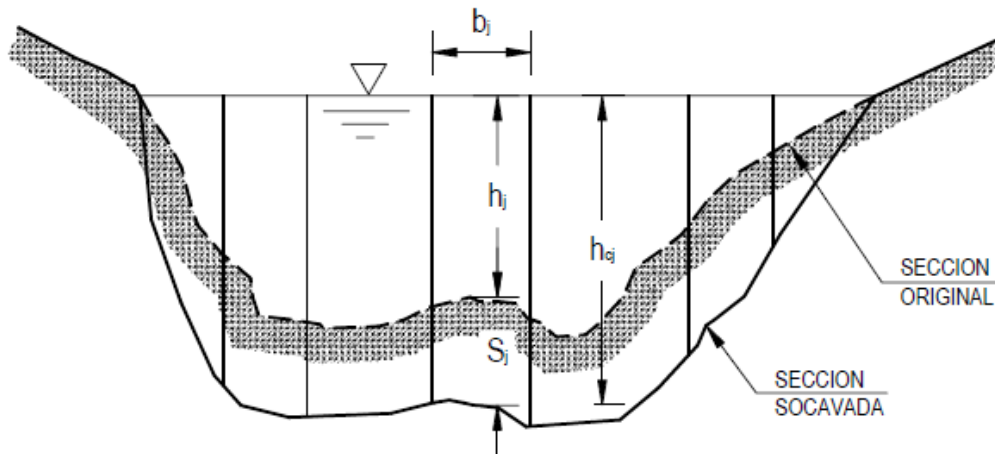
$$F_{b0} = 1.9D_m^{0.5} \quad D_m^{0.5} \leq 2.0\text{mm}$$

$$F_{b0} = 1.75D_m^{0.5} \quad D_m^{0.5} > 2.0\text{mm}$$

D_m : diámetro medio del material de cauce, mm

Figura 5

Esquema de cálculo de socavación general



Nota. Adaptado de Viales-SDD-DV, 2012, p.818.

2.2.2.3 Método de Lischtván-Lebediev

La formulación de Lischtván-Lebediev calcula la socavación general en cauces conformados por sedimentos de materiales cohesivos y no cohesivos en base a un criterio que determina que el fenómeno erosivo deja de incidir cuando la velocidad del flujo se reduce a la velocidad mínima de equilibrio, este último dependiente del diámetro característico.

Sedimentos no-cohesivos:

$$h_j = \left(\frac{q_j}{0,68 \cdot \beta \cdot D^{0,28} \cdot \Psi} \right)^{\frac{1}{x+1}} \quad (10)$$

Sedimentos cohesivos:

$$h_j = \left(\frac{q_j}{0,60 \cdot \beta \cdot \gamma_s^{0,28} \cdot \Psi} \right)^{\frac{1}{x+1}} \quad (11)$$

Donde:

h_j : tirante en la sección, m.

q_j : caudal específico, m³/m/s.

D : diámetro característico, mm

γ_s : peso específico de la partícula en ton/m³.

β : coeficiente por periodo de retorno Tr

$$\beta = 0.7929 + 0.0973 \cdot \text{Log}Tr \quad (12)$$

Ψ : coeficiente por forma de transporte de sedimentos.

x : exponente dependiente del diámetro característico

$$x = 0.394557 - 0.04136 \cdot \text{Log}D_m - 0.0089 \cdot \text{Log}^2 D_m \quad (13)$$

2.3 Bases Teóricas de Ingeniería

2.3.1 Estructuras de Protección contra Inundaciones

Se pueden establecer seis categorías del control de inundaciones (defensas ribereñas) de acuerdo con los siguientes objetivos (JICA, 2010):

- para incrementar la capacidad de descarga del río
- para laminar el caudal pico de la inundación
- para evitar las inundaciones urbanas
- para evitar el colapso de los bancos del río por deterioro erosivo
- para prevenir obstrucciones contra la corriente del río y/o mantener o conservar las buenas condiciones del río (condiciones fluviales estables)

Para los mencionados objetivos se tienen las siguientes alternativas y/o topologías de estructuras mayormente optadas como medidas de protección contra inundaciones:

- Terraplenes
- Pedraplenes
- Muro de gaviones
- Muro de concreto
- Espigones

2.3.1.1 Terraplén

Los diques o muros de terraplén se conforman generalmente con material propio del cauce que, como estructura hidráulica, necesitan protección en su talud contra la socavación general que el flujo de agua puede producir al presentar altas velocidades.

Figura 6

Conformación de un terraplén con protección de enrocado



Nota. Adaptado de *Defensas Ribereñas del tramo Catacaos* [Fotografía], por la Autoridad para la Reconstrucción con Cambios, 2021, ARCC (<https://www.rcc.gob.pe/>)

La protección consiste en colocar roca pesada en el talud que estará en contacto con el agua tal y como se presenta en la Figura 6. Una variante similar al terraplén es el pedraplén (mostrado en la Figura 7) cuyo material puede provenir del mismo río, pero construido en su totalidad con roca gradada compactada. Generalmente, tanto para el terraplén como el pedraplén requieren de una capa filtrante, natural, de piedra, concreto, membrana o geotextil que aísle las partículas finas para estabilizar la estructura.

Figura 7

Pedraplén existente en el río Cañete, en el departamento de Lima



Nota. Adaptado de *Nota de prensa*, por *Dirección Regional de Agricultura Lima*, 2020, Estado Peruano (<https://www.gob.pe/>)

2.3.1.2 Muro de gaviones

Los gaviones son estructuras conformadas principalmente por cantos de roca mal graduada, acomodados en formas de cubo mediante una malla de alambre galvanizado (Suárez, 2001). Son de uso recurrente en América como empleo de obras de defensas ribereñas; dentro de su tipología, el más común es el bloque cúbico de un metro de lado. La malla que confina estas piedras está elaborada por alambres especiales sometidos previamente a un proceso denominado galvanización, que consiste en términos generales, cubrir de zinc al alambre para otorgarle propiedades favorables contra la corrosión.

Figura 8

Muro de protección a base de gaviones para el control de erosión



Nota. Adaptado de *Composición del gavión* [Fotografía], Control de Erosión en Zonas Tropicales, por J. Suárez, 2001, p. 229.

La abrasión y la corrosión son los fenómenos típicos que deterioran la malla estableciendo una desventaja en el planteamiento de esta estructura, ante esto, parte del gavión se suele revestir de concreto aumentando el costo de la obra. Para la erosión local, se emplean colchones longitudinales con espesores mínimos, usualmente 50 cm o superiores en función al grado de socavación que el río pueda generar.

Figura 9

Malla de alambros deterioradas por la corrosión



Nota. Adaptado de *Alambres galvanizados* [Fotografía], Control de Erosión en Zonas Tropicales, por J. Suárez, 2001, pág. 232.

2.3.1.3 Muro de concreto

Los muros de concreto son elaborados a base de una mezcla de agregados como el cemento, arena, agua, etc, y pueden estar reforzados con una armadura de acero denominándose en conjunto concreto armado para este caso. Cuando se reemplaza la armadura por la introducción de piedras o rocas mal graduadas en la mezcla, se denomina concreto ciclópeo. En el ámbito de medidas de protección contra inundaciones fluviales, el muro de concreto presenta desventajas económicas frente al empleo de un terraplén; la rigidez del muro determina un mayor riesgo de falla, caso contrario al de un enrocado que se protege mejor de la socavación y adicionalmente, para la fabricación del concreto, se exige la elaboración de grandes volúmenes de agregados considerando también los costos de instalación de una o varias plantas de concreto.

Figura 10

Muro de concreto emplazado en el río Rímac



Nota. Adaptado de *Crecida en el río Rímac* [Fotografía], por C. Villegas, 28 de febrero del 2019, Diario Ojo (<https://ojo.pe/>).

La elección de una u otra tipología de defensa ribereña debe estar sujeta a un análisis cuantitativo y valorativo de cada alternativa; se deben tomar en cuenta elementos como la disponibilidad de los materiales de construcción, sean propios o provenientes de la

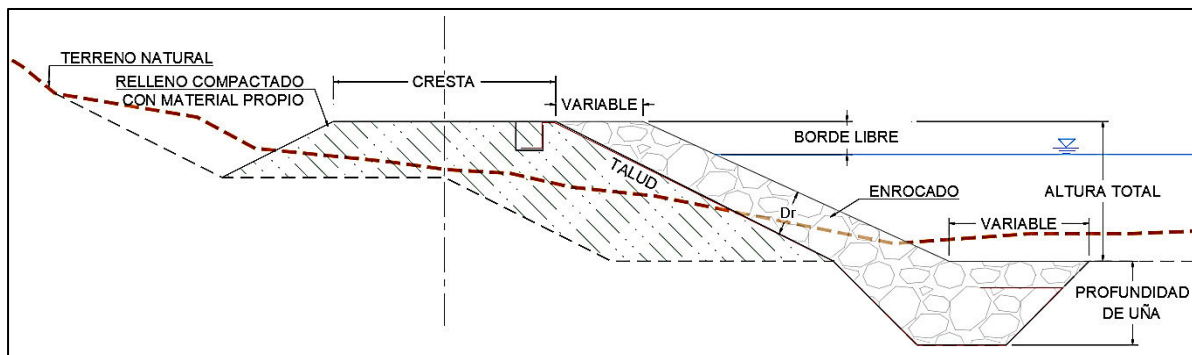
explotación de canteras; comparativa de costos de obra, basado en el contraste de los costos de cada alternativa que puede elaborarse por metro lineal; tiempos de ejecución, referido al análisis en los tiempos favorables o desfavorables, en los periodos húmedos del río en el que se ejecuta la obra; accesibilidad para el mantenimiento de estructuras, sujeto a un criterio técnico y cualitativo determinando qué alternativa brinda mejores condiciones para su mantenimiento periódico; ecológico y paisajista, un criterio que consiste en definir qué tipo de obra de protección reduce los efectos ambientales y se asocia mejor al paisajismo del área.

2.3.2 Criterios de Diseño Hidráulico de Diques

Se detallan los criterios de diseño empleados para el diseño hidráulico del dique con protección de enrocado. La Figura 11 presenta una sección típica de los elementos de un dique.

Figura 11

Partes de un dique con protección de enrocado



Nota. Elaboración propia

2.3.2.1 Altura del dique

La altura del dique quedará definida en base a la cota del agua de diseño más un borde libre que permite resguardar de fluctuaciones en la onda de avenida e incertidumbres en los niveles máximos inundación por diseño.

$$H = \text{cota del nivel máximo del agua} - \text{cota de la superficie del terreno} + \text{borde libre} \quad (14)$$

Donde H es la altura final del dique.

2.3.2.2 Borde Libre

Es un espacio que va desde la cota de inundación hasta la elevación de la cresta del dique establecida a fin de evitar el desbordamiento. La ecuación del borde libre se determina en función a la energía de velocidad (Terán, 1998) que se multiplica por un factor que depende del caudal máximo de diseño, se define de la siguiente forma:

$$BL = \phi \frac{V^2}{2g} \quad (15)$$

Donde:

- V : velocidad media, m/s
- g : aceleración de la gravedad, m/s^2
- ϕ : coeficiente por caudal máximo
- BL : borde libre calculado, m

Tabla 3

Coefficientes en función al caudal de diseño

Caudal máximo (m^3/s)	Coefficiente ϕ
3000–4000	2.0
2000–3000	1.70
1000–2000	1.40
500–1000	1.20
100–500	1.10

Nota. Adaptado de *Diseño y construcción de defensas ribereñas*, por R. Terán, 1998, p. 36.

La Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA) recomienda que el borde libre no debe ser menor que el valor dado en la Tabla 4, dependiente de la descarga de diseño.

Tabla 4*Borde mínimo requerido según caudal*

Caudal de diseño (m ³ /s)	Borde Libre (m)
Menor que 200	0.6
Entre 200 y 500	0.8
Entre 500 y 2000	1.0
Entre 2000 y 5000	1.2
Entre 5000 y 10000	1.5
Mayor a 10000	2.0

Nota. Adaptado de *Technical Standards and Guidelines for Design of Flood Control Structures*, por JICA, 2010, p. 5.

2.3.2.3 Diseño de Cresta

Para el diseño de cresta de los terraplenes con enrocados de protección se consideran los resultados de elevación de la superficie de flujo que se obtiene como resultado de la modelización hidráulica con proyecto a elaborar en el software libre BASEMENT-ETH. El procedimiento consiste en elevar la superficie de agua obtenida a una distancia por encima, igual al borde libre establecido, para obtener una superficie a la cual deberá proyectarse la cresta de la obra de encauzamiento. Sobre esta superficie se traza una rasante en su perfil longitudinal, con tramos de pendiente variable, determinando el diseño de la cota máxima del dique.

2.3.2.4 Profundidad de la Uña Antisocavante

La determinación de este parámetro se realiza calculando la profundidad de socavación en dicho tramo, el valor adoptado estará relacionado a uno de los métodos que se haya establecido como el más adecuado, en base a sus condicionantes, para la estimación de la socavación general multiplicado por un factor de seguridad.

2.3.2.5 Diámetro del Enrocado de Protección

Existen numerosas metodologías para la obtención del diámetro de enrocado, se ha optado por emplear cuatro formulaciones para el cálculo de este elemento en el caso de aplicación.

Método de Isbash

Isbash (1936), basado en investigaciones de la estabilidad de la roca volcada en el río para construcción de presas, determinó la siguiente ecuación para el D_{50} :

$$D_{50} = \frac{V^2}{2 \cdot g \cdot C^2 (Gs - 1)} \quad (16)$$

Donde:

V : velocidad promedio del flujo, m/s

Gs : gravedad específica de la roca

g : aceleración de la gravedad, m/s^2

C : factor de Isbash (recomendando 0.86 , para flujos con gran turbulencia y 1.20 con baja turbulencia)

Método de Maynord

El método de Maynord (1978) es otra de las alternativas más usadas para el cálculo del diámetro medio de roca. Su propuesta incorpora el número adimensional de Froude más coeficientes de corrección según condición del cauce:

$$D_{50} = y \cdot C_1 \cdot F^3 \quad (17)$$

$$F = \frac{C_2 \cdot V}{(g \cdot y)^{0.5}} \quad (18)$$

Donde:

y : tirante de la corriente, m

V : velocidad promedio, m/s

F : número adimensional de Froude

C_1, C_2 : factores de correjimiento en función a la condición del cauce, los valores que adopta se pueden ver en la Tabla 5.

Tabla 5*Coeficientes de corrección en función a la condición del cauce*

Condición	Coeficiente
	C1
Fondo plano	0.25
Talud 3H:1V	0.28
Talud 2H:1V	0.32
	C2
Tramos en curva	1.50
Tramos rectos	1.25

Nota. Adaptado de *Practical Riprap Design*, por S.T. Maynard, 1978.

Método de California Department of Transportation

La ecuación del Departamento de Transportes de California relaciona la masa de la piedra con el diámetro equivalente a través de la velocidad media y el ángulo del reposo del material (CALTRANS, 1970). La formulación es la siguiente:

$$W = \frac{0.00002 \cdot G_s \cdot V^6}{(G_s - 1)^3 \text{sen}^3(\phi - \theta)} \quad (19)$$

Donde:

- W : masa de roca mínima teórica que resiste las fuerzas de flujo de agua y permanece estable en la pendiente de la orilla del río, lb
- G_s : gravedad específica
- γ_s : peso específico de la partícula, lb/pie³
- V : velocidad media, pies/s
- ϕ : 70 (°) para escombros colocados al azar, una constante
- θ : ángulo de inclinación del talud (°)

Si se asumen rocas esféricas, el diámetro puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$D_{50} = \left(\frac{6W}{\pi \cdot \gamma_s} \right)^{1/3} \quad (20)$$

Método United States Army Corps of Engineers

La ecuación para el cálculo del tamaño representativo de la roca según la USACE

(1994):

$$D_{30} = S_f \cdot C_s \cdot C_v \cdot C_T \cdot d \cdot \left[\left(\frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \right)^{1/2} \cdot \frac{V}{\sqrt{K_1 \cdot g \cdot d}} \right]^{2.5} \quad (21)$$

Donde:

S_f : factor de seguridad

C_s : coeficiente de estabilidad para fallo incipiente

C_v : coeficiente de distribución de velocidad vertical

C_T : coeficiente de espesor del manto

d : tirante de flujo

γ_w : peso específico del fluido

γ_s : peso específico de la roca

V : velocidad media local, V_{ss} para protección de escollera en talud

K_1 : factor de corrección del talud, el cual se expresa mediante la relación

de Carter, Carlson y Lane (1953):

$$K_1 = \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2 \theta}{\text{sen}^2 \phi}} \quad (22)$$

θ : ángulo que forma el talud respecto a la horizontal (°)

ϕ : ángulo de fricción interna (°)

Los factores de corrección C presentadas en la fórmula anterior se determinan en base a ciertas características de roca y cauce mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6*Condiciones de roca y canal para los coeficientes de corrección*

Condición	Coeficiente
	C_s : estabilidad para fallo incipiente
para rocas angulares	0.30
para rocas redondeadas	0.375
	C_v : distribución vertical de velocidad
cauces rectos y parte interior de curvas	1.00
para parte exterior de curvas	$1.283 - 0.2 \log(R/W)$
para aguas debajo de canales de hormigón	1.25
para final de terraplén	1.25
	C_t : espesor
para espesores = $1 \times D_{100}$ (máx.) o $1.5 \times D_{50}$ (máx.)	1.00

Nota. Adaptado de *Hydraulic Design of Flood Control Channels*, USACE, 1994.

2.3.2.6 Espesor del Enrocado

Determinado por los siguientes criterios establecidos por la USACE (1994):

- El espesor no debe ser inferior al diámetro D_{100} esférico de la roca o menor a $1.5D_{50}$.
- El espesor debe aumentar en un 50% cuando la escollera se coloca bajo el agua.

2.3.2.7 Ancho de Cresta

Según la JICA (2010) el ancho de cresta se puede basar en el caudal de diseño tomando los valores mostrados en la Tabla 7.

Tabla 7*Ancho de cresta del dique*

Caudal máximo (m ³ /s)	Ancho (m)
< 500	3
500 – 2,000	4
2,000 – 5,000	5
5,000 – 10,000	6
> 10,000	7

Nota. Adaptado de *Technical Standards and Guidelines for Design of Flood Control Structures*, por JICA, 2010, p. 6.

El ancho de la cresta tiene que estar diseñado para múltiples propósitos. La adopción de un ancho deberá ofrecer facilidades de acceso vial, para la construcción, inspección y mantenimiento de la obra; por ejemplo, una cresta más ancha permite mejorar el soporte de equipos pesados, cuando las ruedas andan cerca de los hombros del dique, los bordes pueden asentarse y fallar (Golder Associates & Associated Engineering, 2003).

2.3.2.8 Anchos de Uña

En diversas literaturas, se recomienda establecer el ancho superior de uña con la siguiente expresión:

$$A = 1.5 \cdot e \quad (23)$$

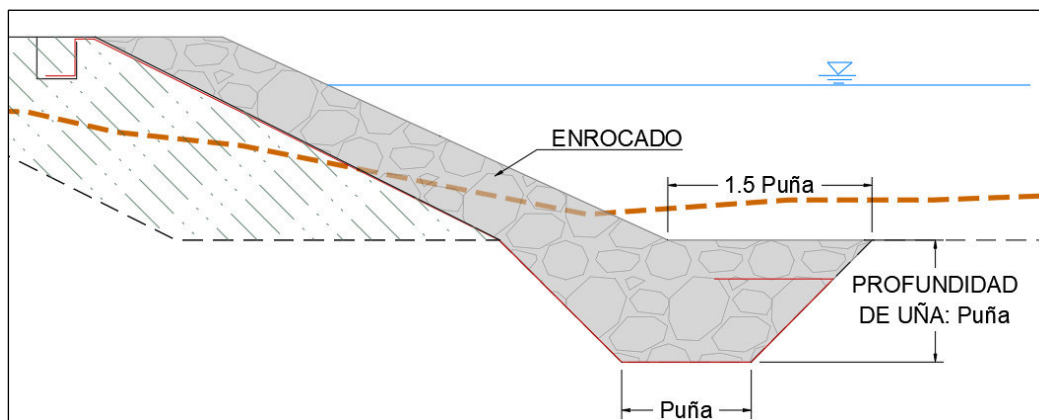
Donde:

A : ancho superior del enrocado en la base (m)

e : profundidad de uña adoptada (m)

Figura 12

Esquema de uña antisocavante



Nota. El ancho inferior obtiene como mínimo el valor de la *Puña*. Elaboración propia

2.3.2.9 Talud del Dique

Siguiendo las recomendaciones de la JICA (2010) y Golder Associates & Associated Engineering (2003) para el diseño de diques, el talud para los diques con protección de enrocado debe ser como mínimo 2H:1V, sin embargo, cuando la altura de coronación es superior a los 6 metros, el talud será más suave que 3H:1V.

2.4 Glosario

Con la finalidad de brindar un entendimiento simplificado para el lector del presente texto que no se encuentra familiarizado con los conceptos o terminología del tema de la monografía, se presenta el siguiente glosario de términos:

Dique: estructura de forma trapezoidal que se emplaza en el cauce longitudinalmente en sus riberas con el objetivo de proteger contra desbordes de inundación durante la crecida máxima del río.

Terraplén: cuerpo del dique conformado generalmente con el mismo material del río.

Ancho estable: concepto de hidráulica fluvial que consiste en una sección ideal del cauce debido a características geomorfológicas que el propio río alcanza en estado de equilibrio a lo largo del tiempo.

Cresta: Ancho de la parte superior del dique que el agua no debe alcanzar durante la avenida máxima. Generalmente, el ancho coincide con el reglamentario para el acceso vehicular o si no debe ser suficiente para la circulación de vehículos de mantenimiento para el río y sus estructuras si lo hubiera.

Talud: es la inclinación determinada por la forma trapezoidal del terraplén, el talud que está en contacto con el agua suele revestirse con protección de enrocado para evitar daños y/o desgastes por la acción erosiva del agua.

Peso específico: es una propiedad intrínseca de los materiales que indica el peso o la fuerza que ejerce mediante la gravedad de la tierra la unidad del metro cúbico del mismo.

Diámetro de enrocado: es el diámetro nominal de un bloque de roca idealmente esférico que se utiliza para determinar el tamaño de roca aproximado a ser colocado como revestimiento en el talud protegido del dique.

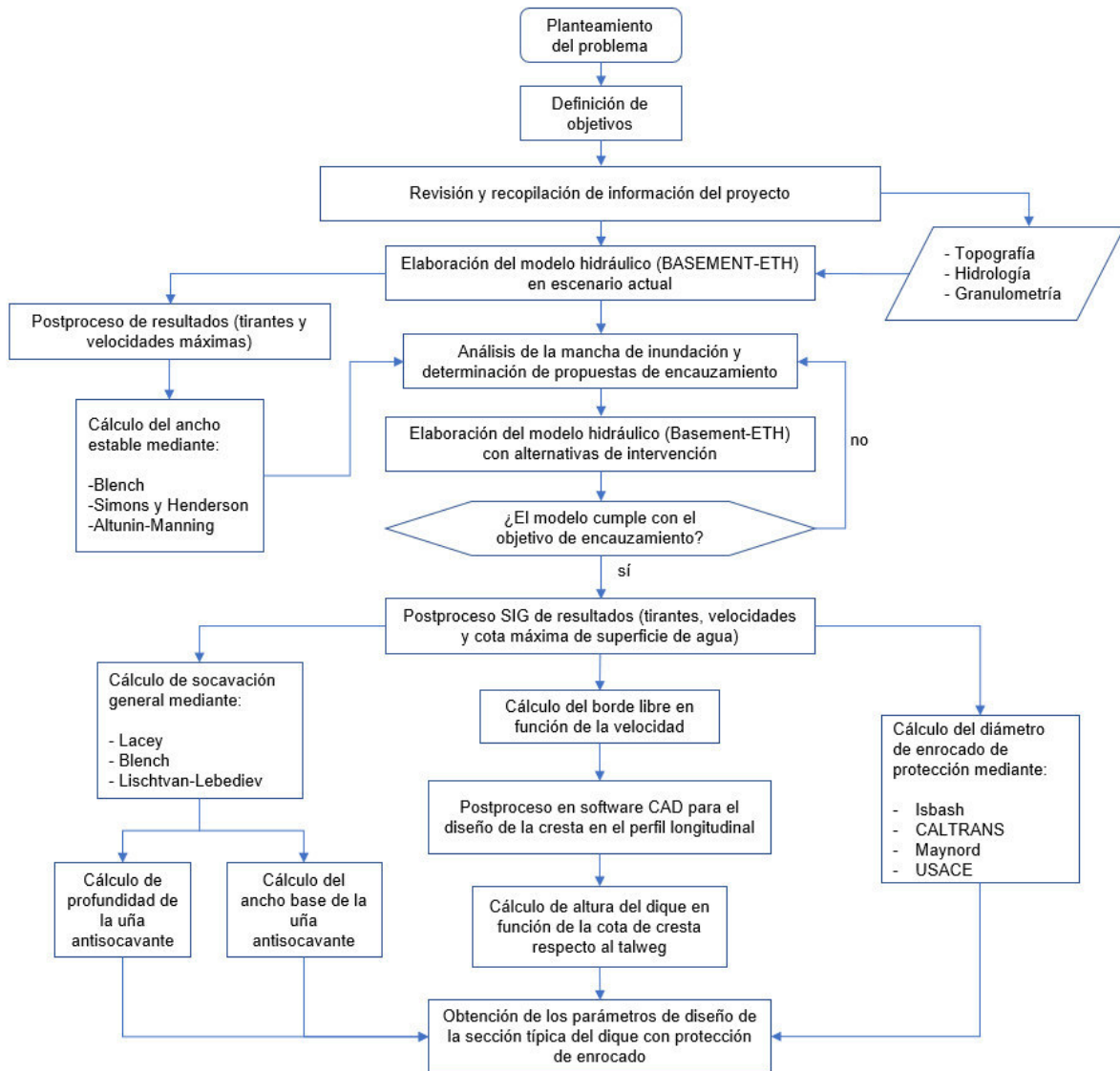
Uña antisocavante: parte inferior no visible del dique situado en el propio cauce del río que inicia en el pie del talud hasta un nivel de profundidad determinada en base a la estimación de la socavación que se pueda producir durante el desarrollo de la avenida máxima.

Capítulo III. Proceso Metodológico

En la siguiente figura, se muestra la metodología de trabajo como parte del procedimiento planteado para el diseño hidráulico del dique con protección enrocado en el río Matagente del Valle de Chincha.

Figura 13

Diagrama de flujo para el diseño hidráulico de la sección típica del dique



Nota. Elaboración propia

3.1 Ubicación del Proyecto

El río Matagente se ubica en el sur del Perú comprendido entre las coordenadas geográficas:

Latitud Sur: 13°31'37" – 13°26'24"

Longitud Oeste: 76°11'20" – 75°58'31"

Ubicación política:

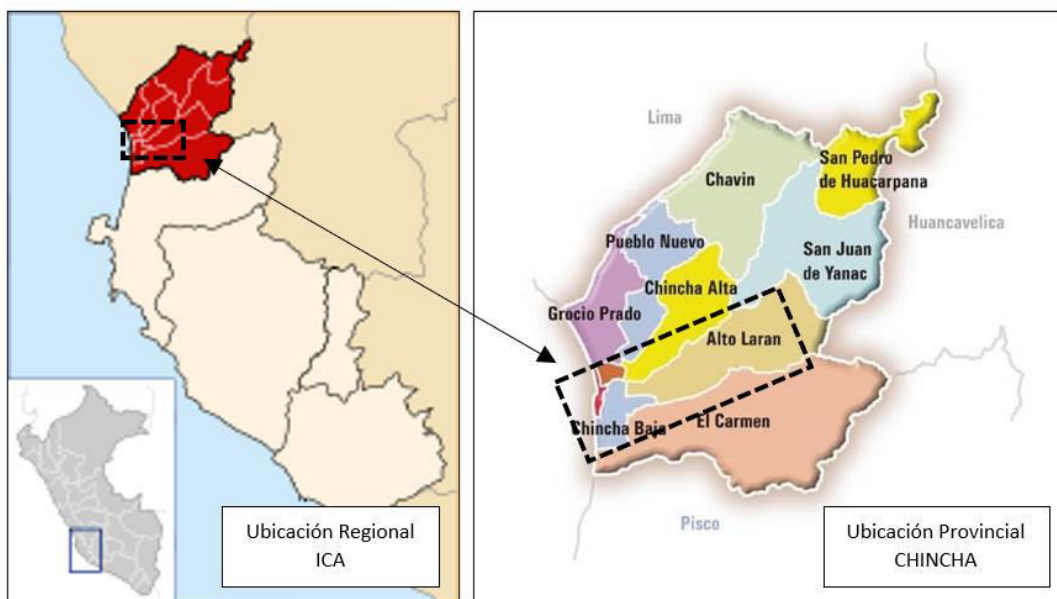
Departamento: Ica

Provincia: Chincha

Distritos: Chincha Alta, Chincha Baja, Alto Laran, El Carmen

Figura 14

Ubicación política del caso de aplicación: Río Matagente - Chincha



Nota. Elaboración propia

El acceso a la zona del proyecto desde Lima se puede lograr vía terrestre tomando la panamericana Sur hasta llegar al Km 180 cruzando en primer lugar por el río Chico y posteriormente llegando al puente Chincha II, que cruza al río Matagente.

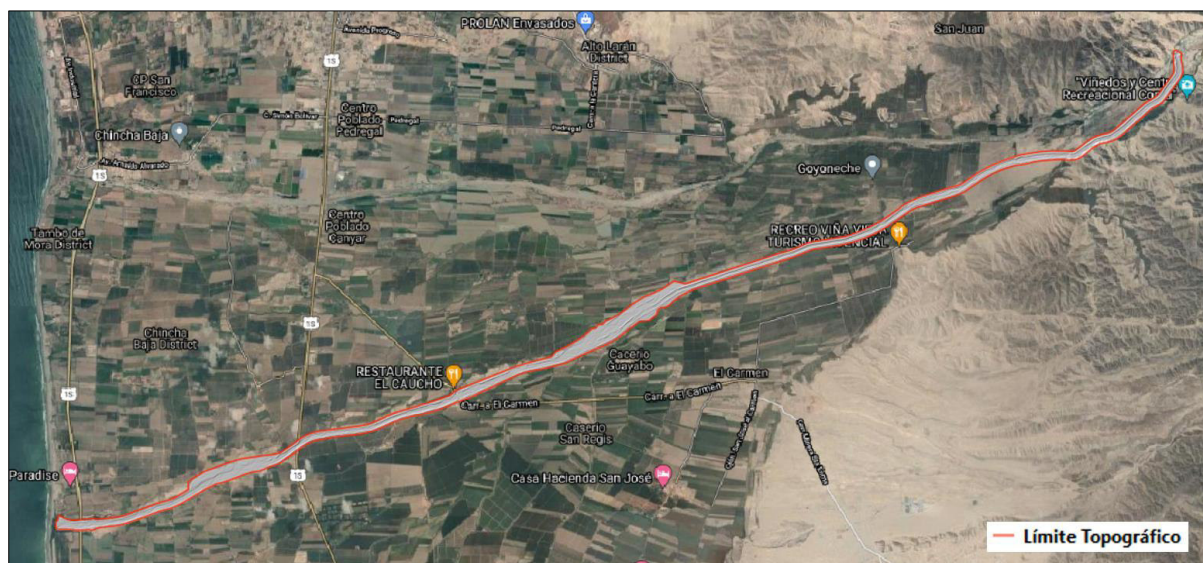
3.2 Descripción de los Datos de Trabajo

3.2.1 Topografía

Para el caso de estudio, se dispone de un área topográfica alrededor de los 5.34 km² en formato ráster a una resolución de 0.20x0.20m en el lecho del río y para la llanura inundable un área mayor, pero de menor resolución de 1x1m. La Figura 15 muestra la topografía de alta calidad del cauce disponible para la simulación del flujo.

Figura 15

Imagen topográfica del cauce con fina resolución para el modelo hidráulico



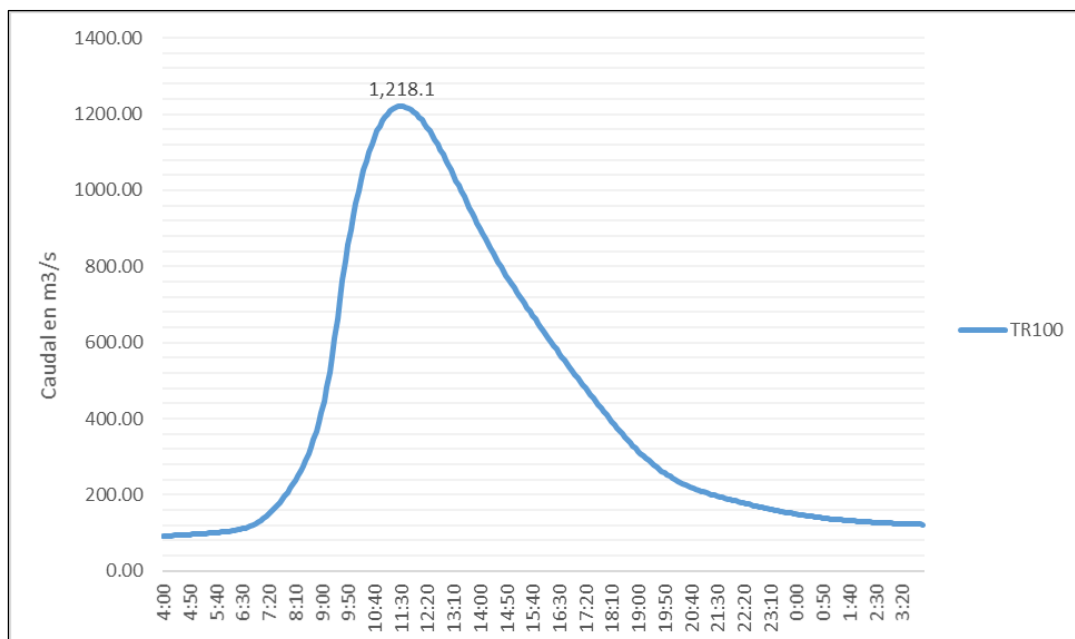
Nota. Elaborado con imágenes satelitales de Google Earth.

3.2.2 Hidrología

Se cuenta con el hidrograma de caudales como información de partida en el punto aguas arriba de la bifurcación del río San Juan, donde nace el río Matagente, que alcanza un pico máximo de $1218.10 \text{ m}^3/\text{s}$ asociado a una probabilidad de ocurrencia de 100 años que a su vez será el periodo de diseño. Para el ingreso de datos en el río Matagente, se considerará el 50% de los valores del hidrograma del río San Juan. En la actualidad, existe la estructura “Partidor Conta” que realiza esta división de caudales, se encuentra en malas condiciones y no cumple la repartición adecuada, sin embargo, el estado peruano tiene planificado construir un nuevo partidor que cumpla eficientemente con esta repartición al 50%. Dada esta información, se define este porcentaje bajo la suposición de la existencia de un nuevo partidor, por lo cual, el caudal pico de diseño para el presente trabajo será de $609.05 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 16

Hidrograma de caudales aguas arriba del Partidor Conta – TR 100 años



Nota. El caudal pico y/o hidrograma de diseño para el río Matagente será la mitad de los valores de este hidrograma. Elaboración propia.

3.2.3 Granulometría

Se cuenta con el resultado de dos ensayos de análisis granulométrico por tamizado de la zona de estudio a fin de determinar el diámetro característico para los cálculos de socavación general.

Tabla 8

Datos tabulares de los ensayos de granulometría extendida

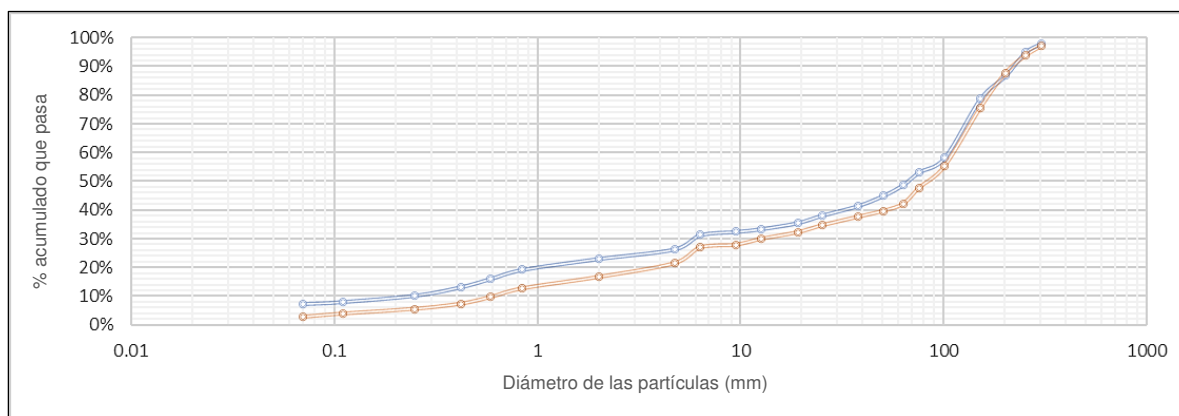
Tamiz	Tamaño (mm)	Pasantes (%)		Promedio
		MTG-1	MTG-2	
12"	304.8	97.96	97.09	97.53
10"	254	94.78	93.68	94.23
8"	203	86.69	87.75	87.22
6"	152.4	78.65	75.61	77.13
4"	101.6	58.11	55.29	56.7
3"	76.2	53.19	47.74	50.47
2" 1/2	63.5	48.71	42.13	45.42
2"	50.8	45.03	39.67	42.35
1 1/2"	38.1	41.49	37.59	39.54
1"	25.4	38.16	34.64	36.4
3/4"	19.1	35.53	32.2	33.87
1/2"	12.7	33.44	29.9	31.67

Tamiz	Tamaño (mm)	Pasantes (%)		
		MTG-1	MTG-2	Promedio
3/8"	9.52	32.49	27.86	30.18
1/4"	6.35	31.33	26.93	29.13
Nº4	4.76	26.42	21.46	23.94
Nº10	2	23.05	16.61	19.83
Nº20	0.84	19.24	12.63	15.94
Nº30	0.59	16.13	9.65	12.89
Nº40	0.42	13.24	7.31	10.28
Nº60	0.25	10.31	5.55	7.93
Nº100	0.11	8.09	3.86	5.98
Nº200	0.07	7.38	2.72	5.05

Nota. Resultados de ensayos granulométricos obtenidos en el río Matagente

Figura 17

Curvas granulométricas de los ensayos – río Matagente



Nota. El diámetro para utilizar en cálculos de socavación es de 60 mm. Elaboración propia.

3.3 Instrumentos de Trabajo

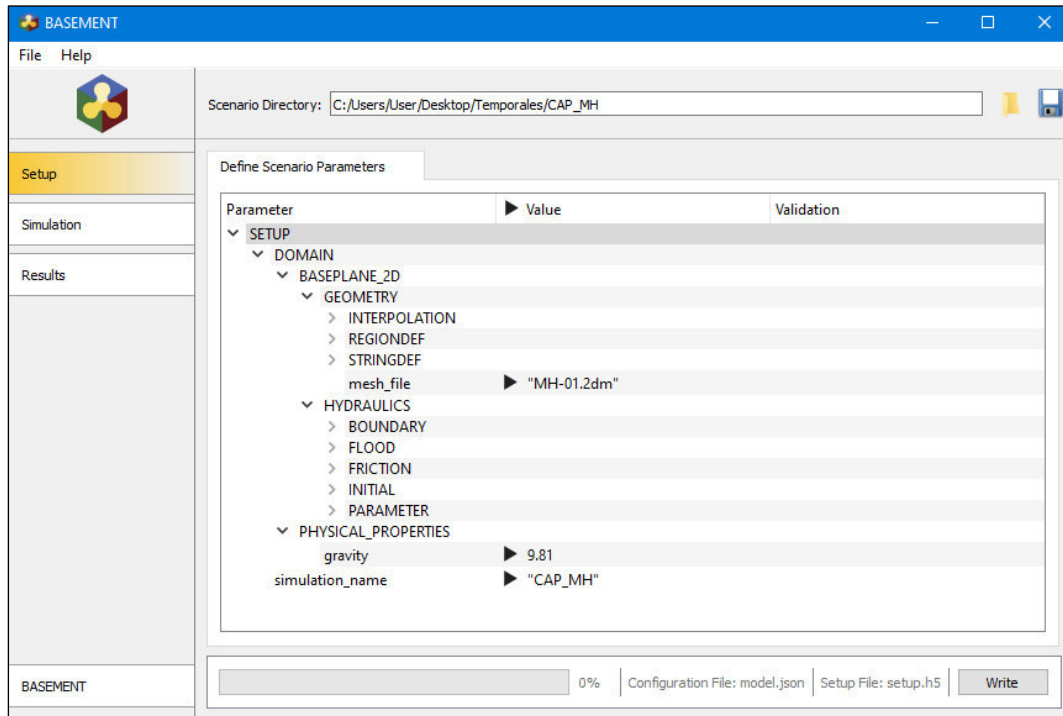
3.3.1 Modelo Hidráulico: BASEMENT-ETH

Para la simulación numérica del río se utilizará el modelo bidimensional de volúmenes finitos BASEMENT–Basic Simulation Environment de licencia gratuita, el cual tiene la capacidad de modelar el tránsito del flujo de agua líquida sobre una malla de cálculo no estructurada, que permite una descripción precisa de morfologías fluviales complejas, previamente elaborada en un complemento llamado BASEmesh, una herramienta para usarse en QGIS. BASEMENT permite realizar simulaciones numéricas de flujos de agua en topografías complejas, tales como áreas rurales, urbanizadas y planicies de inundación. Como datos de entrada, el modelo requiere la malla computacional (generada con

información topográfica), condiciones de borde predefinidas, valores definidos de rugosidad y tamaños de celda, hidrogramas de entrada, configuración de simulación y datos específicos de salida.

Figura 18

Interfaz del software BASEMENT



Nota. La interfaz define tres componentes: *Setup*, dónde se configuran los parámetros topográficos e hidráulicos; *Simulation*, para definir los cálculos hidráulicos y opciones computacionales; y *Results*, para exportar los resultados del modelo.

3.3.1.1 Módulo Hidrodinámico

BASEMENT-ETH resuelve las ecuaciones de Saint Venant que gobiernan el comportamiento del flujo de aguas poco profundas. El sistema de ecuaciones impone el principio de conservación de masa y de la conservación del impulso para canales abiertos.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = S_h$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2} g h^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + g h (S_{bx} + S_{fy}) = 0$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y q_x}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2} gh^2 \right) + gh(S_{by} + S_{fy}) = 0$$

Donde:

h : tirante del flujo, m

g : aceleración de la gravedad, m/s^2

$u(v)$: velocidad promediada en profundidad en la dirección $x(y)$, m/s

$q_x(q_y)$: caudal unitario en dirección $x(y)$, m^2/s

S_h : flujo de entrada/salida por unidad de ancho, m/s

$S_{fx}(S_{fy})$: términos de fricción en la dirección $x(y)$

3.3.1.2 Capacidades del Modelo

BASEMENT-ETH ha sido elegido para el presente trabajo debido a las siguientes cualidades del modelo:

- Fue desarrollado por la Escuela Politécnica Federal de Zurich, destacada en investigación a nivel internacional; el software es libre y cuenta con amplia documentación, manuales de usuario y referencias técnicas (<https://basement.ethz.ch/>).
- El modelo tiene aplicaciones en hidrodinámica fluvial, propagación de ondas de inundación, rotura de presas, transporte de sedimentos. Su capacidad de modelar flujos no transitorios y diferentes regímenes de flujo en canales abierto lo hace adecuado para simulaciones fluviales en contexto de ríos de valle y montaña.
- BASEMENT-ETH brinda flexibilidad para generar la malla computacional, que se realiza en QGIS, mediante la extensión BASEmesh.
- El software adopta una estrategia de paralelización adaptada a la aceleración de cálculo en mallas no estructuradas haciendo uso de diferentes backends como las tarjetas GPU, lo que permite la simulación de grandes dominios computacionales (millones de celdas) reduciendo significativamente los tiempos de simulación.

3.3.1.3 Justificación del Empleo del Modelo BASEMENT-ETH

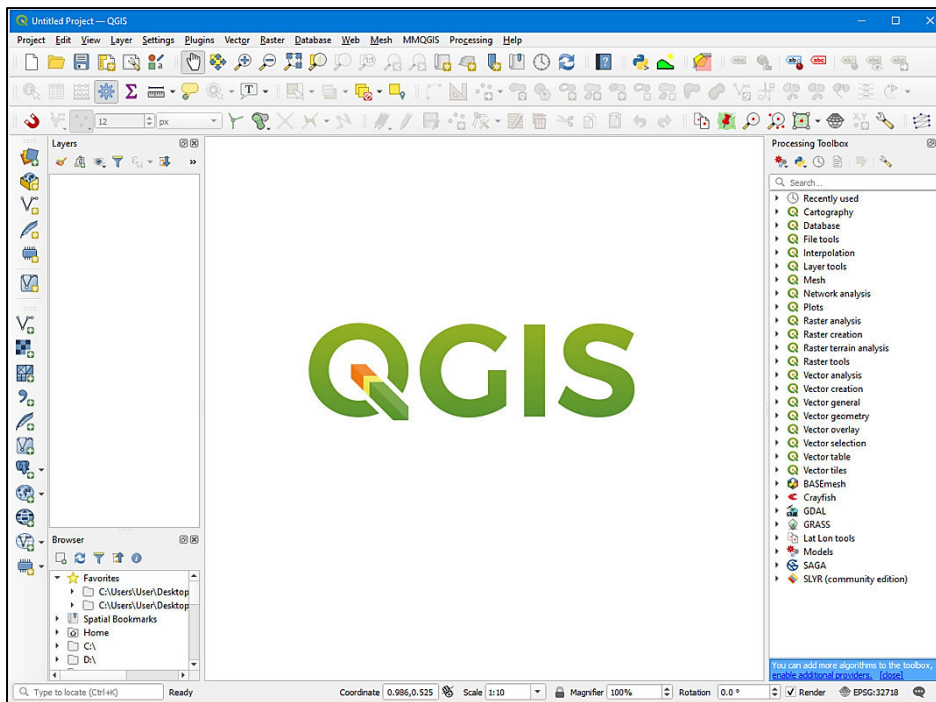
Como primer punto importante frente a la diversidad de modelos numéricos a disposición de la comunidad de modeladores fluviales, BASEMENT-ETH se suma al grupo de programas de licencia gratuita, lo que se traduce en un acceso libre al uso de este software para distintos fines de investigación. El modelo no se caracteriza por ser comercial o de frecuente uso por la comunidad de modeladores, sin embargo, no deja de ser un software con amplia variedad para la simulación de diversos escenarios hidrodinámicos, morfodinámicos y de advección-difusión escalar de manera eficiente a la par de programas como HEC-RAS, iBER, RiverFlow2D, FLO-2D, entre otros. Es posible que el entorno de trabajo de BASEMENT sea visto como una de sus grandes desventajas ya que carece de una sofisticada interfaz gráfica de usuario (GUI), contrario al caso de HEC-RAS o de iBER teniendo una de las más preferidas, debido a la facilidad que brinda al usuario para ejercer su respectivo flujo de trabajo, no obstante y desde otro punto de vista, un programa liviano es sinónimo de menor carga computacional en el flujo de trabajo, además BASEMENT brinda flexibilidad en la elaboración de la malla de cálculo permitiendo una configuración más personalizada y sin restricciones a diferencia del resto programas mencionados. Dado un dominio suficientemente grande, el software muestra una buena eficiencia paralela en la CPU y una aceleración aún mayor cuando se usan GPU, la explotación de estos procesadores representa una de las grandes ventajas frente a otros softwares de licencia gratuita que no lo permiten, garantizando tiempos muy reducidos de trabajo durante el desarrollo de cualquier tipo de proyecto. En conclusión, la combinación de diferentes procesos fluviales que se pueden modelar, la eficiencia computacional, la flexibilidad en la configuración de la malla, la disposición de una GUI liviana, hacen que BASEMENT sea una herramienta totalmente valiosa para el uso de simulaciones hidráulicas tanto para fines académicos como para proyectos de gran importancia.

3.3.2 Sistema de Información Geográfica: Quantum GIS

Los resultados del modelo hidráulico BASEMENT-ETH deben ser procesados en un entorno que permita trabajar con sus archivos exportados de tipo ráster. Para aprovechar esta *bidimensionalidad* de los resultados hidráulicos, se ha optado por utilizar el Quantum GIS, un software de código abierto y de licencia gratuita que brinda numerosas herramientas para el postproceso del modelado numérico. Una de las herramientas más importantes es la Calculadora Ráster, el cual se utilizará para el cálculo de la socavación general.

Figura 19

Interfaz gráfica de usuario de QGIS



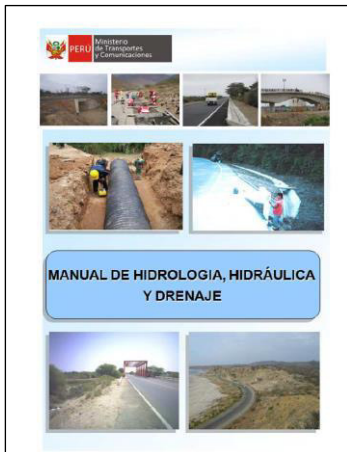
Nota. QGIS puede trabajar en plataformas como GNU/Linux, Mac OS, Android, etc.

3.3.3 Normatividades

Es importante destacar que en el país existen manuales o guías de referencia para tomar en cuenta en el diseño de obras hidráulicas, siendo las mostradas en las siguientes figuras:

Figura 20

Manual de Hidrología, Hidráulica y Drenaje



Nota. Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) del Perú.

El Manual del MTC, es uno de los principales documentos de referencia de profesionales que ejercen oficio en las especialidades de Hidrología, Hidráulica o Drenaje, sin embargo, existen numerosas metodologías en el desarrollo de cada tema que no están expuestas en este documento, lo cual significa una limitación. Por otro lado, existe la guía de Protección frente a Inundaciones del MEF, un documento más enfocado en obras de protección, pero presenta poca o nulas referencias bibliográficas que permiten entender el fundamento de la metodología o fórmula descritas en su sección de diseño.

Figura 21

Guía de Protección frente a inundaciones



Nota. Fuente: Ministerio de Economía y Finanzas (MEF) del Perú

3.4 Cálculos fundamentales

3.4.1 Coeficientes de Fricción del Cauce y Llanuras de Inundación

El cálculo de valor mínimo y máximo del factor de fricción de Manning para el cauce del río Matagente sigue la metodología descrita en el numeral 2.2.1.1.

Figura 22

Lecho característico del río Matagente



Nota. Fotografía obtenida in situ.

Considerando un material de lecho con grava de tamaños predominantes en un rango de 16mm – 128 mm de acuerdo con los ensayos granulométrico y evidenciados en la Figura 22, se obtiene el cálculo promedio y adoptado en el coeficiente de fricción Manning de 0.04. En la siguiente tabla se presentan los parámetros definidos y resultados del método de Cowan.

Tabla 9

Método de Cowan para el cálculo de coeficiente de Manning del lecho del río Matagente

Parámetro	Característica	mín.	máx.
n_o	Gravas	0.028	0.036
n_1	Menor	0.001	0.005
n_2	Gradual	0	0
n_3	Despreciable	0	0.004
n_4	Baja	0.002	0.010

Parámetro	Característica	mín.	máx.
m	Menor	1	1
n	$n = (n_o + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m$	0.031	0.055
	Promedio		0.04

Nota. Elaboración propia.

El ajuste de este valor calculado, en el ejercicio profesional de un proyecto real, se consigue mediante la calibración y validación del modelo hidráulico, sin embargo, este procedimiento se encuentra limitado en el presente trabajo, por lo cual se tomará el valor promedio para este caso de aplicación. La asignación de los factores de fricción de Manning de las llanuras inundables tuvo como base los valores recomendados por Chow (1959) en su libro *Hidráulica de Canales Abiertos*.

Figura 23

Coeficientes de rugosidad recomendados según tipo de superficie

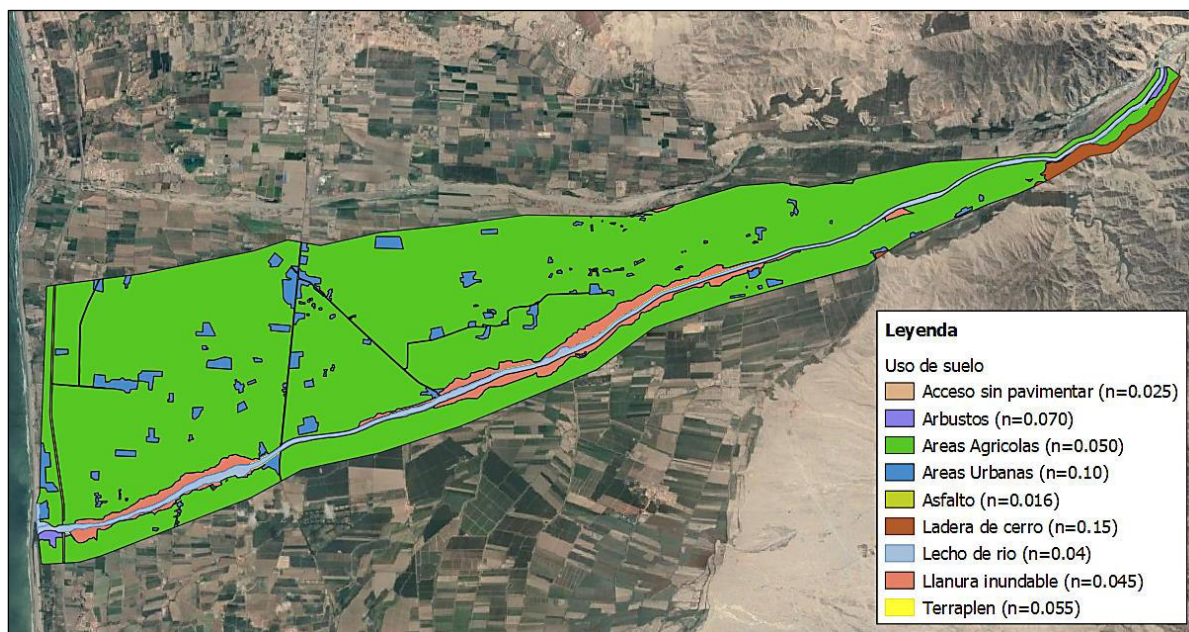
Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<i>b.</i> Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
<i>a.</i> Pastizales, sin matorrales			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<i>b.</i> Áreas cultivadas			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<i>c.</i> Matorrales			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160
<i>d.</i> Árboles			
1. Sauces densos, rectos y en verano	0.110	0.150	0.200
2. Terreno limpio, con troncos sin retoños	0.030	0.040	0.050
3. Igual que el anterior, pero con una gran cantidad de retoños	0.050	0.060	0.080
4. Gran cantidad de árboles, algunos troncos caídos, con poco crecimiento de matorrales, nivel del agua por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
5. Igual al anterior, pero con nivel de creciente por encima de las ramas	0.100	0.120	0.160
D-3. Corrientes mayores (ancho superficial en nivel de creciente > 100 pies). El valor de n es menor que el correspondiente a corrientes menores con descripción similar, debido a que las bancas ofrecen resistencia menos efectiva.			
<i>a.</i> Sección regular, sin cantos rodados ni matorrales	0.025	0.060
<i>b.</i> Sección irregular y rugosa	0.035	0.100

Nota. Adaptado de *Hidráulica de Canales Abiertos*, por V. T. Chow, 1994, p 108-110. Copyright © 1994, por Mc Graw-Hill Interamericana S.A.

La clasificación de los usos de suelo se realizó mediante el reconocimiento visual y supervisado (no automatizado) de patrones característicos del suelo con imágenes satelitales del Google Earth. La Figura 24 presenta el resultado de la clasificación de usos del suelo y los factores de fricción adoptados.

Figura 24

Mapa de usos del suelo y rugosidad de Manning



Nota. Elaboración propia

Los valores de Manning adoptados se resume en la Tabla 10.

Tabla 10

Factores de fricción adoptados para cada uso de suelo

Uso de suelo	Coefficiente de Manning
Acceso sin pavimentar	0.025
Arbustos	0.070
Áreas Agrícolas	0.050
Áreas Urbanas	0.100
Asfalto	0.016
Ladera de cerro	0.150
Lecho de río	0.040
Llanura inundable	0.045
Terraplén	0.055

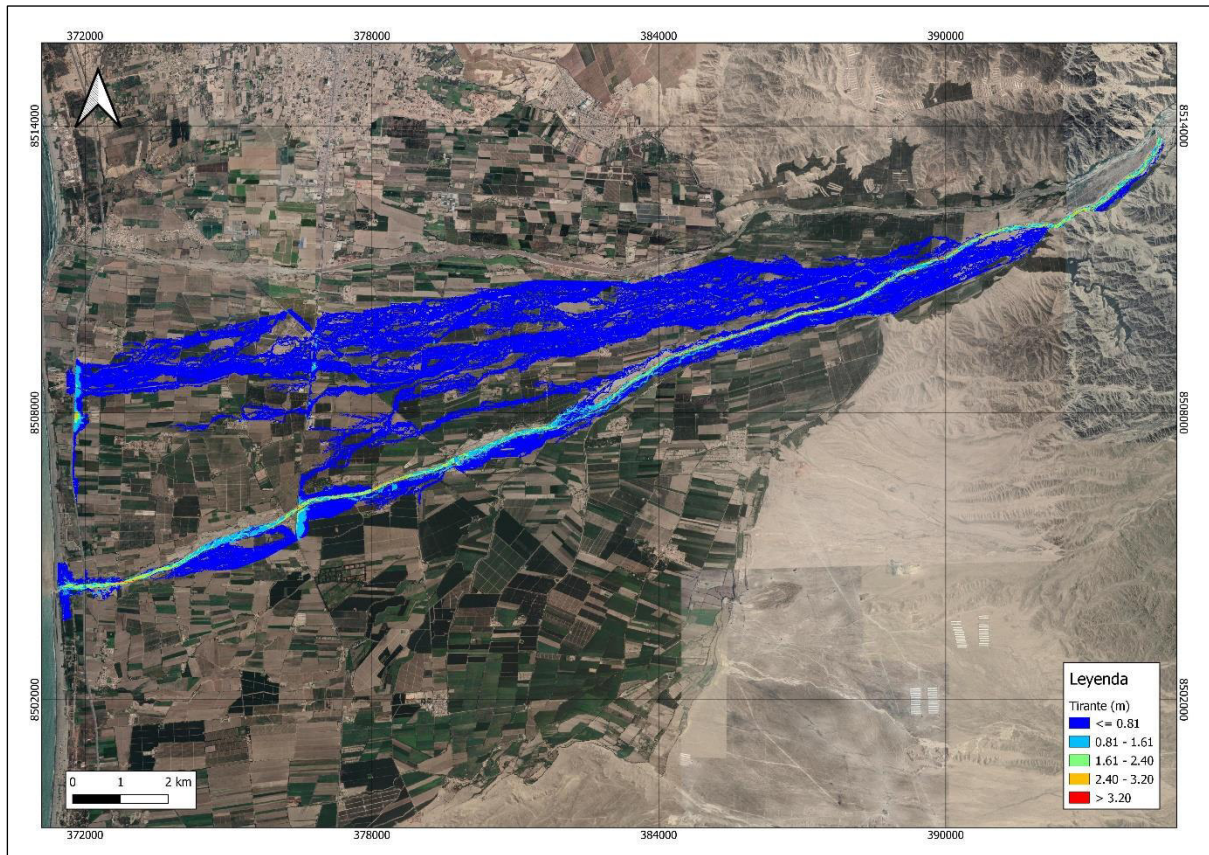
Nota. Los valores de las llanuras de inundación fueron tomados de los coeficientes de rugosidad recomendados en *Hidráulica de Canales Abiertos* (Chow, 1959).

3.4.2 Modelo Numérico del Escenario en Condición Actual

La Figura 25 presenta la mancha de inundación máxima asociada al hidrograma de diseño descrito.

Figura 25

Mancha de inundación máxima en el río Matagente – Escenario sin proyecto



Nota. Elaboración propia.

Se han identificado nueve zonas de desborde de gran impacto, por lo que, conforme a la metodología expuesta, se emplazan los diques en los lugares de exigencia siguiendo los criterios previamente mencionados: respetar la faja marginal, proyectar sobre el eje de diques existentes para minimizar movimientos de tierra, considerar el ancho estable del río, minimizar afectación urbana, predial o agrícola si lo hubiera, entre otros.

3.4.3 Estimación del Ancho Estable

La pendiente media del río es del 1% con fluctuaciones en pequeños tramos que van desde el 0.5 % al 1.5 % cuyos valores se encuentran en el orden esperado, ya que el río se encuentra en un valle plano. El valor adoptado del coeficiente manning para el cauce es de

0.04, estimado en base al método de Cowan, caracterizado por presencias de gravas de mediano tamaño bien graduadas según la granulometría y corroborada con la fotografía obtenida in situ. Siguiendo los métodos expuestos en el numeral 2.2.1.2, y considerando el caudal pico expuesto en el apartado de hidrología, la Tabla 11 presenta el resumen de los cálculos de ancho estable.

Tabla 11

Resultado de ancho estable según metodología

Simons y Henderson		
$b_m = K_1(Q)^{1/2}$		
<i>Condición del canal</i>	K_1	$b_m(m)$
Lecho y márgenes de grava	2.9	71.57
Altunin – Manning		
$b_m = \frac{Q^{0.5} (n \cdot K^{5/3})^{\frac{3}{3+5m}}}{S^{0.2}}$		
<i>Factor de fricción de Manning</i>		$b_m(m)$
Descripción	n	
Flujo con gravas = 0.040 – 0.036	0.04	
<i>Material del cauce</i>		
Descripción	K	78.18
Cauce aluvial = 8 a 12	10	
<i>Coefficiente de tipo de río</i>		
Descripción	m	
Canales aluviales	1	
Blench		
$b_m = 1.81 \left(\frac{F_b Q}{F_s} \right)^{1/2}$		
Factores		$b_m(m)$
<i>Corrección de fondo</i>	F_b	
De lecho con partículas gruesas	1.2	109.42
<i>Corrección de orilla</i>	F_s	
Medianamente cohesivo	0.2	

Nota. Los cálculos tienen como base el caudal de diseño de 609.05 m³/s y una pendiente del 1%.

El promedio de los valores del ancho de sección estable es de 86.4 m. El río Matagente se asemeja a las condiciones observadas por Altunin (1962) para la formulación del cálculo de ancho estable, siendo cauces con material granular conformado con gravas y bolonería, todo lo contrario, al resto de formulaciones que estudiaron principalmente canales

de riego (Maza & García, 2018). Dicho esto, el método complejo de tres grados de libertad de Altunin es el más adecuado para este caso de aplicación, por cual se opta por un valor cercano al resultado de este método siendo de 85 m.

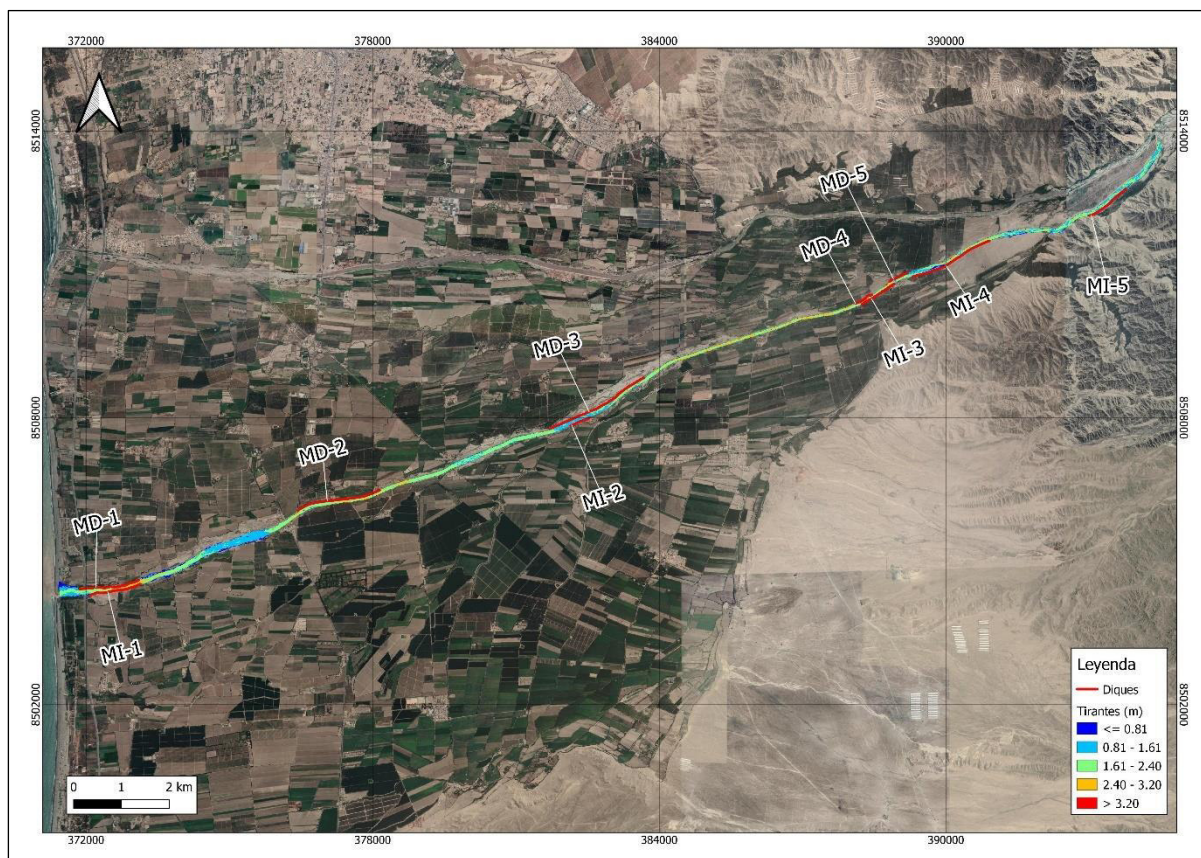
3.4.4 Escenario con Diques Proyectados

La proyección de las defensas ribereñas requiere de la evaluación de diversos escenarios con proyecto en los que se itera para su emplazamiento definitivo. La disposición de diques preliminares en un tramo inicial repercute en el tirante máximo aguas debajo de este tramo porque se añade todo el volumen de agua que se ha restado por el desborde en el tramo inicial de un escenario antecedente. Esto genera nuevos desbordes en los tramos posteriores al explotar su capacidad hidráulica lo cual exige que se modele nuevamente hasta conseguir defender el tramo total del río. En este caso de aplicación, para efectos prácticos estos diques se ingresan en el modelo como “paredes infinitas” que BASEMENT permite incluir mediante *holes* en la malla computacional. Hecho este ejercicio iterativo, la Figura 26 muestra el emplazamiento definitivo de las defensas ribereñas y el resultado de la mancha de inundación máxima.

Es recomendable conocer si existen otras de defensas ribereñas dentro de la cartera de proyectos de quién gestiona las obras en el río Matagente a fin de no repetir el planteamiento de los diques en lugares donde posiblemente ya se hayan proyectado y/o estén en etapa de construcción.

Figura 26

Mancha de inundación máxima en el río Matagente – Escenario con proyecto



Nota. Elaboración propia.

La figura mostrada evidencia el correcto encauzamiento del río Matagente debido al emplazamiento de un total de 10 tramos de protección, la Tabla 12 detalla la ubicación de los diques.

Tabla 12

Ubicación y longitud de los diques de protección

Tramo	Coordenadas Datum: WGS 84 / Proyección: UTM-18S				Longitud
	ESTE		NORTE		
	inicio	fin	inicio	fin	
MD-1	373104.91	371859.52	8504608.14	8504418.49	1280.10
MD-2	378146.58	376444.48	8506484.22	8506060.65	1775.18
MD-3	383673.3	381699.87	8508837.27	8507767.22	2262.82
MD-4	388450.86	388108.19	8510572.14	8510389.1	396.78
MD-5	389200.78	388820.79	8511030.25	8510843.89	428.60
MI-1	373127.35	372069.21	8504519.58	8504280.25	1097.45
MI-2	382548.21	382143.05	8508008.13	8507836.14	440.84

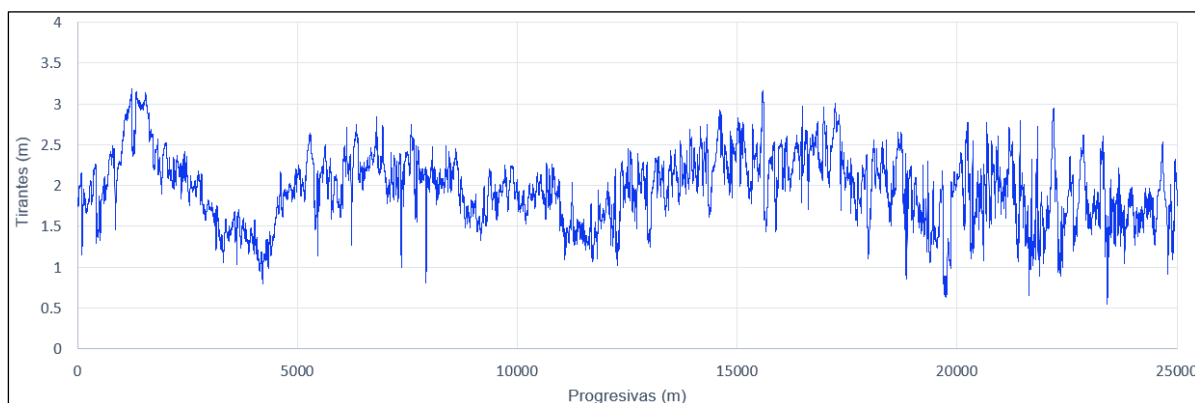
Tramo	Coordenadas Datum: WGS 84 / Proyección: UTM-18S				Longitud
	ESTE		NORTE		
	inicio	fin	inicio	fin	
MI-3	388916.54	388242.59	8510799.61	8510367.51	802.41
MI-4	390910.88	389298.32	8511698.89	8510950.18	1794.32
MI-5	393762.31	393003.17	8512791.07	8512229.7	954.35

Nota. Los valores mostrados están en metros.

A lo largo del eje del río el valor promedio del tirante es de 2 m y de la velocidad es de 4.2 m/s. La Figura 27 y Figura 28 presenta los perfiles longitudinales de estos valores.

Figura 27

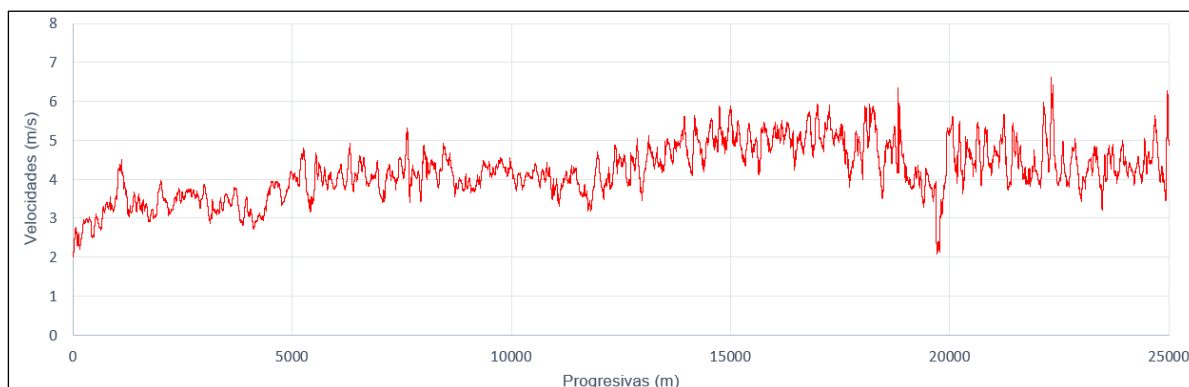
Perfil longitudinal de tirantes máximos



Nota. Las progresivas del eje del río inician en su desembocadura, en el océano pacífico, hasta el partidor Conta ubicada en la bifurcación del río San Juan.

Figura 28

Perfil longitudinal de velocidades máximas



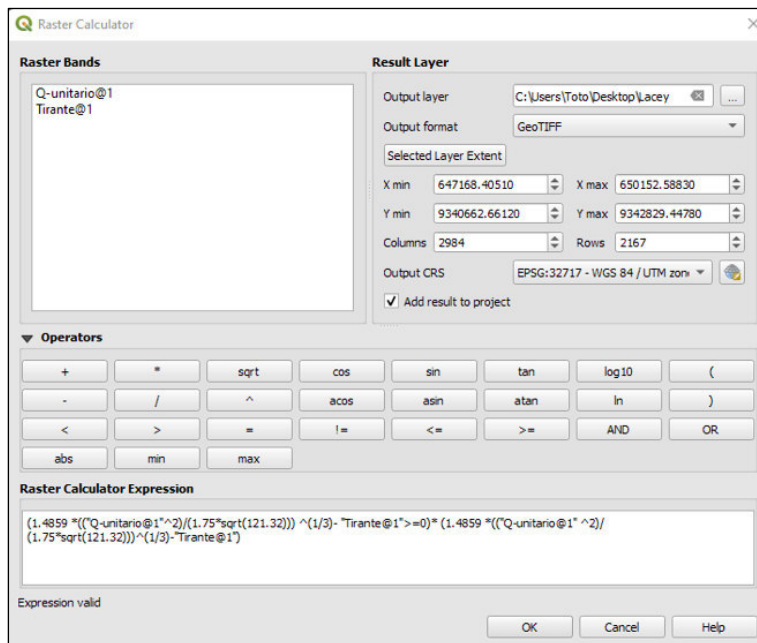
Nota. Los valores de velocidad muestran una tendencia positiva a medida que se acerca a la naciente del río.

3.4.5 Proceso de Cálculo de Socavación General

El cómputo de la socavación general se realiza mediante el uso de los resultados bidimensionales de la modelización hidráulica, es decir tirantes y velocidades de la mancha de inundación máxima. El proceso de cálculo consiste en una operación realizada mediante la calculadora ráster del software libre Quantum GIS, el cual permite introducir la fórmula de cada método expuesto para el cálculo de la socavación.

Figura 29

Calculadora ráster del QGIS con la fórmula de socavación general de Lacey



Nota. Elaboración propia en entorno QGIS.

Haciendo uso específicamente del ráster de tirantes y de caudales unitarios que el propio programa BASEMENT-ETH permite exportar con estos fines, Quantum GIS realiza la operación en cada celda de la grilla del resultado con origen del modelo discretizado para obtener posteriormente, como producto del cómputo, una imagen igualmente de tipo ráster con los valores de socavación general. Luego, el procedimiento de cálculo concluye con la extracción de valores de acuerdo con cada tramo de protección proyectada en planta.

Capítulo IV. Resultados y Discusión

4.1 Resultados de Borde Libre

La adopción del borde libre estará en función a los dos criterios expuestos: la velocidad promedio del tramo y a la recomendación de borde libre mínimo para el caudal de diseño del caso de aplicación, la cual está en el rango de 500-2000 m³/s. Los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Resultado de borde libre para cada tramo según velocidad promedio

Tramo	Velocidad media (m/s)	Coeficiente	Borde libre (Ecuación de energía)	Borde libre mínimo (JICA)	Borde libre adoptado
MD-1	2.93	1.2	0.53	1.0	1.0
MD-2	3.73	1.2	0.85	1.0	1.0
MD-3	3.92	1.2	0.94	1.0	1.0
MD-4	4.56	1.2	1.27	1.0	1.2
MD-5	3.86	1.2	0.91	1.0	1.0
MI-1	3.00	1.2	0.55	1.0	1.0
MI-2	3.81	1.2	0.89	1.0	1.0
MI-3	4.48	1.2	1.23	1.0	1.2
MI-4	4.10	1.2	1.03	1.0	1.0
MI-5	4.23	1.2	1.09	1.0	1.0

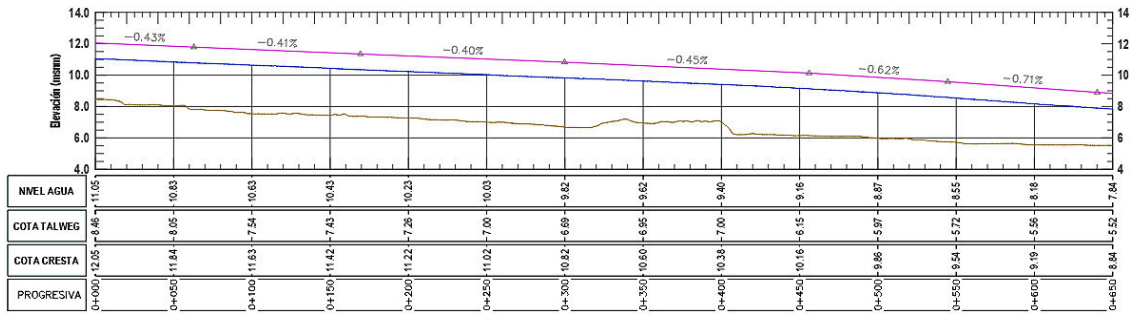
Nota. Los valores de borde libre están en metros.

4.2 Proyecciones de Cresta y Altura

El diseño de la cota de cresta sigue la metodología descrita en el numeral 2.3.2.3, la altura del dique queda definida según la diferencia de cotas que existe entre la cresta y el talweg, éste último que pertenece al cauce del río Matagente. En las siguientes figuras se muestran los resultados del diseño de cresta; en color magenta: la proyección de la cresta, en color azul: la cota máxima del agua y en color marrón: el terreno.

Figura 30

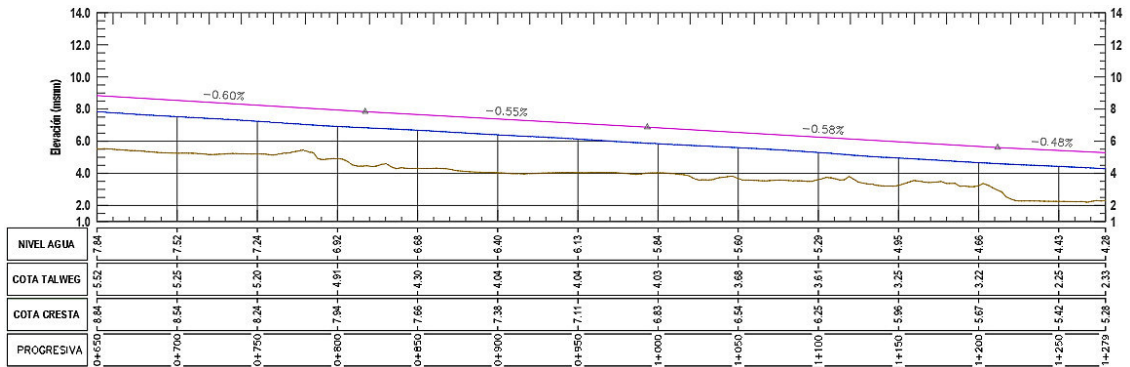
Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-1 (1/2)



Nota. Elaboración propia.

Figura 31

Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-1 (2/2)

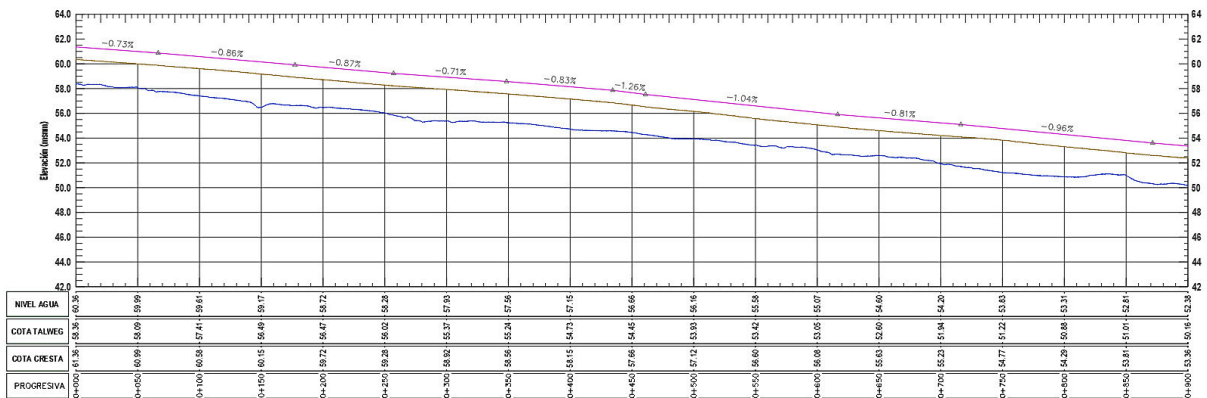


Nota. Elaboración propia.

El tramo MD-1 presente alturas variables que van desde los 4.0 m como máximo hasta los 2.6 m como mínimo.

Figura 32

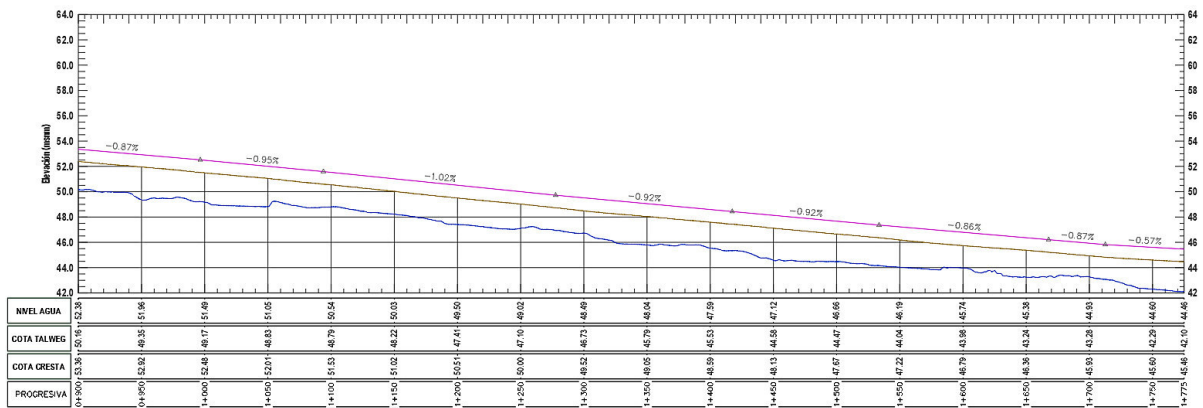
Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-2 (1/2)



Nota. Elaboración propia.

Figura 33

Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-2 (2/2)

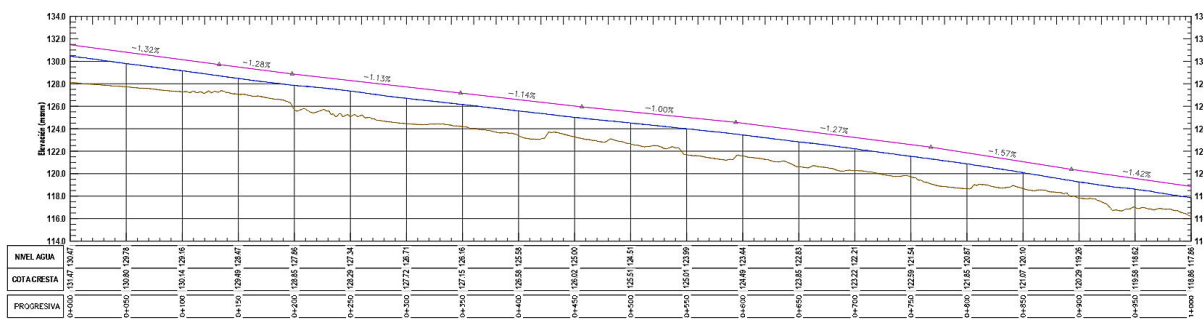


Nota. Elaboración propia.

El tramo MD-2 presente alturas variables que van desde los 3.3 m como máximo hasta los 2.5 m como mínimo.

Figura 34

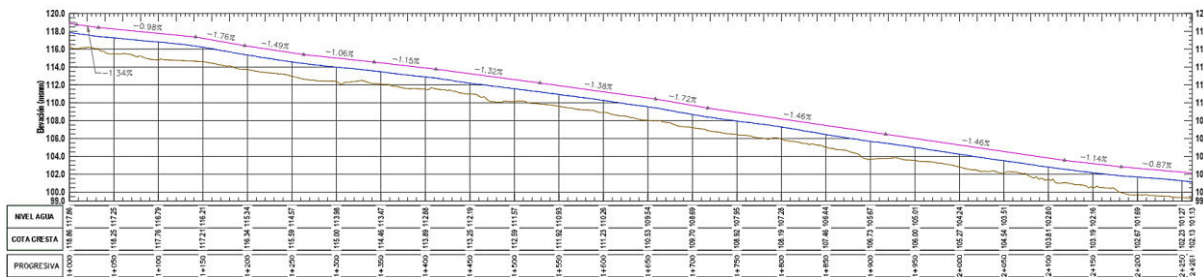
Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-3 (1/2)



Nota. Elaboración propia.

Figura 35

Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-3 (2/2)

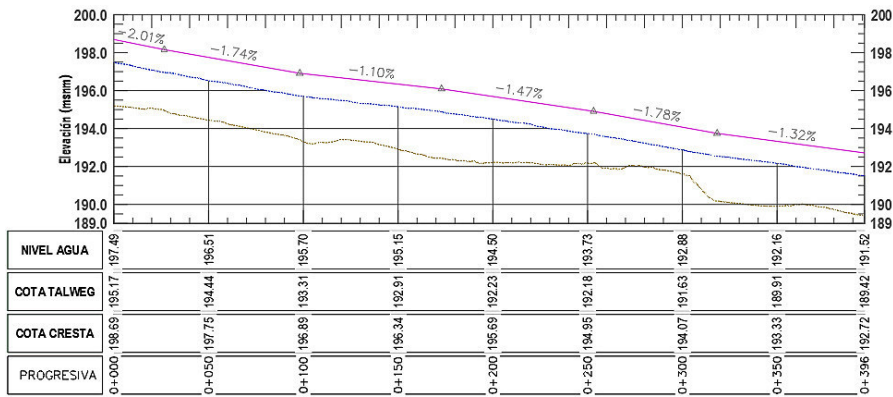


Nota. Elaboración propia.

El tramo MD-3 presente alturas variables que van desde los 3.3 m como máximo hasta los 2.7 m como mínimo.

Figura 36

Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-4

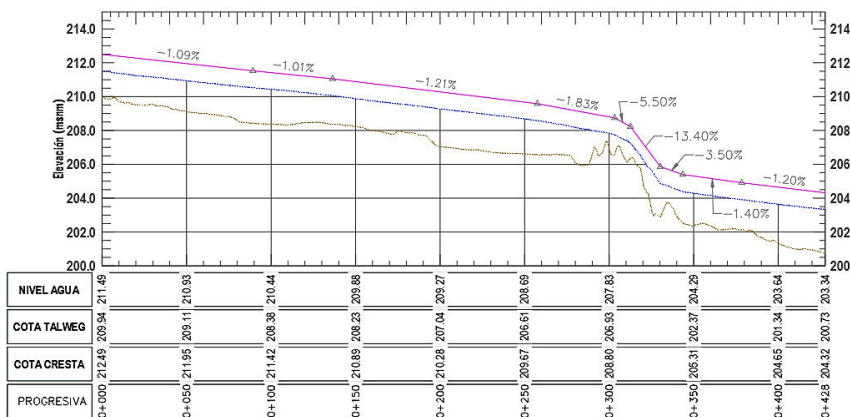


Nota. Elaboración propia.

El tramo MD-4 mantiene prácticamente una altura constante de 3.5 m.

Figura 37

Diseño de la cota de cresta – Tramo MD-5

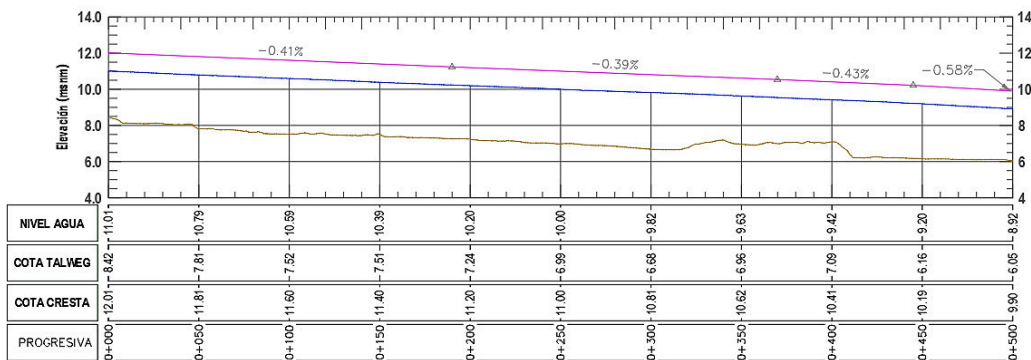


Nota. Elaboración propia.

En el tramo MD-5 se podría establecer una altura constante de 3.0 m.

Figura 38

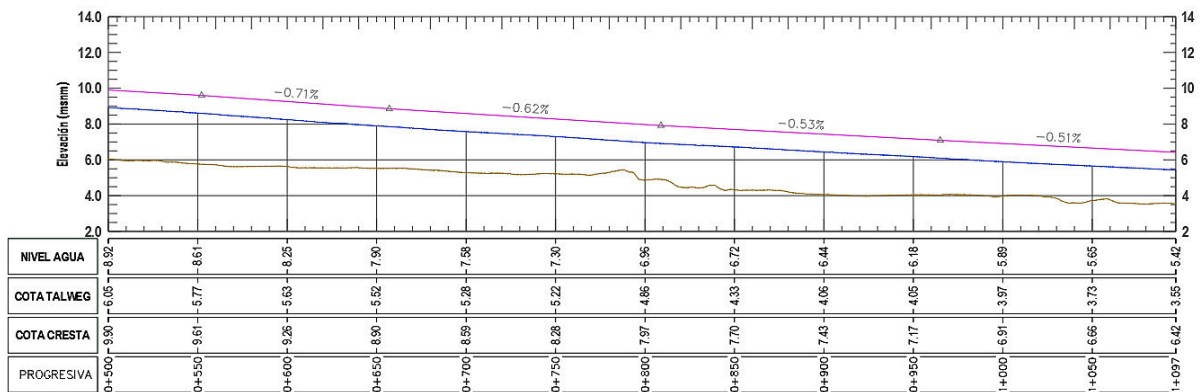
Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-1 (1/2)



Nota. Elaboración propia.

Figura 39

Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-1 (2/2)

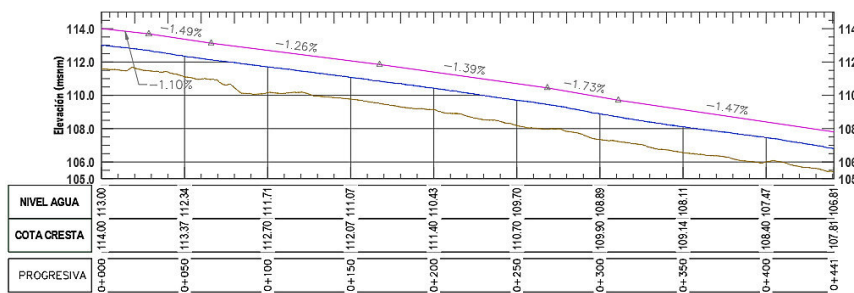


Nota. Elaboración propia.

El tramo MI-1 presenta tramos con alturas de diques de 4.0 m en un sector, descendiendo hasta los 3.0 m.

Figura 40

Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-2

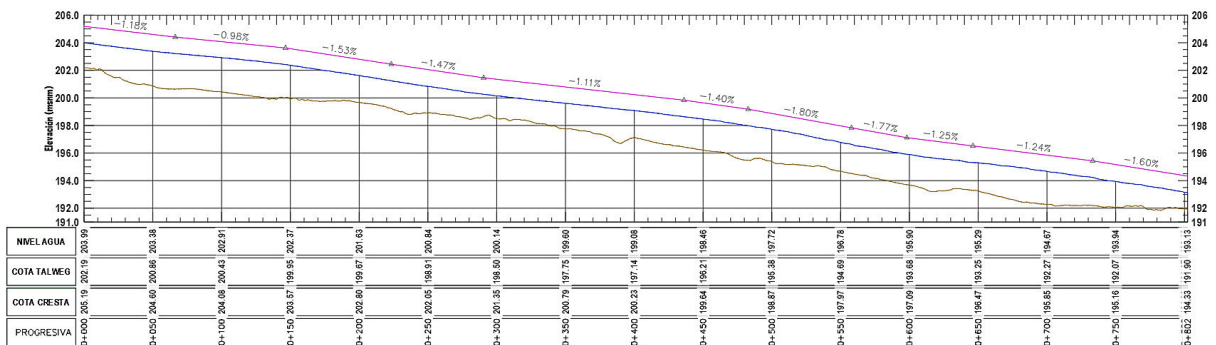


Nota. Elaboración propia.

El tramo MI-2 presenta tramos con alturas de diques de 2.8 m en un sector, descendiendo hasta los 2.2 m.

Figura 41

Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-3

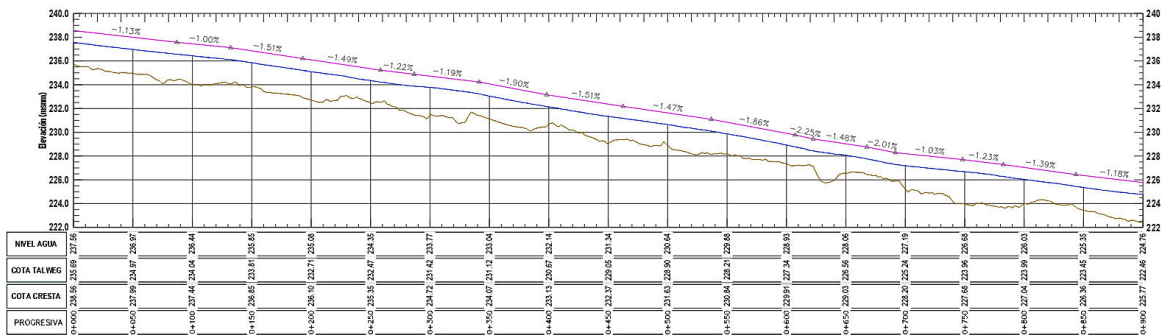


Nota. Elaboración propia.

El tramo MI-3 presenta tramos con alturas de diques de 3.8 m en un sector, descendiendo hasta los 3.3 m.

Figura 42

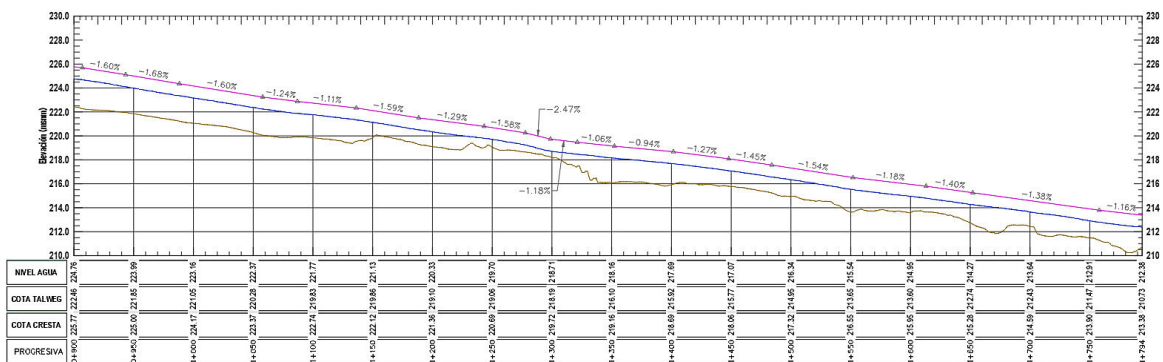
Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-4 (1/2)



Nota. Elaboración propia.

Figura 43

Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-4 (2/2)

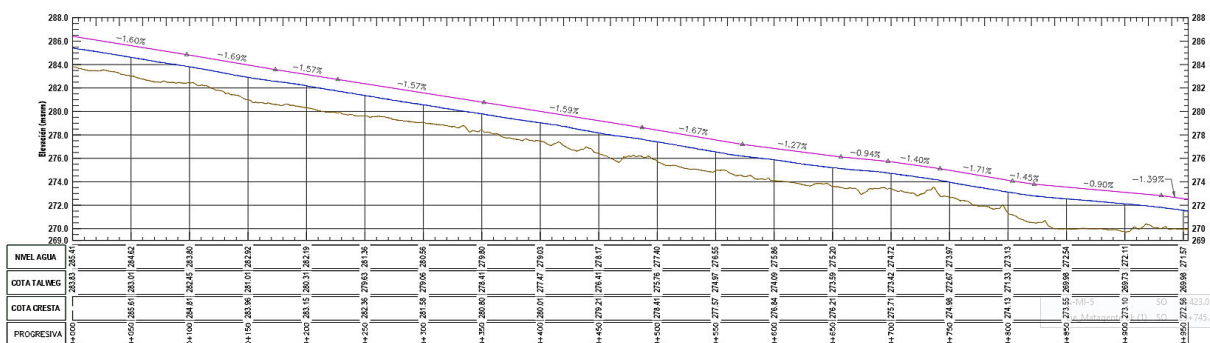


Nota. Elaboración propia.

El tramo MI-4 presenta tramos con alturas de diques de 3.4 m en un sector, descendiendo hasta los 2.6 m.

Figura 44

Diseño de la cota de cresta – Tramo MI-5



Nota. Elaboración propia.

El tramo MI-5 presenta tramos con alturas de diques de 3.6 m en un sector, descendiendo hasta los 2.6 m.

4.3 Resultados de Socavación

Los cálculos de profundidad de uña antisocavante estarán sujetos a los resultados de socavación. La Tabla 14 presenta el resumen de los cálculos con las metodologías expuestas en el marco teórico. La adopción de la altura de uña tendrá sustento en el método de socavación elegido; las ecuaciones de Lacey y Blench presentan ciertas limitaciones, en particular Blench que tiende a sobreestimar valores. Los datos de campo para el desarrollo de estas formulaciones (Lacey y Blench) eran de canales de riego con lechos de arena (Richards, 2018) significando un contexto diferente al caso de aplicación, por otro lado, diversos estudios demuestran que la fórmula de Lischtván-Lebediev tiene muy buena aplicabilidad para ríos de lechos de grava, por lo tanto, la altura de uña se determinará tomando con mayor referencia este método.

Tabla 14

Resumen de profundidad de uña antisocavante

Tramo	Resumen de socavación (m)			
	Lischtván – Lebediev	Lacey	Blench	Altura de uña adoptado
MD-1	0.67	0.65	1.36	1.0
MD-2	1.13	1.08	1.84	1.5
MD-3	1.22	1.21	1.92	1.5
MD-4	1.90	1.73	2.61	2.0
MD-5	1.50	1.42	2.21	2.0
MI-1	0.73	0.69	1.43	1.0
MI-2	1.07	1.11	1.75	1.5
MI-3	1.99	1.77	2.71	2.0
MI-4	1.69	1.53	2.40	2.0
MI-5	1.40	1.36	2.11	1.5

Nota. Los valores presentados están en metros.

4.4 Resultados del Diámetro de Enrocado

La Tabla 15, Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18 presentan los parámetros utilizados para la obtención del diámetro de roca según las metodologías expuestas.

Tabla 15*Cálculos del diámetro de roca – Método Isbash*

Tramo	Gravedad específica de roca (t/m ³)	Velocidad media (m/s)	Coefficiente C adoptado	d ₅₀ (m)
MD-1	2.62	2.93	0.86	0.37
MD-2	2.62	3.73	0.86	0.59
MD-3	2.62	3.92	0.86	0.65
MD-4	2.62	4.56	0.86	0.89
MD-5	2.62	3.86	0.86	0.63
MI-1	2.62	3.00	0.86	0.38
MI-2	2.62	3.81	0.86	0.62
MI-3	2.62	4.48	0.86	0.85
MI-4	2.62	4.10	0.86	0.71
MI-5	2.62	4.23	0.86	0.76

Nota. Elaboración propia.

Tabla 16*Cálculos del diámetro de roca – Método Maynard*

Tramo	Tirante (m)	Velocidad media (m/s)	Coefficiente C ₁	Coefficiente C ₂	$F = C_2 V / (g y)^{0.5}$	$d_{50} = t C_1 F^3$
MD-1	2.13	2.93	0.32	1.25	0.80	0.35
MD-2	2.08	3.73	0.32	1.25	1.03	0.73
MD-3	1.65	3.92	0.32	1.25	1.22	0.95
MD-4	1.92	4.56	0.32	1.25	1.31	1.39
MD-5	1.75	3.86	0.32	1.25	1.17	0.88
MI-1	2.21	3.00	0.32	1.25	0.81	0.37
MI-2	1.43	3.81	0.32	1.25	1.27	0.94
MI-3	2.02	4.48	0.32	1.25	1.26	1.28
MI-4	1.75	4.10	0.32	1.25	1.24	1.06
MI-5	1.66	4.23	0.32	1.25	1.31	1.19

Nota. Elaboración propia

Tabla 17*Cálculos del diámetro de roca – Método CALTRANS*

Tramo	Gravedad específica roca (t/m ³)	Gravedad específica agua (t/m ³)	Velocidad media (m/s)	Talud (Z)	Ángulo de inclinación del talud (°)	W (Peso)		D50 (m)
						Kg	Tn	
MD-1	2.62	1.00	2.93	2.00	26.57	13.61	0.014	0.21
MD-2	2.62	1.00	3.73	2.00	26.57	58.11	0.058	0.35
MD-3	2.62	1.00	3.92	2.00	26.57	77.72	0.078	0.38
MD-4	2.62	1.00	4.56	2.00	26.57	193.50	0.194	0.52
MD-5	2.62	1.00	3.86	2.00	26.57	70.90	0.071	0.37
MI-1	2.62	1.00	3.00	2.00	26.57	15.59	0.016	0.22
MI-2	2.62	1.00	3.81	2.00	26.57	65.68	0.066	0.36
MI-3	2.62	1.00	4.48	2.00	26.57	172.70	0.173	0.50
MI-4	2.62	1.00	4.10	2.00	26.57	101.61	0.102	0.42
MI-5	2.62	1.00	4.23	2.00	26.57	122.59	0.123	0.45

Nota. Elaboración propia

Tabla 18*Cálculos del diámetro de roca – Método USACE*

Parámetro	Tramo									
	MD-1	MD-2	MD-3	MD-4	MD-5	MI-1	MI-2	MI-3	MI-4	MI-5
d	2.13	2.08	1.65	1.92	1.75	2.21	1.43	2.02	1.75	1.66
V	2.93	3.73	3.92	4.56	3.86	3.00	3.81	4.48	4.10	4.23
Vss	2.73	3.47	3.64	4.24	3.59	2.79	3.54	4.16	3.81	3.93
Sf	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20
Cs	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
Cv	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ct	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Ys	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62	2.62
Yw	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
g	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81	9.81
Z	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Θ	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6	26.6
φ	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
K	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
D30	0.17	0.32	0.38	0.54	0.36	0.18	0.37	0.51	0.42	0.46
D50	0.25	0.46	0.55	0.77	0.52	0.26	0.53	0.73	0.60	0.66

Nota. La descripción de cada parámetro se encuentra en el apartado del marco teórico. Elaboración propia.

La adopción del diámetro de roca está sujeto a un criterio que se debe basar en el análisis de las fórmulas empleadas, condiciones, valoraciones, entre otros. La formulación de Isbash es una de las primeras referencias consultadas para el cálculo del diámetro de roca tomando en cuenta el equilibrio físico de fuerzas de arrastre sobre la roca y fricción del cauce (Almeida & Martín-Vide, 2011), sin embargo, no considera el talud del enrocado ni el tirante del flujo en la sección como en el caso de Maynard o USACE. El método de CALTRANS consiste en un cálculo indirecto para los tamaños de la roca a diferencia del resto de formulaciones. El método de USACE se basa en la mejora de la ecuación obtenida por Maynard (conseguida a partir de datos experimentales y de campo) mediante la incorporación de diversos coeficientes de corrección y un factor de talud, pero está limitada a pendientes menores al 2%. En general, el resultado de estas ecuaciones es proporcional a la velocidad elevado a un exponente haciendo muy sensible a las formulaciones que menores parámetros toma en cuenta para su cálculo. En base a lo anterior, la adopción del diámetro característico tomará con mayor importancia la metodología del USACE, debido a las condiciones favorables del río Matagente en la aplicabilidad de esta formulación. En la

Tabla 19 se muestran los resultados del diámetro adoptado para el presente caso de estudio.

Tabla 19

Resumen de resultados de diámetros de roca

Tramo	Método				Diámetro adoptado
	Isbash	Maynord	CALTRANS	USACE	
MD-1	0.37	0.35	0.21	0.25	0.5
MD-2	0.59	0.73	0.35	0.46	0.5
MD-3	0.65	0.95	0.38	0.55	0.8
MD-4	0.89	1.39	0.52	0.77	1.0
MD-5	0.63	0.88	0.37	0.52	0.8
MI-1	0.38	0.37	0.22	0.26	0.5
MI-2	0.62	0.94	0.36	0.53	0.8
MI-3	0.85	1.28	0.50	0.73	1.0
MI-4	0.71	1.06	0.42	0.60	0.8
MI-5	0.76	1.19	0.45	0.66	0.8

Nota. Los valores presentados están en metros.

4.5 Resultados Elementos Complementarios

Los elementos complementarios del dique se refieren al espesor mínimo, ancho superior e inferior de uña y el talud. La Tabla 20 resume los valores adoptados.

Tabla 20

Resultado de cálculo de elementos complementarios de los diques

Tramo	Diámetro de roca D50	Profundidad de uña adoptada	Elementos complementarios			Talud
			Espesor mínimo	Ancho superior de uña	Ancho inferior de uña	
MD-1	0.5	1.0	0.8	1.5	1.0	2H:1V
MD-2	0.5	1.5	0.8	2.3	1.5	2H:1V
MD-3	0.8	1.5	1.2	2.3	1.5	2H:1V
MD-4	1.0	2.0	1.5	3.0	2.0	2H:1V
MD-5	0.8	2.0	1.2	3.0	2.0	2H:1V
MI-1	0.5	1.0	0.8	1.5	1.0	2H:1V
MI-2	0.8	1.5	1.2	2.3	1.5	2H:1V
MI-3	1.0	2.0	1.5	3.0	2.0	2H:1V
MI-4	0.8	2.0	1.2	3.0	2.0	2H:1V
MI-5	0.8	1.5	1.2	2.3	1.5	2H:1V

Nota. Los valores presentados están en metros.

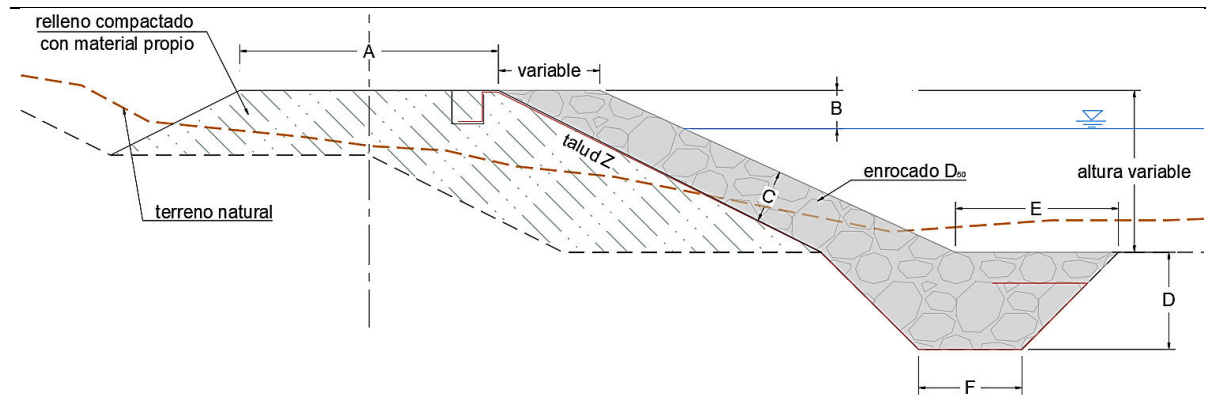
Conclusiones

- Se ha determinado un borde libre de 1.2 m para los tramos MD-4 y MI-3 donde se presentan velocidades promedias mayores a 4.5 m/s. Para los demás tramos se estableció un borde libre de 1.0 m.
- Las alturas de los diques proyectados tienen alturas variables que van desde los 4.0 m como máximo hasta los 2.2 m como mínimo.
- Para el cálculo de socavación, se optó usar la metodología de Lischtván & Lebediev, dado que Blench y Lacey se ajustan mejor para cálculos en canales de riego donde existen menores dimensiones a comparación del caso de aplicación, adicionalmente, en los resultados del método de Blench se evidencian valores sobrestimados. Dado que está comprobado en otros estudios que el método Lischtván & Lebediev es aplicable para ríos muy anchos de lecho gravoso similares al río Matagente, se sustenta su elección.
- Los tramos de protección comprenden alturas de uña de 1.0, 1.5 y 2.0 m. Los valores de anchos de uña superior e inferior son proporcionales a las alturas de uña de cimentación determinadas en cada tramo.
- El diámetro medio del enrocado de cada tramo fue calculado con cuatro metodologías donde la adopción final del diámetro fue realizada en base a una valoración criteriosa sobre las cuatro fórmulas; el método de la U.S. Army Corps of Engineers es uno de los más compuestos porque se determina el tamaño de la piedra en función a tres variables (velocidad, talud y tirante) a diferencia del método de Isbash de una variable (velocidad) o de CALTRANS de dos variables (velocidad y talud).
- Se adoptaron tres tipos de diámetros medios de 0.5, 0.8 y 1.0 m donde éste último se establece en los tramos que mayor velocidad promedio presentó: MD-4 y MI-3.
- Se proyectó una longitud total de diques de 11,232.86 m, siendo para la margen derecha una longitud de 6,143.49 m y para la margen izquierda de 5,089.37 m.

- La Tabla 21 muestra el resumen de los parámetros de diseño para la sección tipo obtenidos para cada tramo de dique con protección de enrocado.

Tabla 21

Sección tipo y resumen de parámetros de diseño



Tramo	Elementos de diseño							
	Cresta (m)	Borde libre (m)	Espesor (m)	Altura de uña (m)	Ancho superior uña (m)	Ancho inferior uña (m)	Talud (ZH:1V)	Diámetro D50 enrocado (m)
	A	B	C	D	E	F	Z	
MD-1	4.0	1.0	0.80	1.00	1.5	1.0	2.0	0.5
MD-2	4.0	1.0	0.80	1.50	2.3	1.5	2.0	0.5
MD-3	4.0	1.0	1.20	1.50	2.3	1.5	2.0	0.8
MD-4	4.0	1.2	1.50	2.00	3.0	2.0	2.0	1.0
MD-5	4.0	1.0	1.20	2.00	3.0	2.0	2.0	0.8
MI-1	4.0	1.0	0.80	1.00	1.5	1.0	2.0	0.5
MI-2	4.0	1.0	1.20	1.50	2.3	1.5	2.0	0.8
MI-3	4.0	1.2	1.50	2.00	3.0	2.0	2.0	1.0
MI-4	4.0	1.0	1.20	2.00	3.0	2.0	2.0	0.8
MI-5	4.0	1.0	1.20	1.50	2.3	1.5	2.0	0.8

Nota. Elaboración propia.

Recomendaciones

- Se debe tomar en cuenta las estructuras existentes que se podrían cruzar con los diques proyectados; por ejemplo, la presencia de canales de descarga o captación exigirá que las obras proyectadas mantengan su funcionalidad a través de aberturas en el dique, generalmente, mediante tuberías que lo atraviesan; para ello, es necesario identificarlo in situ tomando las medidas necesarias, incluyendo caudales, estado actual de estructura y finalmente realizar un inventario de estructuras.
- La determinación de alturas constantes por sectores en cada tramo debe ser realizada mediante el empleo de criterios constructivos; al determinar una altura en un sector a lo largo de éste, el dique requerirá según sea el caso de cortes y rellenos, un criterio principal consiste en calcular qué altura genera un balance conveniente de movimientos de tierra.
- Los diques proyectados, en este caso, forman parte de un método que toma en cuenta la inundación fluvial, sin embargo, deben considerarse otros criterios como de reconformación y/o mejoramiento de los terraplenes existentes; es posible identificar diques rústicos formados por los lugareños y que debido a su origen no cuenten con protección antisocavante.
- Los diques en cartera, entendiéndose como obras que se encuentran en etapa de licitación o construcción deben ser tomados en cuenta para incluirse en el modelamiento del escenario con proyecto. El propósito es evitar cruzar estos diques o según sea el caso, mejorar sus alturas.
- Los diques proyectados en el presente trabajo deberían ser evaluados en un modelo integral a nivel de cuenca que incorpore al río San Juan y el nuevo partidor. Según sea el tipo de estructura de repartición, este puede ejercer un efecto de laminación sobre el hidrograma, obteniendo otros resultados de tirantes y/o velocidades que modifiquen las alturas y demás parámetros de los tramos propuestos de protección.

Referencias

- Agencia de Cooperación Internacional de Japón (2013). *Estudio Preparatorio sobre el Programa de Protección de Valles y Poblaciones Rurales y Vulnerables ante Inundaciones en la República del Perú*. <https://openjicareport.jica.go.jp>
- Autoridad Nacional del Agua (1999). *Delimitación de la faja marginal del río Matagente: Resumen ejecutivo*. <https://repositorio.ana.gob.pe>
- Almeida, G.D. & Martín-Vide, J.P. (2011). *Estabilidad fluvial de una protección transversal de escollera en comparación con una longitudinal*. *Tecnología y ciencias del agua*, 2(1), 83-98.
- Altunin, S. T. (1962). *The rivers regulation*. Moscow, Selhozizdat, 352 p.
- Blench, T. (1957). *Regime Behaviour of Canals and Rivers*. Butterworths, London.
- Blench, T. (1969). *Mobile-Bed Fluviology: A Regime Theory Treatment of Canals and Rivers for Engineers and Hydrologists*. The University of Alberta Press, Edmonton, Alberta, Canada.
- Bray, D. I. (1979). *Estimating average velocity in gravel-bed rivers*. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division*, v. 105, no. HY9, p. 1103-1122.
- California Department of Transportation (1970). *Bank and Shore Protection in California Highway Practice*. Division of Highways, Department of Public Works, California, USA.
- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill, New York, USA.
- Cowan, W. L. (1956). *Estimating hydraulic roughness coefficients: Agricultural Engineering*, v. 37, no. 7, p. 473-475.
- Departamento de Estudios Viales-SDD-DV (2012). *Manual de Carreteras (Volumen N°3), Diseño del Drenaje, Saneamiento, Mecánica e Hidráulica Fluvial*, Capítulo 3.700, Dirección de Vialidad, Santiago de Chile, Chile.

Department of Public Works and Highways Japan International Cooperation Agency (2010).

Technical Standards and Guidelines for Design of Flood Control Structures. Tokyo, Japan.

Gobierno Regional de Ica (2012). *Diagnóstico de las Defensas Ribereñas en los ríos Chico*

y Matagente, Provincia de Chincha. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres. <http://sigrid.cenepred.gob.pe>

Golder Associates Ltd. & Associated Engineering (B.C.) Ltd. (2003). *Dike Design and Construction Guide*, Flood Hazard Management Section Environmental Protection Division, Province of British Columbia.

Instituto Nacional de Defensa Civil (2020). Información estadística de emergencias y daños, periodo 2003 al 2019. Compendio estadístico del INDECI 2020, en la Preparación, Respuesta y Rehabilitación de la GRD, Perú.

Isbash, S. V. (1936). *Construction of dams by depositing rock in running water*.

Transactions, Second Congress on Large Dams, Washington, D.C. USA.

Japan International Cooperation Agency (2002). *Technical Standards and Guidelines for Planning and Design: Volume I Flood Control*, Department of Public Works and Highways, Japan.

Lacey, G. (1930). *Stable Channels in Alluvium*. Paper 4736, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 229, William Clowes and Sons Ltd., London, Great Britain.

Maynard, S.T. (1978). *Practical riprap design*. Misc. Paper H-78-7, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, USA.

Maza Álvarez, J.A., García Flores, M. (2018). *Estabilidad de Cauces – Manual de Ingeniería de Ríos*. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.

Rentschler, J., Salhab, M. (12 de noviembre de 2020). *1.47 billion people face flood risk worldwide: for over a third, it could be devastating*. Word Bank Blogs.

<https://blogs.worldbank.org/>

Richards, D.L. (2018). *Assessment of Regime Equations for Predicting General Scour*.

World Environmental and Water Resources Congress 2018: Hydraulics and

Waterways, Water Distribution Systems Analysis and Smart Water (pp. 119-129),
Reston VA: American Society of Civil Engineers.

Mujica, J (28 de febrero del 2017). Desborde del río Matagente inundó cultivos y puente colapso en Chincha. *RPP Noticias*. <https://rpp.pe/peru/ica/desborde-del-rio-matagente-inundo-cultivos-y-puente-colapso-en-chincha-noticia-1033802?ref=rpp>.

Programa Subsectorial de Irrigaciones (2021). *Estudio: “Instalación – Implementación de medidas de prevención para el control de Desbordes e Inundaciones del río Chincha – Provincia de Chincha – Departamento de Ica*. Ministerio de Economía y Finanzas. <https://ofi5.mef.gob.pe/invierte/consultapublica>

Proyecto Especial Tambo Ccaracocha (2019). *Estudio: Creación del Servicio de Protección en ribera del río Matagente vulnerable ante el peligro en los sectores San Carlos-Sra. Vargas – Distrito de El Carmen – Provincia de Chincha – Departamento de Ica*. Ministerio de Economía y Finanzas. <https://ofi5.mef.gob.pe/invierte/consultapublica>

Suárez, Jaime (2001). *Control de Erosión en Zonas Tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Bucaramanga, Colombia.

Terán, Rubén (1998). *Diseño y Construcción de Defensas Ribereñas: Tomo I*, Escuela Superior de Administración de Aguas “Charles Sutton”, Cercado de Lima, Perú.

U.S. Army Corps of Engineers (1994). *Hydraulic Design of Flood Control Channels*. Engineering Manual EM-1110-2-1601, Change 1, 1994.

ANEXO

MATRIZ DE CONSISTENCIA – MONOGRAFÍA TÉCNICA

“Diseño hidráulico de diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú”

Problema	Objetivos	Marco Teórico Conceptual	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
<p>Principal</p> <p>¿De qué manera se debe proceder para obtener el diseño hidráulico de diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú?</p> <p>Secundarios</p> <p>a. ¿Cuáles son los criterios que se deben tener en cuenta para el diseño hidráulico de diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú?</p> <p>b. ¿Una vez obtenida la mancha de inundación máxima, cómo se debe proceder con el trazo en planta en el diseño de los diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Diseñar diques con protección de enrocado, bajo el enfoque hidráulico, en el río Matagente provincia de Chincha, Ica, Perú.</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>a. Elaborar el modelamiento hidráulico mediante el código numérico de BASEMENT-ETH.</p> <p>b. Diseñar el esquema metodológico del procedimiento del diseño hidráulico de diques con protección de enrocado.</p> <p>c. Calcular la socavación general en un entorno bidimensional en base a los resultados de tirantes y velocidades del modelo BASEMENT-ETH</p>	<p>Antecedentes</p> <p>Existe poca información relacionada a protección de riberas en el río Matagente y a procedimientos actuales en el diseño hidráulico de diques, reúne las condiciones metodológicas y temáticas suficientes para ser considerado como una investigación</p> <p>Bases teóricas fundamentales</p> <p><u>Hidráulica Fluvial</u></p> <p>Se revisan conceptos y metodologías fundamentales de un río como el <u>número de Manning</u> que caracteriza la rugosidad de una superficie; el <u>ancho estable</u>, una característica ideal del río en la que sus propiedades geomorfológicas permanecen en equilibrio a través del tiempo y finalmente la <u>socavación</u>, un fenómeno erosivo que deforma al cauce generando condiciones</p>	<p>El análisis de las formulaciones en los criterios de diseño más una metodología basada en el uso de instrumentos actuales mejora los procedimientos actuales para el diseño de diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú.</p>	<p>Para demostrar y comprobar la hipótesis anteriormente formulada, determinamos las variables que a continuación se mencionan:</p> <p>Variables independientes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Topografía ▪ Hidrogramas ▪ Granulometría ▪ Modelo numérico ▪ Caudal unitario ▪ Tirantes ▪ Velocidades <p>Variables dependientes</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ancho estable ▪ Socavación general ▪ Altura de dique ▪ Borde libre ▪ Cresta ▪ Profundidad de uña antisocavante ▪ Diámetro de enrocado ▪ Espesor de enrocado ▪ Ancho de cresta 	<p>Tipo de Investigación</p> <p>En relación con el propósito, el presente estudio reúne las condiciones metodológicas de una investigación aplicada-bibliográfica.</p> <p>Nivel de la Investigación</p> <p>La investigación reúne por su nivel las características de un estudio descriptivo, explicativo no experimental.</p> <p>Método de la Investigación</p> <p>Durante el proceso de investigación para demostrar y comprobar la hipótesis se aplicarán los métodos que a continuación se indican:</p> <p>Descriptivo. A través de este método se conocerán los parámetros o variables más importantes para el diseño hidráulico de diques con protección de enrocado.</p> <p>Comparativo. A través de este método, Se hará un contraste de resultados entre distintas formulaciones.</p> <p>Diseño de la Investigación</p> <p>Aplicativo-No Experimental</p>

Problema	Objetivos	Marco Teórico Conceptual	Hipótesis	Variables e Indicadores	Metodología
<p>c. ¿Cómo realizar los cálculos de socavación general con los resultados bidimensionales para el diseño hidráulico de diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú?</p> <p>d. ¿Bajo qué análisis se debe proceder con la adopción final de los parámetros del diseño hidráulico de diques con protección de enrocado en el río Matagente, provincia de Chincha, Ica, Perú?</p>	<p>maximizando su provecho en función al formato de los resultados exportados.</p> <p>d. Establecer las metodologías, los análisis y los criterios de diseño para el cálculo del ancho estable, borde libre, espesor, diámetro de enrocado y otros elementos complementarios.</p> <p>e. Obtener el resumen de elementos geométricos de la sección típica de dique para cada tramo de protección.</p>	<p>desfavorables en estructuras hidráulicas presentes.</p> <p>Bases teóricas de ingeniería</p> <p><u>Estructuras de protección contra inundaciones</u></p> <p>Se hace una revisión de la tipología de estructuras de protección frente a inundación y erosión, realizando una descripción de cada una de ellas, características y ventajas o desventajas.</p> <p><u>Criterios de diseño hidráulico</u></p> <p>Se detallan distintas formulaciones y/o recomendaciones para todas las variables involucradas (borde libre, ancho de cresta, altura, profundidad de uña antisocavante, diámetro del enrocado) en el aspecto hidráulico del diseño de diques con protección de enrocado.</p>			<p>Técnicas</p> <p>Análisis de las formulaciones (criterios de diseño).</p> <p>Instrumentos</p> <p>Modelo numérico BASEMENT-ETH, Software Quantum GIS, Guías técnicas de modelización y estándares de diseño.</p>