

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**



**“EFECTO DE LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA EN LA EFICIENCIA DE LA  
CAPTACIÓN DERIVADORA HUACARIZ, CON UN BARRAGE FUSIBLE CENTRAL”**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO HIDRÁULICO**

**AUTOR**

Bach. FERNANDO JHOMAR CASTAÑEDA VARGAS

**ASESOR:**

Dr. Ing. JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

**CAJAMARCA – PERÚ**

**2025**

## CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

### - FACULTAD DE INGENIERÍA -

- Investigador:** FERNANDO JHOMAR CASTAÑEDA VARGAS  
**DNI:** 73696418  
**Escuela Profesional:** INGENIERÍA HIDRÁULICA
- Asesor:** Dr. Ing. JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE.  
**Facultad:** INGENIERÍA.
- Grado académico o título profesional**  
 Bachiller       Título profesional       Segunda especialidad  
 Maestro       Doctor
- Tipo de Investigación:**  
 Tesis       Trabajo de investigación       Trabajo de suficiencia profesional  
 Trabajo académico
- Título de Trabajo de Investigación:** EFECTO DE LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA EN LA EFICIENCIA DE LA CAPTACIÓN DERIVADORA HUACARIZ, CON BARRAGE FUSIBLE CENTRAL.
- Fecha de evaluación:** 24 de Abril de 2025
- Software antiplagio:**       TURNITIN       URKUND (OURIGINAL) (\*)
- Porcentaje de Informe de Similitud:** 17 %
- Código Documento:** oid:3117: 452393544
- Resultado de la Evaluación de Similitud:**  
 APROBADO     PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 25 de Abril del 2025



Firmado digitalmente por:  
BAZAN DIAZ Laura Sofia  
FAU 20148258601 soft  
Motivo: En señal de  
conformidad  
Fecha: 25/04/2025 14:07:09-0500

FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos: JOSÉ FRANCISCO HUAMÁN VIDAURRE

DNI: 26609077

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



**ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.**

TITULO : "EFECTO DE LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA EN LA EFICIENCIA DE LA CAPTACIÓN DERIVADORA HUACARIZ, CON UN BARRAGE FUSIBLE CENTRAL"

ASESOR : Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0177-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 05 de mayo de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **dieciséis días del mes de mayo de 2025**, siendo las diez horas (10:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Ambiente 1A - Segundo Piso), de la facultad de Ingeniería, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

- Presidente : Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Vocal : Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Secretario : M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "EFECTO DE LA DESCOLMATACIÓN INDUCIDA EN LA EFICIENCIA DE LA CAPTACIÓN DERIVADORA HUACARIZ, CON UN BARRAGE FUSIBLE CENTRAL", presentado por la Bachiller en Ingeniería Hidráulica FERNANDO JHOMAR CASTAÑEDA VARGAS, asesorado por el Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 07 PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : 10 PTS.
EVALUACIÓN FINAL : 10 PTS. Decisivo (En letras)

En consecuencia, se lo declara Aprobado con el calificativo de Decisivo acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 10:00 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Luis Andrés León Chávez.
Presidente

Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Vocal

M.Cs. Ing. José Hilario Longa Álvarez.
Secretario

Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Asesor

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, agradezco a Dios, por tenerme con vida y dotarme de buena salud durante el desarrollo de mi tesis.

A mi padre y a mi madre por concederme su apoyo, comprensión y motivación durante el largo proceso que duró esta investigación.

A mis familiares, a mi novia que siempre estuvo presente brindándome su apoyo.

A mi asesor el Dr. Ing. José Francisco Huaman Vidaurre por inculcarme conocimientos claves para concluir exitosamente esta tesis.

## DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada con mucho afecto a mis padres Walter Roberto Castañeda Paredes y Ana Eliza Vargas Arroyo, por su gran esfuerzo para darme la mejor herencia que es la educación.

A mis abuelos y hermanos por apoyarme e inculcarme buenos valores.

A mi novia por estar siempre dispuesta a brindarme motivación y ayuda incondicional.

A los docentes que me infundieron conocimientos durante mi desarrollo profesional.

A mis amigos que me brindaron su apoyo altruista en los distintos trabajos de campo requeridos en esta investigación.

*Fernando Thomar Castañeda Vargas*

# ÍNDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
ÍNDICE GENERAL .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN .....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	1
1.2 Justificación de la Investigación .....	2
1.3 Delimitación de la Investigación.....	4
1.4 Limitaciones.....	5
1.5 Objetivos .....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes Teóricos .....	6
2.2 Bases Teóricas.....	7
2.3 Definición de términos básicos .....	40
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
3.1 Aspectos Generales .....	42
3.2 Materiales y equipos .....	44
3.3 Procedimiento .....	45
3.4 Métodos de investigación.....	47
3.5 Población, muestra, unidad de análisis .....	47

3.6 Técnicas e instrumentos de recopilación de información .....	48
3.7 Tratamiento y análisis de datos .....	54
CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	55
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	85
5.1 Conclusiones .....	85
5.2 Recomendaciones.....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
ANEXOS .....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

	Página
<b>Tabla 1:</b> Distancias mínimas entre dovelas verticales recomendadas .....	10
<b>Tabla 2:</b> Clasificación de materiales sedimentarios de la Unión Geofísica Americana .....	17
<b>Tabla 3:</b> Clasificación de sedimentos -- Combinación de tablas de Bolinaga y Unión Geofísica Americana.....	18
<b>Tabla 4:</b> Parámetros de diseño hidráulico.....	30
<b>Tabla 5:</b> Escalas lineales comunes en modelos hidráulicos.....	35
<b>Tabla 6:</b> Caudales del río Mashcón aguas arriba de la captación Huacariz.....	55
<b>Tabla 7:</b> Muestras de guijarros y cantos del río Mashcón .....	56
<b>Tabla 8:</b> Conteo guijarros y cantos para análisis granulométrico.....	57
<b>Tabla 9:</b> Tamizado de los sedimentos del río Mashcón.....	59
<b>Tabla 10:</b> Caudal de máximas avenidas.....	61
<b>Tabla 11:</b> Datos del prototipo considerados para diseño del modelo físico .....	65
<b>Tabla 12:</b> Datos del modelo hidráulico a escala 1/20 .....	68
<b>Tabla 13:</b> Caudales y tiempos de duración en prototipo y modelo.....	71
<b>Tabla 14:</b> Parámetros de diseño calculados .....	72
<b>Tabla 15:</b> Datos calculados de dimensionamiento del bocal .....	73
<b>Tabla 16:</b> Parámetros y altura P del barrage, calculados .....	74
<b>Tabla 17:</b> Profundidad de sedimentos en estructura colmatada.....	77
<b>Tabla 18:</b> Eficiencia de captación en estructura colmatada.....	78
<b>Tabla 19:</b> Profundidad de sedimentos en estructura descolmatada .....	82
<b>Tabla 20:</b> Profundidad de sedimentos descolmatados al finalizar los ensayos.....	83
<b>Tabla 21:</b> Eficiencia de captación en estructura descolmatada.....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1:</b> Dovelas para subdividir un cauce natural y medir caudales .....	10
<b>Figura 2:</b> Medición de velocidades mediante tubo de Pitot.....	12
<b>Figura 3:</b> Tubo de Pitot.....	13
<b>Figura 4:</b> Sensor PASCO PASPort (PS-2130).....	14
<b>Figura 5:</b> Huella de máximas avenidas.....	16
<b>Figura 6:</b> Ejes imaginarios de una partícula .....	19
<b>Figura 7:</b> Curva granulométrica acumulada continua.....	20
<b>Figura 8:</b> Ubicación del barrage y del bocal .....	23
<b>Figura 9:</b> Barrage fijo-fusible .....	25
<b>Figura 10:</b> Coeficiente de descarga para barrage fijo-fusible.....	26
<b>Figura 11:</b> Partes de la captación con barrage fijo-fusible .....	27
<b>Figura 12:</b> Dimensiones del bocal .....	28
<b>Figura 13:</b> Bocal con entrada tipo grada.....	29
<b>Figura 14:</b> Diagrama de flujo sobre azud diagonal, en pico de pato o de tipo Z.....	31
<b>Figura 15:</b> Determinación del coeficiente 'm' para ángulos de $\alpha$ mayores de $45^\circ$ . .....	32
<b>Figura 16:</b> Determinación de l sabiendo los valores de B y S y de $\alpha$ .....	32
<b>Figura 17:</b> Vista satelital de la zona de estudio .....	43
<b>Figura 18:</b> Vista satelital de la captación Huacariz .....	43
<b>Figura 19:</b> Captación Huacariz .....	48
<b>Figura 20:</b> Levantamiento topográfico del prototipo.....	49
<b>Figura 21:</b> Aforo del río Mashcón a 240m aguas arriba del barrage.....	50
<b>Figura 22:</b> Esquema de registro de tirantes, áreas y velocidades en los aforos.....	50
<b>Figura 23:</b> Muestreo de guijarros y cantos .....	51
<b>Figura 24:</b> Muestreo de arenas y gravas (calicatas).....	52
<b>Figura 25:</b> Sedimentos extraídos de las calicatas .....	52
<b>Figura 26:</b> Tamizado de muestras de sedimento .....	53
<b>Figura 27:</b> Resultados de caudales obtenidos mediante aforos .....	56

<b>Figura 28:</b> Distribución granulométrica de guijarros y cantos .....	58
<b>Figura 29:</b> Distribución granulométrica de arenas y gravas .....	60
<b>Figura 30:</b> Plano general de la zona de estudio .....	63
<b>Figura 31:</b> Plano – partes y dimensiones del prototipo .....	64
<b>Figura 32:</b> Bocal dimensionado.....	73
<b>Figura 33:</b> Perfiles de parte fija y fusible del barrage.....	75
<b>Figura 34:</b> Vista en planta de diseño de barrage fijo fusible central .....	76
<b>Figura 35:</b> Apertura e inicio de descolmatación - pruebas en barrage original.....	79
<b>Figura 36:</b> Situación final - pruebas en barrage original .....	80
<b>Figura 37:</b> Implantación del nuevo barrage.....	80
<b>Figura 38:</b> Pruebas en la nueva estructura.....	81
<b>Figura 39:</b> Resultados finales de descolmatación inducida.....	81
<b>Figura 40:</b> Condiciones del bocal al finalizar la descolmatación inducida con el nuevo barrage.....	82
<b>Figura 41:</b> Ubicación de secciones de aforo.....	90
<b>Figura 42:</b> Aforo con correntómetro.....	90
<b>Figura 43:</b> Registro de tirantes y velocidades durante aforos.....	91
<b>Figura 44:</b> Medición de tirantes sobre la corona del barrage .....	91
<b>Figura 45:</b> Identificación de huella de máximas avenidas.....	92
<b>Figura 46:</b> Medición de puntos topográficos aguas arriba del barrage.....	92
<b>Figura 47:</b> Medición de puntos en la estructura de captación .....	93
<b>Figura 48:</b> Medición de puntos aguas abajo de la estructura.....	93
<b>Figura 49:</b> Maquinaria utilizada para extracción de muestras.....	94
<b>Figura 50:</b> Extracción de muestras de sedimentos colmatados .....	94
<b>Figura 51:</b> Selección de sedimentos representativos (mezclado y cuarteo) .....	95
<b>Figura 52:</b> Muestras de sedimento extraídas .....	95
<b>Figura 53:</b> Juego de tamices utilizado (laboratorio de mecánica de suelos - UNC).....	96
<b>Figura 54:</b> Procesamiento de muestras en el laboratorio.....	96
<b>Figura 55:</b> Selección de partículas que se usarán en el modelo físico.....	97
<b>Figura 56:</b> Proceso de construcción de modelo a escala 1:20 .....	98
<b>Figura 57:</b> Modelo físico construido .....	98
<b>Figura 58:</b> Caracterización de la colmatación aguas arriba.....	99

<b>Figura 59:</b> Colmatación cercana al barrage y bocal .....	99
<b>Figura 60:</b> Bocal colmatado con sedimentos.....	100
<b>Figura 61:</b> Nivelación de ejes de registro mediante platinas horizontales .....	100
<b>Figura 62:</b> Medición de la profundidad de los sedimentos.....	101
<b>Figura 63:</b> Medición de tirantes sobre la corona del barrage .....	101
<b>Figura 64:</b> Medición de caudales en proceso de calibración.....	102
<b>Figura 65:</b> Medición de caudales en la fase de estructura colmatada.....	103
<b>Figura 66:</b> Regulación de caudales.....	103
<b>Figura 67:</b> Apertura del 20% de la parte central del barrage original .....	104
<b>Figura 68:</b> Resultado de aperturar la parte central del barrage original .....	104
<b>Figura 69:</b> Sustitución de nuevo barrage .....	105
<b>Figura 70:</b> Arrastre de sedimentos durante el ensayo con un caudal de $6.081\text{m}^3/\text{s}$ .....	105
<b>Figura 71:</b> Arrastre de sedimentos durante el ensayo con un caudal de $11.336\text{m}^3/\text{s}$ .....	106
<b>Figura 72:</b> Desarrollo del proceso de descolmatación.....	106
<b>Figura 73:</b> Descolmatación del bocal de captación .....	107
<b>Figura 74:</b> Culminación del pruebas de descolmatación.....	107
<b>Figura 75:</b> Bocal 100% libre de sedimentos después de terminado el proceso de descolmatación .....	108
<b>Figura 76:</b> Medición de altura de sedimentos antes de la descolmatación.....	109
<b>Figura 77:</b> Medición de altura de sedimentos después de la descolmatación .....	109
<b>Figura 78:</b> Funcionamiento de barrage fijo - fusible central .....	110
<b>Figura 79:</b> Funcionamiento a 100% del bocal de captación.....	110
<b>Figura 80:</b> Medición de caudales después de la descolmatación y construcción de la parte fusible del barrage.....	111

**Palabras Clave:**

**Captación derivadora:** estructura en forma de dique vertedor que es interpuesto en el cauce de un río, con el objetivo de desviar sus aguas y poderlas extraer por alguna de las márgenes o por ambas.

**Descolmatación inducida:** proceso de remoción de sedimentos aplicando alguna técnica y aprovechando la acción de la erosión hídrica.

**Barrage fijo:** estructura fija de concreto que levanta el nivel del agua para derivarla hacia un sistema de riego o consumo humano.

**Barrage fusible:** parte móvil del barrage que cumple la función de romperse en máximas avenidas con el objetivo de favorecer a la descolmatación de la estructura.

**Sedimentos:** son partículas que provienen de las rocas o suelos y que son acarreadas por las aguas que escurren por un cauce.

**Eficiencia de captación:** relación porcentual entre el caudal que ingresa por el bocal y el caudal requerido para satisfacer la demanda.

## RESUMEN

Para aprovechar el agua de las cuencas del Río Mashcón en Cajamarca, se han construido captaciones derivadoras con barrage fijo. Dichas estructuras, inevitablemente están afectadas por la acumulación de sedimentos, esto repercute negativamente en la eficiencia de captación. La descolmatación inducida implica que la remoción de sedimentos no se da de manera espontánea, sino que es provocada mediante métodos diseñados específicamente para movilizar los sedimentos acumulados. Para lograr esto, se utiliza la fuerza erosiva del agua en las épocas más lluviosas, se plantea primeramente aperturar el 20% del barrage actual en la parte central, luego se propone una nueva estructura denominada Barrage Fijo – Fusible Central, que está compuesto por dos partes laterales fijas con una inclinación de  $20^\circ$  respecto a la línea transversal del cauce y una parte fusible equivalente al 20% del ancho del río. Se lleva a cabo este estudio por medio de la construcción de un modelo hidráulico a escala 1/20 de la captación Huacaríz y un tramo de 100 metros aguas arriba del barrage. Los caudales utilizados en el modelamiento varían desde  $1.473 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $11.336 \text{ m}^3/\text{s}$ . Las pruebas realizadas con el barrage actual, demostraron que solo se producía descolmatación en la parte céntrica del cauce y no en los laterales que es donde se emplaza el bocal. Esto obligó a la destrucción total del barrage actual y a diseñar y construir el nuevo barrage. Las pruebas ejecutadas en esta nueva estructura, demuestran que, al finalizar la época de lluvias, se ha logrado eliminar 0.96 m de altura de los sedimentos aledaños al barrage y 0.26 m de altura en el inicio del tramo colmatado que está a 70 m aguas arriba del barrage, con esto se ha descolmatado en su totalidad el bocal de captación. Finalmente, los caudales derivados por la nueva estructura descolmatada, muestran un 100% en eficiencia en la captación.

## ABSTRACT

In order to tap water from the basins of the Mashcón River in Cajamarca, fixed-barge diversion basins have been built. These structures are inevitably affected by sediment accumulation, which has a negative impact on catchment efficiency. The main objective of this research is to determine the effect of induced siltation on the efficiency of the Huacariz diversion catchment, with a central fuse-barge. In order to achieve the induced siltation, the erosive force of the water in the rainiest periods is used. Firstly, it is proposed to open 20% of the current barrage in the central part, then a new structure called Fixed Barrage - Central Fusible Barrage is proposed, which is composed of two fixed lateral parts with an inclination of  $20^\circ$  with respect to the transversal line of the riverbed and a fusible part equivalent to 20% of the width of the river. This study was carried out by constructing a 1/20 scale hydraulic model of the Huacariz catchment and a 100 meters section upstream of the barrage. The flows used in the modelling vary from 1,473 m<sup>3</sup>/s to 11,336 m<sup>3</sup>/s. The tests carried out with the current barrage showed that only the central part of the riverbed was silted and not the sides, which is where the nozzle is located. This forced the total destruction of the current barrage and the design and construction of the new barrage. The tests carried out on this new structure show that, at the end of the rainy season, it has been possible to eliminate 0.96 m of sediment height around the barrage and 0.26 m of height at the beginning of the clogged section 70 m upstream of the barrage, thereby completely unclogging the catchment basin. Finally, the flows derived from the new unclogged structure show 100% catchment efficiency.

## **CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

#### **1.1.1 Contextualización**

En las cuencas de Cajamarca, para aprovechar el agua de los ríos, se han construido captaciones derivadoras con barrage fijo, tal que aguas arriba se ha producido una inevitable acumulación de sedimentos, lo cual representa un problema que afecta al funcionamiento correcto de bocal de captación, ya que ocasiona una obstrucción total o parcial. El resultado de esto es que la eficiencia de captación se reduce considerablemente.

La cuenca del Río Mashcón cuenta con sesenta (60) sistemas de riego, los cuales están conformados por 57 bocatomas, de las cuales catorce (14) en el Río Mashcón y cuatro (4) en el Río Chonta, nacen de manantiales, lagunas o puquíos, mientras que las restantes se inician en ríos o quebradas. Los sectores de riego de mayor envergadura son los siguientes: Huacariz en la cuenca del Río Mashcón con 487 has y Cristo Rey Shahuacruz en la cuenca del Río Chonta con 488 has. (ANA 2010b)

La mayoría de captaciones en las cuencas de Cajamarca son con fines de riego; los usuarios son los encargados del mantenimiento de la captación. Muchas de las captaciones tienen una antigüedad mayor de 40 años, algunas han sido reconstruidas y otras habilitadas debido a que colapsaron. (Huamán J. 2016)

Gran parte de estas estructuras están siendo dañadas por la colmatación de sedimentos, lo cual repercute negativamente en la cantidad requerida del caudal de derivación.

(Huamán J. 2016), estudiando la captación Río Grande de Cajamarca, comprobó que una captación nueva puede colmatarse en un año.

Tomando en cuenta los estudios realizados por (Huamán J. 2016) una de las soluciones para evitar la colmatación en estas estructuras es que se construya un barrage fusible.

Dicho barrage está compuesto por una parte fija, y otra parte fusible (enrocado) en los extremos de la parte fija. La parte fusible tiende a colapsar por acción de una avenida, permitiendo el paso de sólidos que transporta el río. La reposición del enrocado se hará en forma manual cuando el nivel del agua haya descendido. (Huamán J. 2016)

(Bustamante E. 2018), da a conocer que la Captación Huacariz, ubicada en el Río Mashcón, se ha construido con fines agrícolas y ganaderos, además deriva agua con un caudal promedio de  $0.41\text{m}^3/\text{s}$ . Esta captación se encuentra colmatada por sedimentos, por lo tanto, es de suma importancia realizar un estudio para determinar la descolmatación inducida reemplazando la parte central del barrage fijo por un barrage fusible, utilizando un modelo hidráulico físico a escala reducida.

### **1.1.2 Descripción Del Problema**

La captación Huacariz, es una estructura conformada por un barrage fijo tipo Creager de 1.10m de alto y 30m de longitud, esta captación deriva agua hacia el canal que tiene el mismo nombre, dicho canal abastece a un sector amplio de riego (487 ha).

Durante el paso de los años ha sido inevitable la colmatación por sedimentos de esta estructura, esto ocasiona un gran problema que impacta negativamente en la eficiencia de captación, esto quiere decir que no es posible derivar el caudal requerido para abastecer el sector de riego, además es una tarea muy difícil realizar la limpieza y descolmatación de la estructura.

Actualmente son muy escasos los estudios respecto a descolmatación de captaciones, por lo que este tema merece la pena ser tratado y estudiado, especialmente en zonas altoandinas como es Cajamarca.

### **1.1.3 Formulación del Problema**

¿Cómo solucionar la colmatación de sedimentos en la captación derivadora Huacariz?

## **1.2 Justificación de la Investigación**

### **1.2.1 Justificación científica**

Desde un enfoque científico, esta investigación es fundamental para ampliar el conocimiento sobre los procesos de colmatación y descolmatación en captaciones derivadoras,

un problema recurrente en sistemas de riego de zonas altoandinas como Cajamarca. La acumulación de sedimentos en las estructuras de captación representa una limitante para la eficiencia hidráulica y el suministro de agua, afectando directamente la disponibilidad del recurso para el sector agrícola. Actualmente, los estudios sobre descolmatación inducida en captaciones son escasos, por lo que esta investigación aportará información valiosa a la literatura científica, permitiendo evaluar los efectos de un barrage fusible central como alternativa para mejorar la eficiencia de captación. Además, el empleo de un modelo hidráulico físico a escala permitirá obtener datos experimentales sobre la dinámica de sedimentos y su relación con el diseño estructural, lo que podrá ser referencia para futuras investigaciones en ingeniería hidráulica y gestión de recursos hídricos.

### **1.2.2 Justificación técnica práctica**

Desde el punto de vista técnico y práctico, la presente investigación contribuirá al diseño y evaluación de estructuras de captación más eficientes para prevenir la colmatación por sedimentos. Se empleará un modelo hidráulico a escala 1/20 para simular escenarios reales y analizar el comportamiento del flujo en relación con la sedimentación y la descolmatación, realizando el modelamiento de una nueva estructura, denominada Barrage Fijo – Fusible Central, que tendrá la particularidad de autodescolmatarse aprovechando la fuerza generada por el río cuando se producen avenidas. Para lograr la descolmatación cerca del bocal de captación es necesario que las partes fijas del barrage tengan una ligera inclinación respecto a la línea transversal al cauce, esto aumenta la velocidad del flujo en los costados y por lo tanto también el arrastre de los sedimentos, por otro lado para reducir la filtración por medio del barrage fusible reconstruido y para que esto no afecte de manera considerable al caudal de toma, se deberá considerar una granulometría uniforme para las rocas al momento de la reconstrucción.

Los resultados obtenidos servirán para establecer criterios de diseño que permitan replicar la solución en otras captaciones con problemas similares, contribuyendo a mejorar la gestión del agua en sistemas de riego.

### **1.2.3 Justificación institucional**

A nivel institucional, esta investigación es de gran relevancia para organismos responsables de la gestión del agua y el desarrollo agrícola en la región de Cajamarca. La información obtenida podrá ser utilizada por entidades como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), gobiernos regionales y locales, y asociaciones de regantes, para la implementación de estrategias que optimicen la infraestructura hidráulica existente y garanticen un suministro adecuado de agua para el riego. La validación experimental del barrage fusible central podrá servir como referencia para futuras normativas y diseños en captaciones derivadoras, fortaleciendo la capacidad técnica de las instituciones en la gestión de recursos hídricos.

### **1.2.4 Justificación personal**

A nivel personal, la realización de esta investigación representa un desafío académico y profesional que me permitirá profundizar en el estudio de la ingeniería hidráulica aplicada a la problemática de la colmatación en captaciones. El desarrollo de este estudio me brindará la oportunidad de aplicar conocimientos adquiridos en el campo de la modelación física y el diseño de estructuras hidráulicas, contribuyendo con una solución innovadora para mejorar la eficiencia de captación en la región. Además, este trabajo me permitirá aportar con información técnica de valor que podrá ser utilizada por comunidades y profesionales dedicados a la gestión del agua, consolidando mi compromiso con el desarrollo sostenible y la optimización de los recursos hídricos en zonas de alta vulnerabilidad.

## **1.3 Delimitación de la Investigación**

Este estudio se desarrollará tomando como prototipo a la captación Huacariz de la cuenca del Río Mashcón-Cajamarca.

Para construir del modelo físico se usará datos topográficos del tramo de río donde se emplaza la captación; este modelo permitirá representar la implementación de un nuevo Barrage, medición de eficiencia de autodescolmatación, caudal necesario para el proceso de autodescolmatación.

Las mediciones en el modelo físico se realizarán durante un periodo de tres meses.

Este proyecto involucra el diseño hidráulico y geométrico de una Captación Derivadora de Alta Montaña, para lo cual es indispensable los estudios hidrológicos, hidráulicos, mecánica de suelos y morfología del río en el tramo a evaluar.

#### **1.4 Limitaciones**

La implementación del nuevo barrage no se puede realizar en la estructura real, por lo tanto, es dificultoso la ejecución de pruebas in-situ.

#### **1.5 Objetivos**

##### **Objetivo General**

Determinar el efecto de la descolmatación inducida en la eficiencia de la captación derivadora Huacariz, con un barrage fusible central.

##### **Objetivos Específicos**

- 1) Caracterizar el río Mashcón hasta 300 m aguas arriba y 50 m aguas abajo de la captación Huacariz.
- 2) Caracterizar la captación derivadora Huacariz
- 3) Determinar la morfología del río Mashcón, aguas arriba del barrage, antes y después de la descolmatación inducida.
- 4) Construcción de un modelo físico a escala 1/20.
- 5) Diseñar geométrica e hidráulicamente la estructura con barrage fusible central.
- 6) Estimar la eficiencia de captación antes y después de la descolmatación inducida.

## **CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes Teóricos**

(Huamán J. 2016), realizó un estudio denominado “Efectos de la descolmatación inducida en la eficiencia de captación y en la morfología del río grande-Cajamarca, aguas arriba del barrage”. La descolmatación inducida se desarrolló basándose en la ruptura del barrage fijo en sus dos costados, y a la fuerza erosiva del agua en los meses de enero, febrero y marzo de 2015. Se utilizó un modelo hidráulico a escala 1/25, el prototipo fue la captación Tres Molinos, y una longitud de 50 m del cauce aguas arriba del barrage. Al culminar el mes de marzo el resultado fue un 100% de eficiencia de captación, así como un arrastre del 93% de sedimentos retenidos en un tramo de 50 m aguas arriba del barrage. El estrato del río colmatado decreció entre 2.20 m y 1.25 m en distintas secciones, excepto en la parte convexa de la curva donde descendió 0.20 m, y el bocal quedó liberado de sedimentos.

(Calle S. 2018), desarrolló una investigación que lleva como título “Estudio de las Técnicas de Descolmatación de Embalses”, el objetivo fue hallar el método más eficiente y el más rentable. Empleó primordialmente información técnica y económica, como también los principales usos de estos métodos en el mundo. Concluye que la metodología de remoción hidráulica es la más rentable y una de las más aplicadas. Esta técnica emplea la fuerza erosiva del agua para arrastrar las acumulaciones de sedimentos mediante la apertura de las compuertas de fondo.

(Farías M. et al. 2018), menciona que, los miembros del “Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la universidad de Piura”, en los años 2015 a 2018, realizaron la investigación “Desarrollo de una metodología de descolmatación de un reservorio utilizando la misma energía del agua y a un bajo costo – Caso piloto: Reservorio Poechos”. Los estudios realizados dan a conocer que el reservorio Poechos se podría operar de tal forma que la propia energía del agua ocasione el desalojo de sedimentos, así se frenará la pérdida de su capacidad y más bien se conseguirá su recuperación progresiva. Parte del procedimiento supone que un caudal óptimo es capaz de arrastrar sedimentos con una operación adecuada, con la finalidad de que no perjudique la atención de la demanda a lo largo del año.

(Aponte C. 2018), ha realizado una tesis titulada “Factibilidad de Aplicar la Metodología de Descolmatación UDEP en el Embalse Gallito Ciego”. Tuvo como principal objetivo desarrollar un análisis de factibilidad al emplear la metodología de descolmatación UDEP en embalses, para Gallito Ciego. Con ese propósito, tras el estudio previo de esta metodología, se reunió información del embalse; mediante la cual se procedió a ejecutar los análisis de sedimentación, hidrología e hidráulica. En el embalse Gallito Ciego, mediante estudios, se evidencia que la compuerta de fondo se encuentra inutilizable, esto a raíz de que gran cantidad de sedimentos están cerca de la presa. También, logró comprobar que es posible obtener capacidad de arrastre con la misma fuerza del agua en un tramo aproximado de 5km. Concluye que es viable e indispensable la aplicación de esta en el embalse Gallito Ciego.

## **2.2 Bases Teóricas**

### **2.2.1 Caracterización hidráulica de un río**

#### **Morfología de un río**

Menciona (Rocha A. 2006), que son muchos los aspectos que hay que abordar para examinar el desarrollo y transformación de la morfología fluvial. Es de gran importancia en el diseño hidráulico conocer dichos aspectos o factores.

El mismo autor asegura que uno de los elementos más influyente en el comportamiento fluvial es la intervención humana en el cauce. La construcción de , obras de defensa, represas, barrajes, puentes y otras estructuras, ocasionan cambios intensos en el escurrimiento.

(Apacla R. 2014) considera que las características morfológicas de un río desde la perspectiva de las propiedades geométricas, incluyen los conceptos de:

#### **– Descarga formativa (caudal dominante):**

La configuración del cauce de un río es el producto de la constante variación en las descargas, y la descarga a cauce completo o lleno, es generalmente la que forma el cauce; por otro lado, los caudales bajos con movimiento reducido de sedimentos, no tienen significancia en la formación del cauce (Organización Meteorológica Mundial 2020).

## – Perfil longitudinal de la corriente

(Apacla R. 2014), asegura que las condiciones o características aguas arriba son las que ayudan a determinar la pendiente de una corriente, pero el nivel aguas abajo también determina la elevación y ubicación de cada punto del perfil. Los principales elementos que controlan la pendiente son: la descarga, la cantidad de sedimento de fondo y su diámetro.

## – Clasificación de los ríos de acuerdo a su edad

**Ríos jóvenes:** son los que se encuentran en un estado inicial y se ubican en las montañas, se caracterizan por tener altas pendientes y una sección de tipo “V”. Estos ríos están en constante cambio, con fluctuaciones notables en la profundidad del lecho y, como resultado, en los niveles del agua. Esto forma parte de su evolución natural de construir y desgastar su entorno.

**Ríos maduros:** se encuentran en valles extensos y su pendiente es relativamente bajas; acá ya no existe erosión en el fondo, sino en los márgenes. Estos ríos son estables, y su sección transversal es capaz de mover el sedimento en toda su trayectoria. En el río maduro existen extensiones de tierra inundables y algunos meandros. En las áreas cercanas a estas extensiones, se encuentran zonas destinadas a la agricultura y la urbanización. También se puede encontrar estructuras hidráulicas para dirigir el curso del río o para aprovechamiento hídrico.

**Ríos viejos:** se encuentran en valles muy extensos y planicies con anchos que suelen ser 15 a 20 veces mayores que el ancho de los meandros, además sus pendientes son muy reducidas. En este tipo de ríos se acumulan naturalmente sedimentos, a lo largo de las márgenes. Se aprovecha al máximo todo el valle, con notables desarrollos agrícolas, urbanos e industriales. (Rabanal D. 2018).

### 2.2.2 Topografía

#### a) *Levantamiento topográfico de un tramo de río*

(Camargo J. y Franco V. 1993), sugieren llevar a cabo el levantamiento topográfico de un tramo recto y uniforme del cauce, adecuado para el propósito del estudio.

**b) Pendiente longitudinal del tramo de río evaluado**

El cálculo de la pendiente del cauce es necesario realizarlo en un tramo de no menos de 200m donde no exista influencia por alguna estructura que esté afectando el cauce natural del río.

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{s_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{s_2}} + \frac{l_3}{\sqrt{s_3}} + \dots + \frac{l_n}{\sqrt{s_n}}} \right]^2 \quad (1)$$

Donde:

n: número de tramos iguales en los cuales se subdivide el perfil

$s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ : pendiente de cada tramo (m)

S: pendiente media del cauce (m/m) (Taylor y Schwarz).

$l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ : longitud por cada tramo (m)

L: longitud total (m)

**2.2.3 Hidrometría**

Según (Poletto C. et al. 2023), las principales características que al ingeniero Hidráulico le interesa conocer son la velocidad del cauce, el caudal y el poder erosivo de las corrientes, la determinación del nivel del agua en un momento dado y el gasto durante el estiaje y las avenidas. Aspectos que son de importancia básica para conocer el comportamiento hidráulico de un río.

**a) Aforo de caudales**

**Método sección-velocidad**

De acuerdo con (Camargo J. y Franco V. 1993), después de elegir la sección donde se quiere conocer el caudal, se puede medir el área para distintos tirantes. Entonces, luego para calcular el gasto vinculado con esa área, es necesario medir la velocidad promedio del flujo. Para obtener una buena aproximación, se debe dividir a la sección transversal de la corriente en áreas

parciales, para eso se trabaja con fajas verticales. El caudal que para por la sección se determina con:

$$Q = \sum_{i=1}^n a_i v_i \quad (2)$$

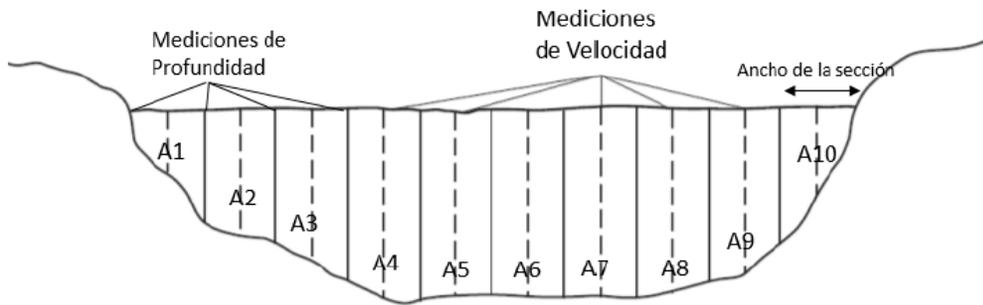
Donde:

Q: caudal (m<sup>3</sup>/s)

a<sub>i</sub>: área de la faja vertical i (m<sup>2</sup>)

v<sub>i</sub>: velocidad media de la faja vertical i (m/s)

**Figura 1:** Dovelas para subdividir un cauce natural y medir caudales



**Fuente:** (ICC 2017)

**Tabla 1:** Distancias mínimas entre dovelas verticales recomendadas

Ancho total mínimo del río (m)	Distancia entre verticales (m)
Menos de 2	0.2
2 - 3	0.3
3 - 4	0.4
4 - 8	0.5
8 - 15	1
15 - 25	2

25 - 35	3
35 - 45	4
45 - 80	5
80 - 160	10
160 - 350	20

---

**Fuente:** (Villón M. 2002)

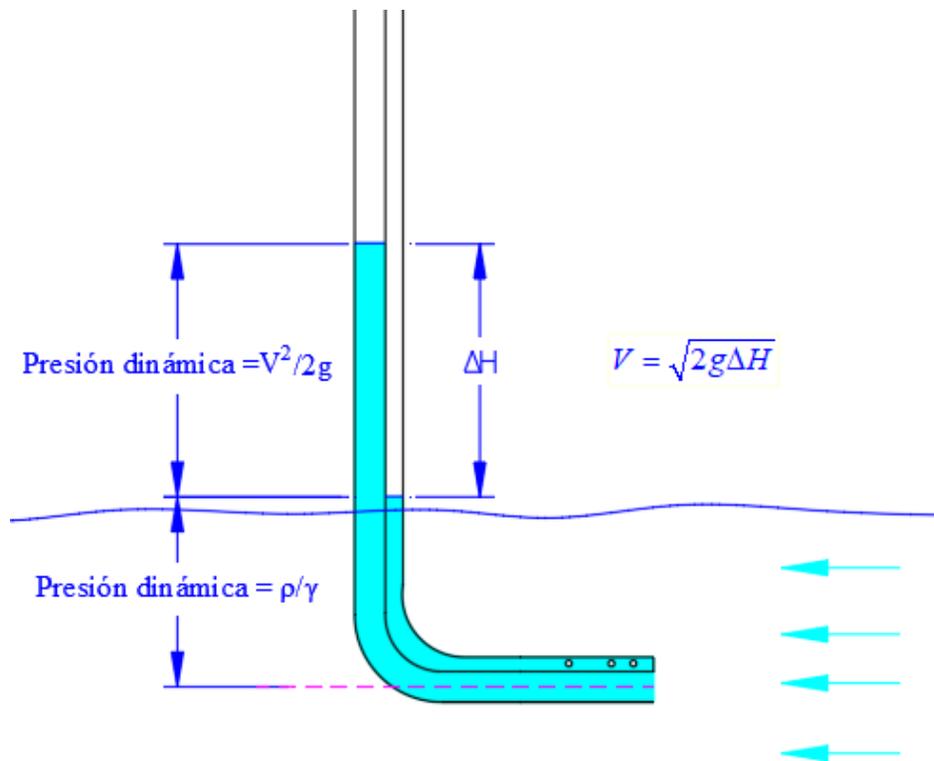
Las condiciones del cauce son cruciales al momento de elegir la manera de hacer un aforo. Si se tiene un cauce que puede cambiar sus niveles a medida que se realiza el aforo, es recomendable tomar medidas de las profundidades de manera sucesiva a medida que se avanza de un extremo hacia el otro (ICC 2017).

#### **i. Medición de velocidades**

##### **– Tubo de Pitot**

De acuerdo con (Azevedo J. 1998), este instrumento se compone de una o dos mangueras fabricadas con material transparente con un extremo curvado hacia el flujo de agua, una manguera mide la presión estática y la otra mide la presión dinámica. Es fácil de construir y no se utiliza materiales de alto costo, teniendo en cuenta el elevado precio de equipos más sofisticados para medir velocidades en flujos de agua, el tubo de Pitot es una alternativa favorable.

**Figura 2:** Medición de velocidades mediante tubo de Pitot



**Fuente:** Elaboración propia

$$V = \sqrt{2g\Delta H} \quad (3)$$

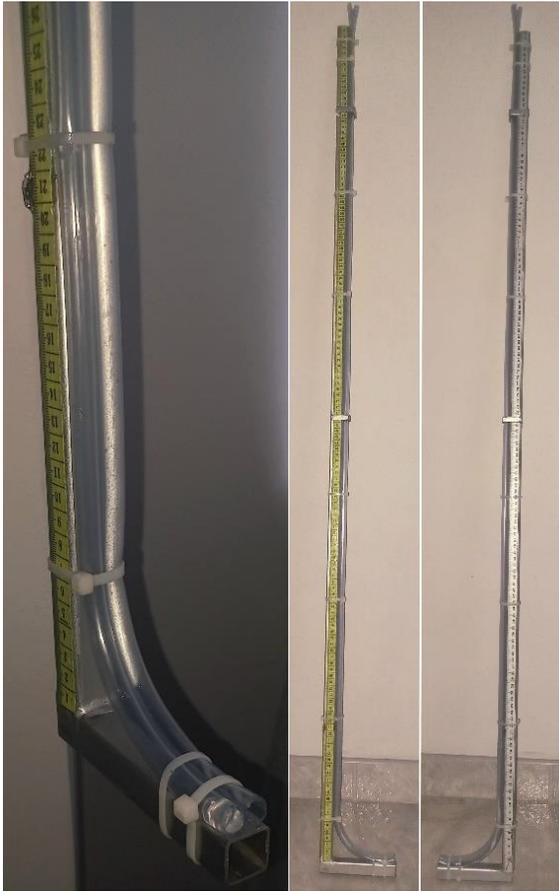
Donde:

V: velocidad medida a 60% de profundidad del tirante (m/s)

$\Delta H$ : diferencia entre nivel dinámico y nivel estático (m)

g: aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

**Figura 3:** *Tubo de Pitot*



**Fuente:** *Elaboración propia*

### – Correntómetro

Es un instrumento utilizado para la medición de velocidades en puntos determinados y distintas profundidades de una corriente de agua (OMM 2020).

#### ✓ **Sensor de velocidad de flujo y temperatura PASCO PASPort (PS-2130)**

Su funcionamiento se basa en una hélice que está montada sobre un eje de baja fricción fabricado en latón. Los imanes de la hélice giran a medida que el agua se mueve, y las revoluciones son registradas por un elemento sensor de efecto Hall (PASCO 2024).

**Figura 4:** *Sensor PASCO PASPort (PS-2130)*



**Fuente:** (PASCO 2024)

Este sensor se puede utilizar con el software SPARKvue, que está disponible como aplicación gratuita para dispositivos Chromebook, iOS y Android (PASCO 2024).

#### ***b) Determinación de caudal dominante***

Menciona (Basile P. 2018), que para establecer las relaciones de la geometría hidráulica de un río en equilibrio dinámico, es necesario simplificar un rango completo de caudales en un valor único que representa la acción modeladora.

El mismo autor menciona también que, se presenta un caudal dominante que refleja el impacto morfológico de las alteraciones de caudal con el paso del tiempo. Basándose en la investigación de múltiples ríos aluviales, Inglis descubrió que “el caudal dominante es igual al caudal de márgenes llenas”.

Sostiene (Martín J. 2002), que la geometría de un cauce es el resultado de ciertos caudales que ya sea por su frecuencia o magnitud son determinantes. Esto hace referencia al caudal que bordea el cauce y este es el que ocasiona la mayor actividad modeladora, además un caudal mayor es menos repetido, entonces el caudal a cauce lleno viene a ser el caudal dominante.

“El concepto de caudal dominante es apropiado para obtener relaciones de geometría hidráulica de ríos aluviales perennes en condiciones de equilibrio dinámico. Pero, no es adecuado aplicar el concepto de caudal dominante en ríos efímeros” (Basile P. 2018).

– **Ecuación de Manning**

(Apaclla R. 2014) argumenta que esta fórmula es la más comúnmente usada, en el sistema internacional tiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Donde:

Q: caudal (m<sup>3</sup>/s)

A: área de la sección (m<sup>2</sup>)

R: radio hidráulico (m)

S: pendiente del río (m/m)

n: coeficiente de rugosidad de Manning

$$R = \frac{A}{P_m} \quad (5)$$

Donde:

R: radio hidráulico (m)

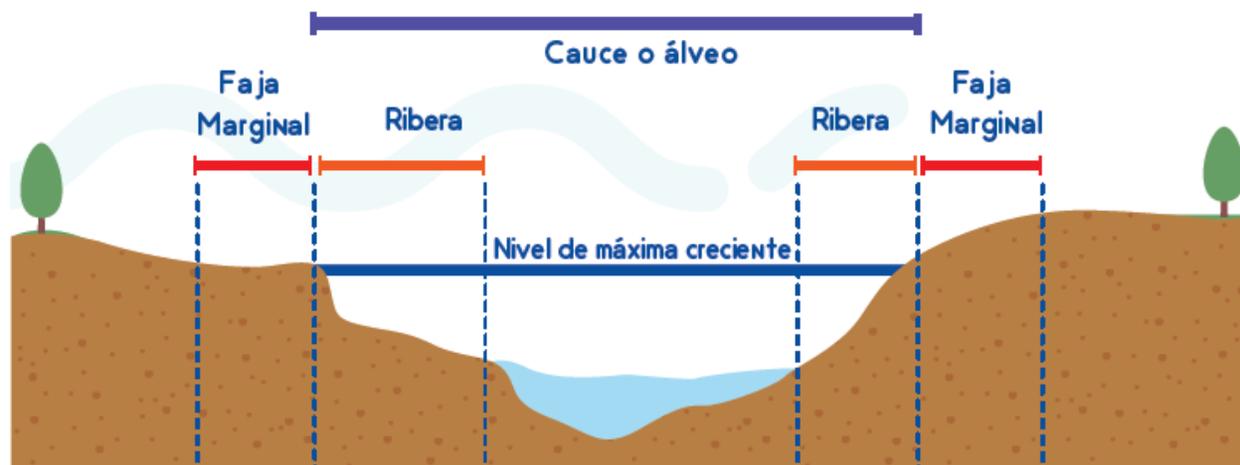
A: área de la sección (m<sup>2</sup>)

P<sub>m</sub>: perímetro mojado (m)

## ii. Identificación de la huella de máximas avenidas

Para reconocer la huella de máxima avenida se debe seleccionar un tramo del río que no esté influenciado por alguna estructura hidráulica, es decir, que este tramo no esté perjudicado por colmatación, erosión, socavación, etc. Es recomendable ubicar 3 secciones con estas características (Camargo J. y Franco V. 1993).

**Figura 5:** *Huella de máximas avenidas*



Fuente: (ANA 2017).

## iii. Rugosidad

(Meyer P. y Müller R. 1948), para combinaciones de materiales de fondo que tienen una importante proporción de tamaños granulométricos, sugieren usar la siguiente ecuación:

$$n = \frac{(d_{90})^{1/6}}{26} \quad (6)$$

Donde  $n$  es la rugosidad y  $d_{90}$  es el tamaño de material de fondo expresado en metros, tal que el 90% del material por peso es menor.

### 2.2.4 Transporte de sedimentos

(Rocha A. 1998) manifiesta que los ríos acarrean abundantes cantidades de sedimentos de fondo o en suspensión. Esto se convierte en un problema para el diseño y operación de una

bocatomas, especialmente en épocas de avenidas que es cuando la cantidad de sólidos transportados aumenta considerablemente.

**a) *Tamaño de sedimentos***

De acuerdo con (Apacla R. 2014), el tamaño es la característica más empleada para clasificar los sedimentos arrastrados por un río: pero, no puede definirse con una sola dimensión, pues las partículas de sedimento no son esferas ni cubos perfectos. Los sedimentos naturales tienen formas múltiples; así que, el tamaño de una partícula estará sujeta a la dimensión que se mida o al método que se utilice para obtener una dimensión característica.

A continuación, se presenta tablas de clasificación de sedimentos:

**Tabla 2:** *Clasificación de materiales sedimentarios de la Unión Geofísica Americana*

Dimensiones de las partículas (mm)		Categoría
4000-2000		pedra redondeada muy grande
2000-1000		pedra redondeada grande
1000-500		pedra redondeada mediana
500-250		pedra redondeada pequeña
250-130		canto rodado grande
130-64		canto rodado pequeño
64-32		grava muy gruesa
32-16		grava gruesa
16-8		grava mediana
8-4		grava fina
4-2		grava muy fina
2-1	2.00-1.00	arena muy gruesa
1-1/2	1.00-0.50	arena gruesa
1/2-1/4	0.50-0.25	arena mediana
1/4-1/8	0.25-0.125	arena fina
1/8-1/16	0.125-0.062	arena muy fina

1/16-1/32	0.062-0.031	limo grueso
1/32-1/64	0.031-0.016	limo mediano
1/64-1/128	0.016-0.008	limo fino
1/128-1/256	0.008-0.004	limo muy fino
1/256-1/512	0.004-0.0020	arcilla gruesa
1/512-1/1024	0.0020-0.0010	arcilla mediana
1/1024-1/2048	0.0010-0.0005	arcilla fina
1/2048-1/4096	0.0005-0.00024	arcilla muy fina

**Fuente:** Unión Geofísica Americana

**Tabla 3:** Clasificación de sedimentos -- Combinación de tablas de Bolinaga y Unión Geofísica Americana

Grupo	Clase	Dimensiones de las partículas (mm)	Tamizado
Bolos	Muy grandes	2 048 - 4 096	
	Grandes	1 024 - 2 048	
	Medianos	512 - 1 024	
	Pequeños	256 - 512	
Cantos o Guijarros	Grandes	128 - 256	
Grava	Pequeños	64 - 128	
	Muy gruesa	32 - 64	
	Gruesa	16 - 32	Pasa el tamiz 3" y es retenido por el tamiz N°4
	Mediana	8 - 16	
	Fina	4 - 8	
Arena	Muy fina	2 - 4	
	Muy gruesa	1 - 2	
	Gruesa	1/2 - 1	Pasa el tamiz N°4 y es retenido por el tamiz N°200
	Mediana	1/4 - 1/2	
	Fina	1/8 - 1/4	
	Muy fina	1/16 - 1/8	

Limo	Grueso	1/32 - 1/16	Pasa el tamiz N°200
	Mediano	1/64 - 1/32	
	Fino	1/128 - 1/64	
	Muy fino	1/256 - 1/128	
Arcilla	Gruesa	1/512 - 1/256	Pasa el tamiz N°200
	Mediana	1/1024 - 1/512	
	Fina	1/2048 - 1/1024	
	Muy fina	1/4096 - 1/2048	

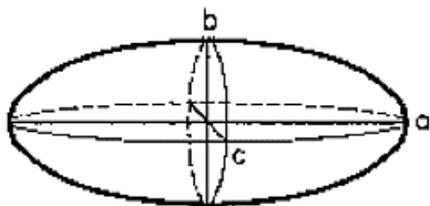
Fuentes: (Bolinaga J. 1979)

### b) *Granulometría*

“La modalidad más usada para analizar la distribución de tamaños en un cauce (granulometría), es tamizar y pesar la fracción de muestra que pasa cada tamiz pero es retenido en el siguiente” (Martín J. 2002).

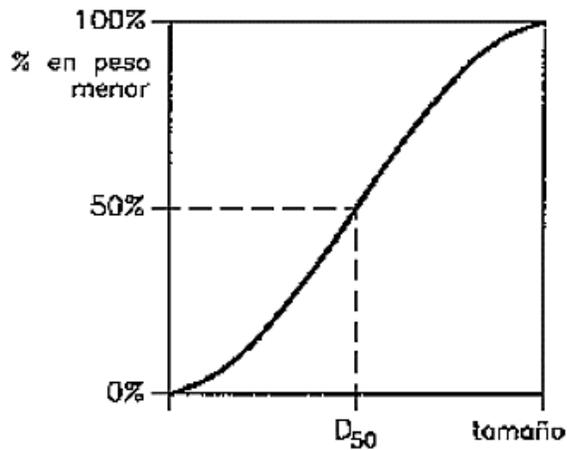
El autor antes mencionado también manifiesta que la propiedad más relevante de una partícula en la hidráulica fluvial es el tamaño, este se entiende como la dimensión del segundo eje (eje b) de un elipsoide al que se puede asemejar una partícula. Se asegura que b es la medida clave para que la partícula pase o se retenga en una malla.

**Figura 6:** *Ejes imaginarios de una partícula*



**Fuente:** (Martín J. 2002)

**Figura 7:** Curva granulométrica acumulada continua



Fuente: (Martín J. 2002)

“En esta curva granulométrica, se entiende la nomenclatura empleada para designar un tamaño,  $D_n$  es el tamaño de manera que el  $n\%$  del peso del material es menor que este” (Martín J. 2002).

### c) *Coefficiente de Uniformidad*

Como expresa (Rocha A.1998), en un cauce natural, una característica es que existe una dispersión en el diámetro de los materiales. Mediante la obtención de una curva granulométrica se puede calcular el coeficiente de uniformidad, que puede ser determinado con la relación  $d_{60}/d_{10}$ .

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (7)$$

(Rodríguez W. 2023), afirma que un coeficiente de uniformidad bajo indica que el suelo es más uniforme. Se les llama suelos uniformes a aquellos que tienen un coeficiente de uniformidad menor a 5 y los que tienen valores menores que 2.5 son suelos muy uniformes, por otro lado, los suelos no uniformes, se caracterizan por tener coeficientes de uniformidad mucho mayores.

#### ***d) Muestreo de sedimentos***

El método más completo se puede llamar muestreo volumétrico, consiste en extraer del cauce un cierto volumen del material subsuperficial. Esto implica retirar primero la capa superficial en un espesor comparable al tamaño de la mayor partícula observada en la superficie. El volumen que se toma a continuación deber ser representativo del material granular del cauce, para lo cual puede seguirse el criterio de que la mayor partícula extraída no represente más del 1 % en peso de toda la muestra, o bien para mayor precisión el 0.1 % en peso. Si, por ejemplo,  $D_{\text{máx}} = 10$  cm estos criterios dan unos 100 y 1000 kg respectivamente. También puede interesar la granulometría de la coraza, por sus implicaciones sobre el inicio del movimiento o la rugosidad en aguas bajas o medias. (Martín J. 2002)

Recomienda (Ochoa T. 2011), para realizar estudios de resistencia hidráulica con caudales moderados, es suficiente usar la granulometría superficial; y para caudales de avenidas se deberá usar una granulometría completa del cauce. Además, el muestreo debe llevarse a cabo a lo largo de todo el tramo del río en análisis, y la cantidad de muestras depende de la uniformidad del material. Para un tramo de unos cien metros de longitud con arenas homogéneas bastará con una sola muestra. Las muestras se pueden tomar en el fondo del cauce sumergido, en barras, en islas o en playas.

El método por conteo requiere la medición del eje intermedio de las partículas superiores a unos 13mm. Cada partícula se mide y se agrupa dentro de un tamaño apropiado o intervalo de clase y luego se desecha. Es suficiente analizar entre 75 y 100 partículas en cada muestreo La conversión o factor de ponderación para cada fracción (intervalo de clase) es directamente proporcional a  $d_{\text{mg}}^3$  -media geométrica de los sedimentos de una determinada fracción. (Ochoa T. 2011)

#### **2.2.5 Colmatación**

La colmatación o también llamada azolvamiento, refiere (Rocha A. 2006), que es el proceso a través del cual los sedimentos arrastrados por la torrente del río se depositan dentro de un embalse, siendo esto la causa de la disminución en su volumen útil.

### **2.2.6 Bocatomas en ríos de montaña**

Según el manual “Criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico”, propuesto por (ANA 2010a), el diseño de la estructura vertedora a ejecutarse en el cauce del río, permitirá el paso de la máxima avenida de diseño, a través del barrage fijo y el móvil, además, la poza disipadora y el muro de encauzamiento deberán contener el salto hidráulico ocasionado por el barrage.

### **2.2.7 Vertedero fijo o presa derivadora**

Sostiene (Rocha A. 2006) que “el vertedero o presa derivadora es estructuralmente un azud, es una presa vertedora y suele llamársele barrage”.

Su función es crear la carga suficiente sobre el canal de derivación para que pueda ingresar el caudal de diseño, su elevación sobre el lecho del río suele ser pequeña (entre 1 a 3 metros).

### **2.2.8 Vertedero móvil o barrage móvil**

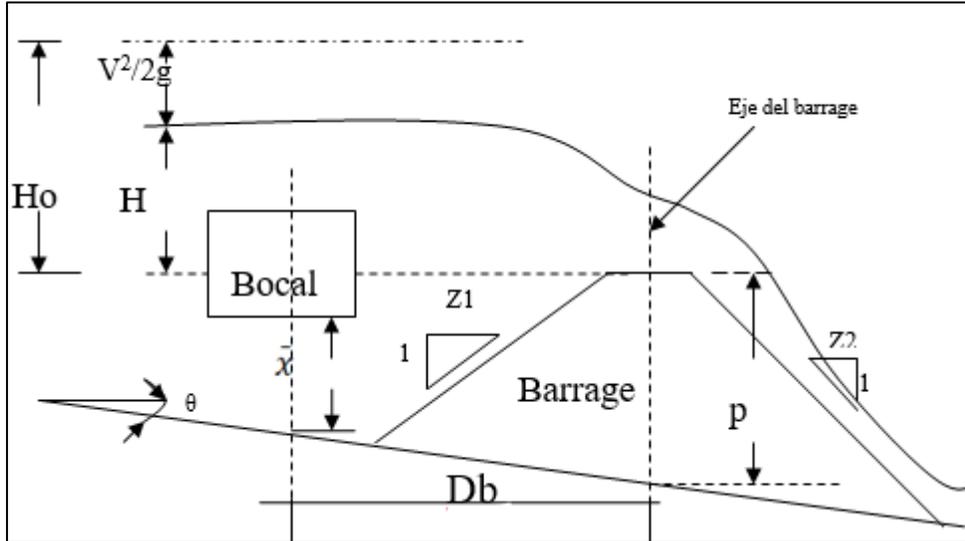
Con base en (Rocha A. 2006), el barrage móvil tiene el propósito de desechar los sedimentos que se encuentren aguas arriba y junto a las ventanas de captación.

(Huamán J. 2016) a través de su investigación en modelo hidráulico a escala 1/35, de una captación de alta montaña, que al existir un barrage fusible en ambos laterales de la parte fija, los sedimentos colmatados frente al bocal son eliminados en su totalidad cuando la parte fusible colapsa gracias a la fuerza erosiva de las avenidas del río.

## 2.2.9 Diseño de una captación derivadora de alta montaña

### A. Barrage

**Figura 8:** Ubicación del barrage y del bocal



**Fuente:** (Huaman J. 2022)

La función del barrage es elevar el tirante del flujo en el cauce. Su expresión hidráulica es la de un vertedor rectangular:

$$Q = C \times L \times H_0^{3/2} \quad (8)$$

Q: Caudal sobre el vertedor, la carga total ( $H_0$ ) se expresa en función de la carga estática (H) y la carga cinética ( $V^2/2g$ ).

$$H_0 = H + \frac{V^2}{2g} \quad (9)$$

$H_0$ : Carga total, la velocidad media aguas arriba del barrage, tomando en cuenta que el fondo del cauce forma un ángulo con la horizontal, está dada por:

$$V = \frac{Q}{(H + P)T - d'_b \cdot \tan \theta T} \quad (10)$$

$$P = \bar{x} + h_0 + d_b \tan \theta + \Delta h \quad (11)$$

$$\bar{x} = d_{90} \quad (12)$$

En  $d_{90}$  corresponde al material grueso del río

Donde:

Q: caudal sobre el vertedor,  $m^3/s$

C: coeficiente de descarga, que depende de la forma de la cresta.

L: longitud del vertedor, m

$H_0$ : carga total, aguas arriba del vertedor, m.

V: velocidad media del flujo, m/s.

H: carga estática, aguas arriba del barrage, m.

P: altura del barrage, m.

T: ancho del cauce, m.

$d'_b$ : distancia entre el eje del barrage y el eje del bocal, m.

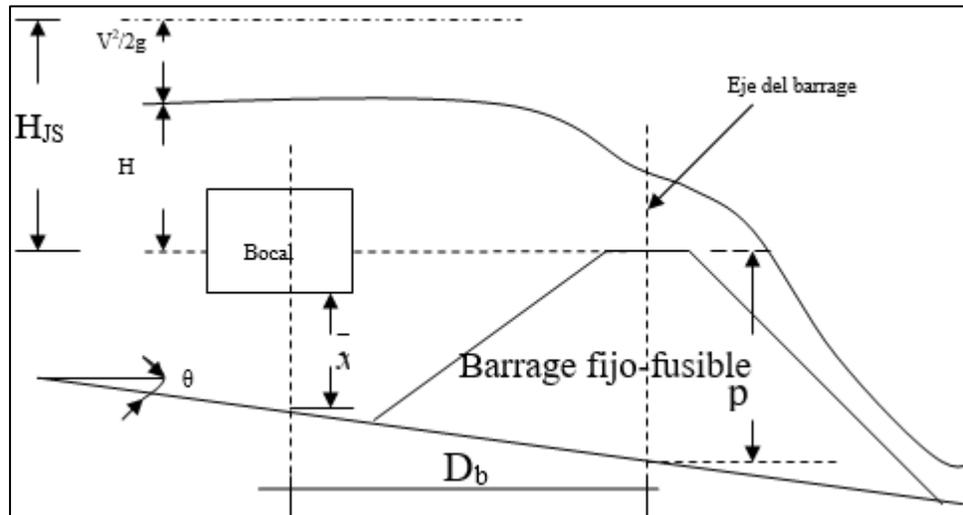
$\theta$ : ángulo formado por la horizontal y el fondo longitudinal del cauce

$\bar{X}$  : ubicación del bocal, m

$\Delta h$ : pérdida de energía por rejilla, m.

## B. Barrage fijo – fusible

**Figura 9:** Barrage fijo-fusible



**Fuente:** (Huaman J. 2022)

El gasto que pasa sobre y a través del barrage fijo-fusible central, antes del colapso, está dado por:

$$Q = C_{JS} L_{tb} H_{JS}^{3/2} \quad (13)$$

Donde:

Q: descarga sobre y a través del barrage fijo-fusible central (periodo de 30 años)

$C_{JS}$ : coeficiente de descarga del barrage fijo-fusible central

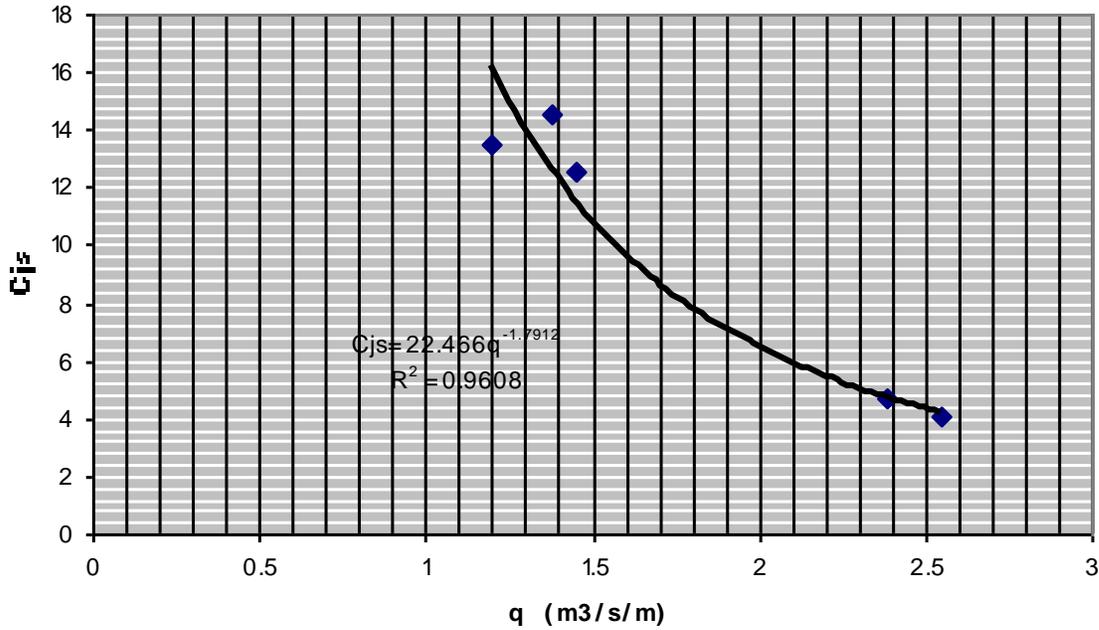
$L_{tb}$ : longitud total del barrage fijo-fusible central, medido en el eje

$H_{JS}$ : carga hidráulica del barrage fijo-fusible central

Si se desprecia la velocidad de aproximación  $H_{JS} \approx H$ ; la altura “P” del barrage fijo-fusible está dado por la ecuación (II). El coeficiente de descarga  $C_{JS}$  ha sido obtenido en forma experimental y se presenta en la **Figura 10**.

**Figura 10:** Coeficiente de descarga para barrage fijo-fusible

El valor de  $C_{js}$  es 4.0 para  $q > 2.6 \text{ m}^3/\text{s/m}$



**Fuente:** (Huaman J. 2022)

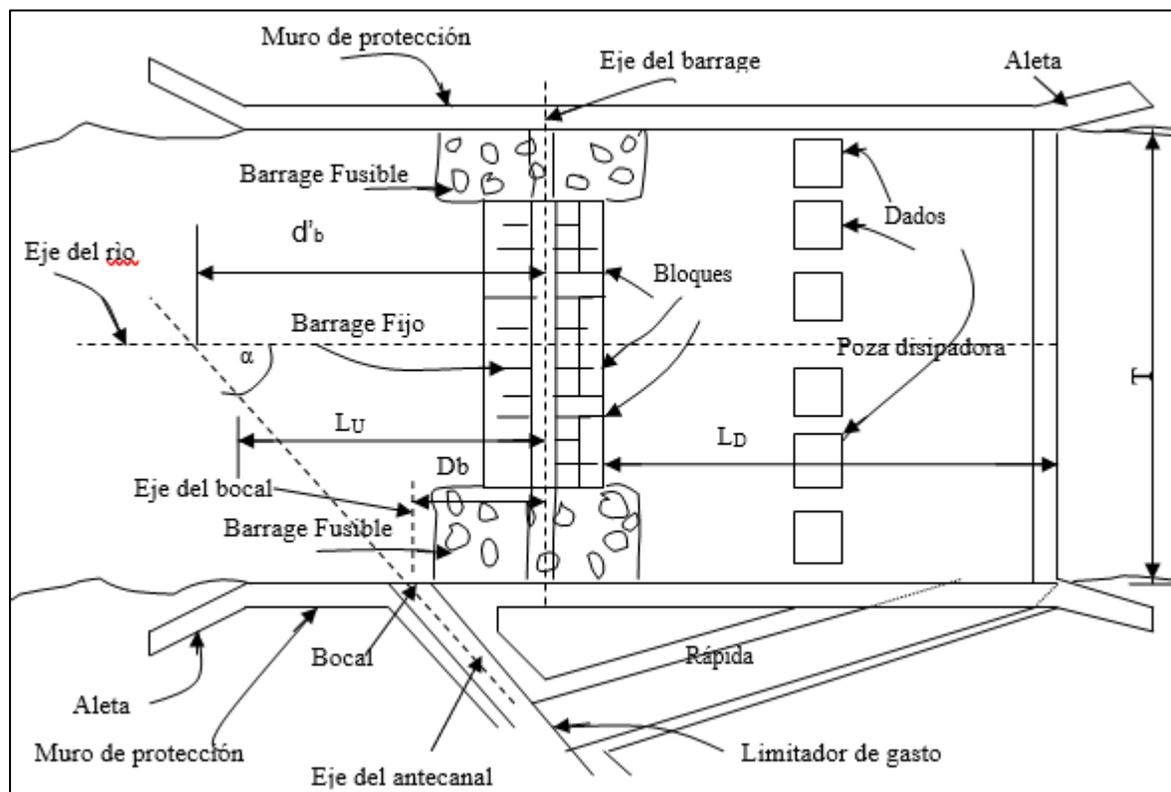
La geometría de la parte fija del barrage, es recomendable que sea trapezoidal y sus taludes deben contribuir a su estabilidad estructural (para prediseño puede emplearse un talud aguas arriba 1:1(H:V) y un talud aguas abajo 2.5:1(H:V). El ancho de la corona de la parte fija debe ser 0.40m como mínimo, por razones constructivas; un valor mayor debe cumplir un objetivo estructural o hidráulico. (Huaman J. 2022)

La parte fusible, también trapezoidal, puede tener taludes aguas arriba y aguas abajo 1:1 (H:V) y un ancho mínimo de corona ( $A_c$ ) equivalente a:

$$A_c = 2(d_{90}) \tag{14}$$

Donde:  $A_c$ : Ancho de corona y el  $d_{90}$  es el perteneciente a gujarros y cantos.

**Figura 11:** Partes de la captación con barrage fijo-fusible



**Fuente:** (Huaman J. 2022)

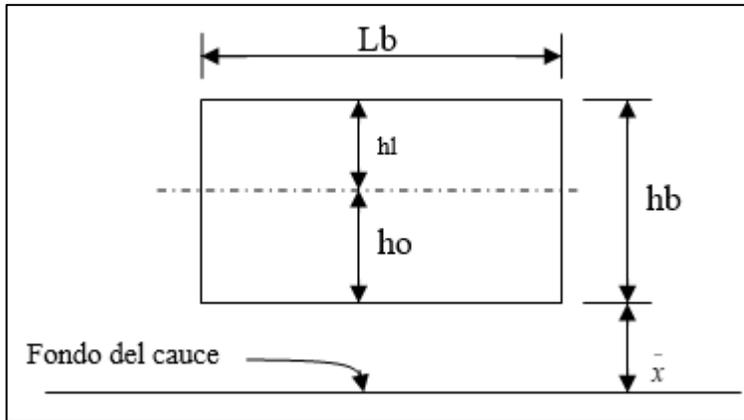
La longitud del barrage fusible es de  $0.1 T$ , en cada costado del barrage fijo.

Es recomendable que  $90^\circ > \alpha > 50^\circ$ , ángulo formado por el eje del río y el eje del antecanal. Este es normal al plano del bocal (Huaman J. 2022).

### C. Bocal

“El caudal requerido  $Q_0$  que ingresa por el bocal, salvando un desnivel o grada, produce una carga hidráulica  $h_0$ ” (Huaman J. 2022).

**Figura 12:** Dimensiones del bocal



**Fuente:** (Huaman J. 2022)

$$h_0 = \left( \frac{Q_0}{0.544\sqrt{g}L_b} \right)^{2/3} \quad (15)$$

La longitud ( $L_b$ ) del bocal será equivalente al ancho ( $B$ ) del del antecanal y la altura de bocal ( $h_b$ ) se calcular con la siguiente expresión.

$$h_b = h_0 + h_l \quad (16)$$

$$h_l = \Delta h + 5 \text{ a } 10 \text{ cm} \quad (17)$$

Donde:

$h_0$ : carga hidráulica en el bocal

$h_b$ : altura del bocal

$h_l$ : altura libre del bocal

La pérdida por rejilla “ $\Delta h$ ” se puede estimar con la siguiente expresión:

$$\Delta h = K \left( \frac{e}{E} \right)^{4/3} \frac{V_1^2}{2g} \quad (18)$$

Donde:

$h_0$ : carga del bocal, m.

$Q_0$ : caudal de derivación,  $m^3/s$ .

$g$ : aceleración de la gravedad terrestre,  $m/s^2$

$\Delta h$ : pérdida por rejilla, m. (mínimo 10 cm)

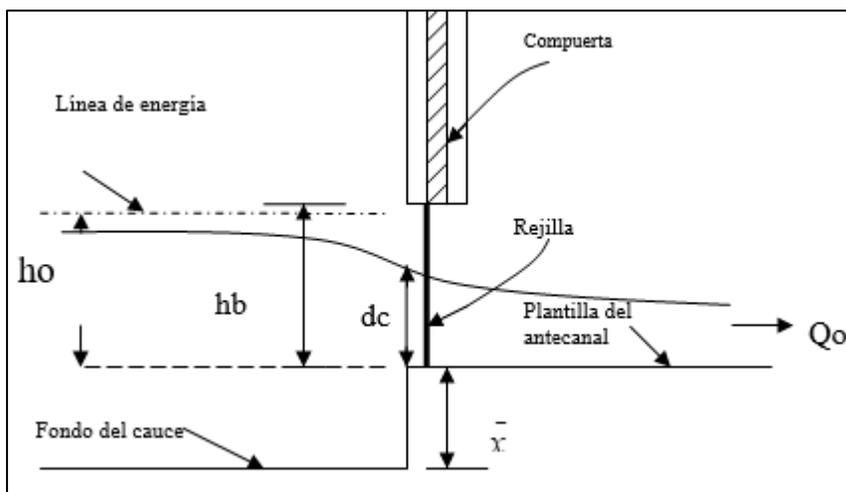
$e$ : espesor de los barrotes, m.

$E$ : espaciamiento entre barrotes, m. Para rejillas finas (3/8” a 1”) y para proteger a los peces, el valor de  $E$  es del orden de los 3 cm e incluso 1 cm.

$K$ : factor que depende de la geometría de la sección transversal de los barrotes. Si es rectangular el factor es 2.42, si es circular el factor es 1.79 y si es elipsoidal el factor es 0.76.

$V_1$ : componente de la velocidad del flujo que forma un ángulo con el eje del río,  $m/s$ ; correspondiente a un caudal con período de retorno de 01 año.

**Figura 13:** Bocal con entrada tipo grada



**Fuente:** (Huaman J. 2022)

Si la pendiente del antecanal es supercrítica se formará al inicio de la grada el tirante crítico “dc”, pero si la pendiente es subcrítica se considera al inicio de la grada un tirante equivalente a la carga “ho” del bocal (Huaman J. 2022).

### Parámetros de diseño hidráulico

Los parámetros se obtienen mediante estudios hidrológicos, hidráulicos, mecánica de suelos, del río y del canal de derivación.

En la **Tabla 4**, se muestran los parámetros necesarios para diseñar una captación derivadora de un río de alta montaña entre altitudes de 2000 y 3000 m.s.n.m. de Cajamarca-Perú.

**Tabla 4:** *Parámetros de diseño hidráulico*

<b>Parámetro</b>
$X_d = d_{50}$ (cm) de gujarros y cantos (material grueso)
$S_0$ (m/m) del río
T (m) ancho del río
$L_{tb}$ (m) longitud total del barrage
$d_{90}$ (cm) del material grueso
$d_{90}$ (cm) de arenas y gravas
$d_m$ (cm) de gujarros y cantos
$d_{50}$ (cm) de arenas y gravas
$d_m$ (cm) de arenas y gravas
S (m/m) pendiente del antecanal
$Q_d$ (m <sup>3</sup> /s) caudal dotación
$Q_1$ (m <sup>3</sup> /s) caudal del río, período de retorno de 1 año
$Db$ (m) distancia entre el eje del barrage y una paralela a este que pase por el centro del bocal, m
$Q$ (m <sup>3</sup> /s) Avenida para período de retorno de 30 años
$\alpha$ (°) ángulo de derivación
$D_{m\acute{a}x}$ (m) bolo del río

**Fuente:** (Huaman J. 2022)

#### D. Vertedero de cresta larga (azud diagonal)

Desde la posición de (Kraatz D. y Mahajan I. 1982), el cálculo de la descarga por un azud diagonal, en pico de pato o de tipo Z, se basa en la fórmula:

$$Q = mB_{(t)}\sqrt{2g} \times H_{(crt)}^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

Donde:

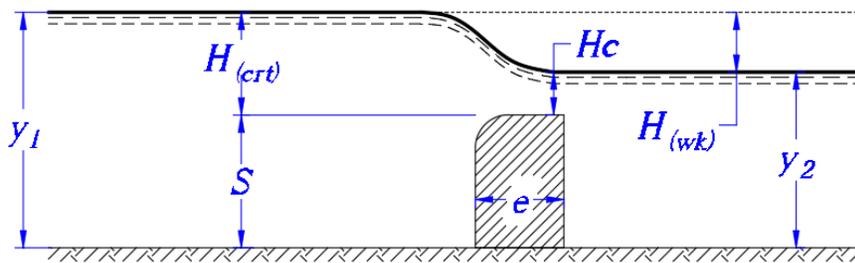
Q: caudal de descarga

m: coeficiente de descarga

$B_{(t)}$ : longitud de la coronación (m)

$H_{(crt)}$ : profundidad del agua, es decir, altura sobre la coronación (m) (véase la **Figura 14**).

**Figura 14:** Diagrama de flujo sobre azud diagonal, en pico de pato o de tipo Z



Fuente: (Kraatz D. y Mahajan I. 1982).

El valor de m depende de la forma de la coronación y del ángulo  $\alpha$ , para  $\alpha$  mayor de  $45^\circ$ , se usan los valores indicados en la **Figura 15**.

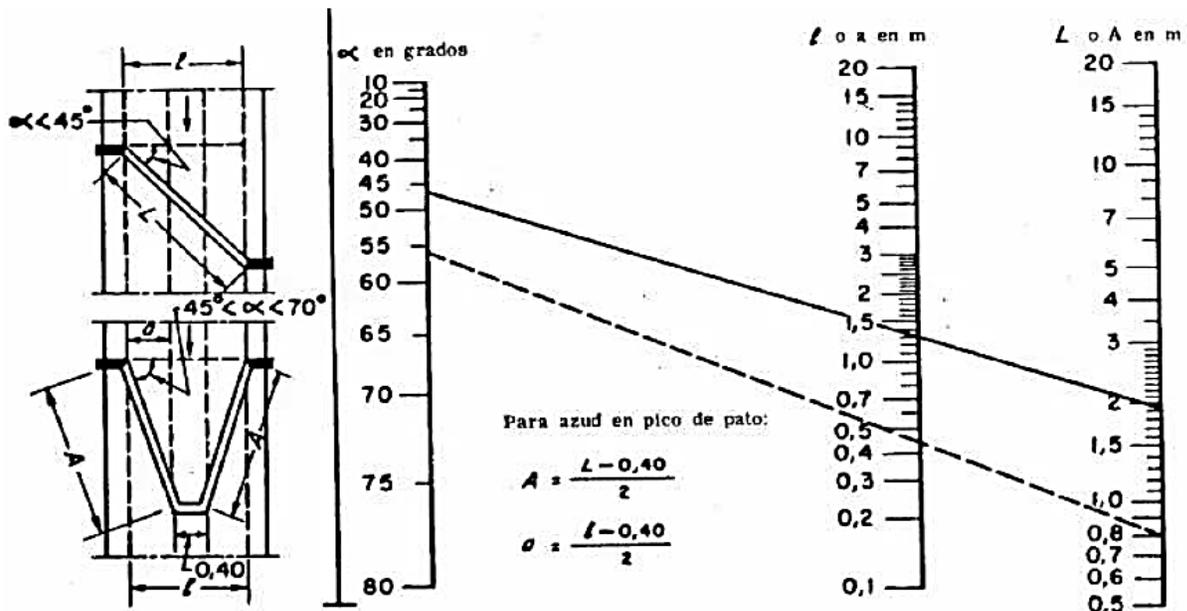
**Figura 15:** Determinación del coeficiente 'm' para ángulos de  $\alpha$  mayores de  $45^\circ$ .

	Azud diagonal	Azud en pico de pato	Azud tipo Z
 Coronación sin redondear m =	0.34	0.32	0.31
 Coronación redondeada aguas arriba m =	0.38	0.36	0.34

Fuente: (Kraatz D. y Mahajan I. 1982).

La **Figura 16** sirve de auxilio para determinar el ángulo  $\alpha$  a partir de la longitud de coronación requerida. Si  $\alpha$  es inferior a  $45^\circ$  se recomienda, por motivos económicos, el empleo de un azud inclinado y no un azud en pico de pato. Para ángulos mayores a  $45^\circ$  hasta  $70^\circ$ , es más conveniente el empleo de un azud en pico de pato. El extremo de la coronación en el azud en pico de pato se fija en 40 cm independientemente de la anchura que tenga el canal en el fondo. Si la punta del pico de pato tiene forma semicircular y un diámetro de 40 cm, la longitud de la coronación será de 60 cm aproximadamente (Kraatz D. y Mahajan I. 1982).

**Figura 16:** Determinación de  $l$  sabiendo los valores de  $B$  y  $S$  y de  $\alpha$



Fuente: (Kraatz D. y Mahajan I. 1982).

### 2.2.10 Eficiencia de captación

Verifica (Huaman J. 2016) que se denomina eficiencia de captación a la relación existente entre el caudal que ingresa por el bocal y el caudal de dotación del proyecto.

$$E_c(\%) = \frac{Q_i}{Q_D} \times 100 \quad (20)$$

Donde:

$E_c$ : Eficiencia de captación en porcentaje (%)

$Q_i$ : Caudal que ingresa por el bocal, (dependerá de las condiciones en las que se encuentra el bocal y del nivel de agua en el río.

$Q_D$ : Caudal de dotación requerido por el proyecto.

### 2.2.11 Modelamiento Físico Reducido

Los ríos tienen un comportamiento muy complejo, entonces se hace necesario usar modelos matemáticos y de modelos físicos para analizar y resolver problemas relacionados al flujo. Los modelos físicos nos dan una gran ventaja que es el poder observar los fenómenos de forma tridimensional (Rocha A.1998).

Un modelo hidráulico debe ser semejante al prototipo, es decir, debe cumplir las leyes de similitud Dinámica, Cinemática y Geométrica, que colectivamente asocian las magnitudes físicas equivalentes entre el prototipo  $A_p$  y el modelo  $A_m$  (Vergara M. 1993).

En obras hidráulicas, los problemas son gobernados por la fuerza atracción de la gravedad. En este caso “la ley de semejanza, llamada semejanza de Froude, garantiza que esta fuerza en su proporción con la resultante, se refleja de manera correcta en el modelo físico. Las escalas de semejanza más útiles que se deducen de la semejanza de Froude son la de la velocidad y la del caudal”. (Martín J. 2002)

Escala de semejanza de velocidad

$$\lambda_v = \lambda^{1/2} \quad (21)$$

Escala de semejanza de caudal

$$\lambda_Q = \lambda^{5/2} \quad (22)$$

Donde  $\lambda$  es la escala geométrica.

#### **a) Tipo de modelo**

Da a conocer (Martín J. 2002), que de acuerdo al análisis de la semejanza de froude, los modelos hidráulicos se clasifican en 4 tipos:

- ✓ Los modelos de estructuras hidráulicas, el fondo es fijo. Por lo que el diseño del modelo debe centrarse principalmente en la precisa replicación de la geometría.
- ✓ Los modelos de lecho fijo o modelos “hidráulicos” de ríos, representan secciones largas de ríos con contornos y lechos invariables.
- ✓ Los modelos de lecho móvil, también conocidos como modelos fluviales, están diseñados para simular tramos extensos de un río con un fondo erosionable. Estos modelos tienen como objetivo estudiar tanto las características hidráulicas como los cambios en el lecho, incluyendo procesos como la erosión y la sedimentación. El modelo debe reproducir con precisión la geometría y la rugosidad del cauce, además de cumplir con los principios de semejanza en relación con el sedimento empleado y el caudal sólido analizado.
- ✓ Los modelos de estructuras locales con lecho móvil, diseñados para analizar fenómenos específicos en la superficie libre y, principalmente, en el lecho, como el caso de la erosión localizada, deben ser capaces de representar fielmente la geometría de la obra. Además, es fundamental que se utilicen criterios de semejanza adecuados para el comportamiento del sedimento.

**b) Selección de escalas**

Considera (Vergara M. 1993), que la elección de las escalas horizontal (Ex) y vertical (Ey) se realiza de manera independiente, con el propósito de diseñar un modelo lo más amplio posible. Para ello, además, se debe considerar la disponibilidad de recursos como presupuesto, espacio físico, tiempo, equipos de instrumentación, materiales para reproducir rugosidades y un suministro adecuado de agua para las pruebas.

Seguidamente se presenta una tabla que incluye las escalas lineales utilizadas para una variedad de problemas, junto con las distorsiones máximas permitidas.

**Tabla 5:** *Escalas lineales comunes en modelos hidráulicos*

<b>MODELOS DE</b>	<b>ESCALAS LINEALES</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Vertederos, tanques amortiguadores, rápidas y túneles.	de 1:20 a 1:70	Modelos sin distorsión de fondo fijo.
Flujo alrededor de estructuras	de 1:5 a 1:25	
FLUJO EN RÍOS Y CANALES	Ex de 1:250 a 1:1000 Ey de 1:50 a 1:100	Modelos con distorsión de fondo fijo. Distorsión máxima de 10
EROSIÓN LOCAL POR CORRIENTES	de 1:20 a 1:60	Modelos de fondo móvil, sin distorsión
TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN RÍOS	Ex de 1:100 a 1:500 Ey de 1:50 a 1:100	Modelos de fondo móvil, con distorsión recomendable de 5

Fuente: (Vergara M. 1993)

**c) Modelos de fondo móvil**

De acuerdo con (French R. 1988), este tipo de modelos se utilizan cuando se desea investigar el movimiento de materiales, ya sea en el talud o en el fondo del canal.

En la práctica, al escalar modelos de ríos con similitud de Froude, es necesario reducir al mínimo los efectos viscosos de escala. El flujo debe ser turbulento y de preferencia rugoso, con la misma rugosidad relativa que la del prototipo. (Huamán J. 2016)

Condición de Reynolds

$$Re_m > 5000 \quad (23)$$

$$(K_s)_r = L_r \quad (24)$$

Donde:

$K_s$ : Altura de rugosidad, el número de Reynolds (Re) se define en términos del diámetro hidráulico, es decir,  $Re = \rho V D_H / \mu$ .

**d) Escalamiento de resistencia**

(Huamán J. 2016) manifiesta que “la rugosidad puede expresarse en función del factor de fricción de Darcy (f) o un coeficiente de resistencia empírico (por ejemplo, coeficiente de Chézy o Gaukler – Manning). En flujos uniformes de equilibrio”, la ecuación de momentum relaciona:

$$V_r = \sqrt{L_r} = \sqrt{\frac{(D_H)_r (Sen\theta)_r}{f_r}} \quad (25)$$

$$D_H = 4 \frac{\text{área de sección transversal}}{\text{perímetro}} \quad (26)$$

Donde:

$V_r$  = escala de velocidades

$L_r$  = escala de longitudes

$(D_H)_r$  = escala de diámetros hidráulicos

DH: diámetro hidráulico

$\theta$  = escala de ángulo formado por la horizontal y el fondo del canal

$f_r$  = escala de factor de fricción de Darcy

En un modelo no distorsionado, cumplir con la similitud de Froude implica que la resistencia al flujo en el modelo será equivalente a la que se presenta en el prototipo original:

$$f_r = 1$$

“La mayoría de los flujos en el prototipo son turbulentos completamente rugosos y el factor de fricción de Darcy en esencia es una función de la rugosidad relativa” (Huamán J. 2016).

La ecuación de Chézy establece que, tanto en los flujos gradualmente variados como en los uniformes en equilibrio, se conserva una relación específica entre las escalas involucradas:

$$V_r = \sqrt{L_r} = \frac{1}{(n_{Manning})_r} ((D_H)_r)^{2/3} \sqrt{(\text{Sen}\theta)_r} \quad (27)$$

Para un modelo no distorsionando, ecuación (27) se transforma en la siguiente expresión:

Escala de rugosidad de Manning

$$(n_{Manning})_r = L_r^{1/6} \quad (28)$$

La ecuación (28) indica que una similitud completa abarca tanto la textura de la superficie como la configuración general de su forma.

### e) *Calibración y verificación del modelo físico*

(Vergara M. 1993) indica que la calibración de un modelo se refiere al ajuste de los instrumentos de medición y equipos de generación, así como al propio modelo con base en mediciones en el prototipo.

Como señala (French R. 1988), “en un modelo físico, la concordancia entre el prototipo y el modelo se obtiene ajustando las características físicas, como la rugosidad de fondo, el caudal, y/o los niveles de agua”. Para calibrar adecuadamente un modelo, se necesitan datos precisos del prototipo relacionados con la geometría, los tirantes de agua, el transporte de sedimentos, y las velocidades.

La verificación implica reproducir un fenómeno bien conocido bajo mediciones de campo, o comparar las del modelo con otros valores estimados de experiencias semejantes.

Logrado esto, se puede decir que el modelo está a punto y, por lo tanto, la confiabilidad de las mediciones para la siguiente fase es mayor. (Vergara M. 1993)

### f) *Similitud sedimentológica*

#### ✓ **Selección del material del lecho**

Este material se seleccionará cumpliendo, por lo menos con la identidad del número de froude, relacionado al grano ( $F^*$ ), en modelo y prototipo.

$$F^* = \frac{\tau}{\Delta\rho \cdot g \cdot d} \quad (29)$$

$$F^* = \frac{\gamma \cdot R \cdot S}{(\gamma_s - \gamma)d} \quad (30)$$

Donde:

R: Radio hidráulico

S: Pendiente

d: Diámetro de la partícula

$\gamma$ : Peso específico del agua

$\gamma_s$ : Peso específico del sedimento

$\tau$ : Esfuerzo cortante

$\rho$ : Densidad en Kg/m<sup>3</sup>

Para cumplir la identidad de Froude tenemos que:  $F_m^* = F_p^*$ , de tal manera:

$$\frac{\gamma \cdot R_m \cdot S_m}{(\gamma_s - \gamma)_m d_m} = \frac{\gamma \cdot R_p \cdot S_p}{(\gamma_s - \gamma)_p d_p} \quad (31)$$

- Considerando que se construye un modelo sin distorsión de escala, entonces las pendientes serán iguales en modelo y prototipo,  $S_m = S_p$ .
- Además, si se usa sedimentos del mismo origen que los del prototipo, entonces los materiales tendrán el mismo peso específico, por lo tanto, podemos decir que:

$$(\gamma_s - \gamma)_m = (\gamma_s - \gamma)_p.$$

De esta forma, la ecuación (31) queda simplificada de la siguiente manera:

$$\frac{R_m}{d_m} = \frac{R_p}{d_p} \quad (32)$$

Haciendo un arreglo se deduce que:

$$\frac{R_m}{R_p} = \frac{d_m}{d_p}$$

Es sabido que:  $\frac{R_m}{R_p}$  viene a ser representar la relación de longitudes (Lr) y  $\frac{d_m}{d_p}$  la relación de diámetros de partículas (dr).

En conclusión, la escala de diámetro del grano será igual a la escala geométrica, cuando se realiza un modelo sin distorsión y además cuando en el modelo se usa sedimentos del mismo origen natural que los del prototipo.

### 2.3 Definición de términos básicos

**Colmatación:** proceso a través del que los sedimentos arrastrados por el río, se acumulan en el fondo de un embalse, disminuyendo su capacidad de almacenamiento y reduciendo su eficiencia hidráulica (Huamán J. 2016).

**Descolmatación inducida:** se refiere al proceso de remoción de sedimentos aplicando alguna técnica y aprovechando la acción de la erosión hídrica. Esto se lleva a cabo abriendo parcialmente una sección del barrage fijo (Huamán J. 2016).

**Barrage:** barrera tipo vertedero, construida en el cauce de un río con el propósito de elevar el nivel del agua y desviarla hacia un canal de abastecimiento (Huamán J. 2016).

**Barrage fijo – fusible central:** está formado por dos secciones laterales fijas, construidas en hormigón, y una sección central fusible de enrocado. La parte fusible está diseñada para colapsar durante una avenida en el río, permitiendo el paso de los sedimentos acumulados aguas arriba de la estructura, las partes fijas tendrán una inclinación de 20 grados, lo cual permitirá mayor velocidad del flujo en las partes cercanas a la ventana de captación. Con este tipo de barrage se garantiza un mayor arrastre de sedimentos tanto en la parte central como en los laterales.

**Bocal:** “parte fundamental de una captación derivadora, es una ventana rectangular que permite el ingreso de un caudal suficiente hacia un canal de derivación en épocas de estiaje; mientras que en meses lluviosos funciona como orificio de fondo” (Huamán J. 2016).

**Eficiencia de captación:** “es la relación porcentual entre el caudal que ingresa por el bocal y el caudal requerido para satisfacer la demanda” (Huamán J. 2016).

**Modelo hidráulico:** “representación física que permite simular la acción del flujo tridimensional de un sistema real, convirtiéndose en un eficaz instrumento de ayuda en los casos en que la teoría es insuficiente” (Huamán J. 2016).

**Caudal:** “volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo” (SENAMHI 2011).

**Aforo de caudal:** “conjunto de procedimientos para determinar a través de mediciones el caudal que pasa por una sección dada y en un momento dado” (Villón M. 2002).

**Correntómetro:** “aparato que mide la velocidad, en un determinado punto del cauce” (PASCO 2024).

**Sedimentos:** “partículas que provienen de las rocas o suelos y que son acarreadas por las aguas que escurren por un cauce. Estos materiales después de cierto acarreo, finalmente son depositados en lugares donde el flujo se hace lento”, ya sea por disminución de la pendiente o por la existencia de alguna estructura hidráulica como por ejemplo un dique o barrage (Gracia J. y Maza J. 1993).

**Granulometría:** se refiere a la manera en que están distribuidas las partículas del material granular de distintos tamaños, usualmente se representa en términos de porcentajes acumulados por encima o debajo de ciertos tamaños o aberturas de tamices (Lambe W. y Whitman R. 1991).

## **CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **3.1 Aspectos Generales**

#### **3.1.1 Ubicación del área de estudio**

El río Mashcón se encuentra ubicado en la región de Cajamarca, provincia de Cajamarca y distrito Cajamarca, este río está comprendido dentro de la vertiente del Atlántico.

La captación Huacariz se encuentra ubicada en el cauce del río Mashcón, aproximadamente a 100 m aguas abajo del Puente Nuevo La Molina.

#### **Ubicación Política**

Departamento : Cajamarca

Provincia : Cajamarca

Distrito : Cajamarca

#### **Ubicación Geográfica**

Coordenadas del sistema Universal Transversal Mercator UTM-WGS84, Zona 17S

Captación Huacaríz:

Este: 774665.000

Norte: 9209807.000

Altitud: 2724.252

*Nota:* Este punto ha sido tomado en el extremo la corona del barrage.

#### **Ubicación Hidrográfica**

Vertiente : Atlántico

Región Hidrográfica : Amazonas

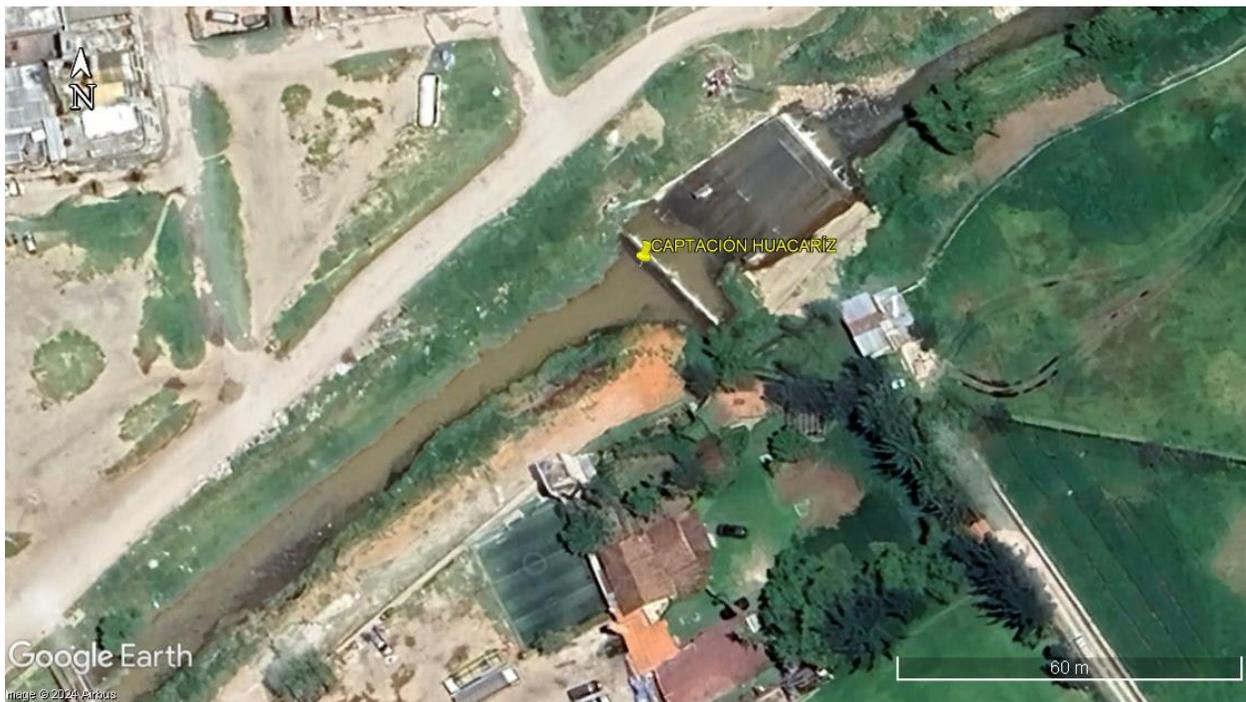
Unidad hidrográfica : Alto Marañón

Cuenca : Crisnejas

**Figura 17:** Vista satelital de la zona de estudio



**Figura 18:** Vista satelital de la captación Huacariz



## **3.2 Materiales y equipos**

### **3.2.1 Materiales**

- Wincha
- Cordel
- Regla de madera graduada en milímetros
- Estacas de acero
- Picota
- Palana
- Costales
- Recipientes (valdes)
- Planos impresos
- Tubos cuadrados de acero
- Planchas de acero
- Pintura
- Tubos y accesorios de PVC
- Material de sedimentos
- Software: Excel, AutoCAD Civil 3D, Google Earth Pro

### **3.2.2 Equipos**

#### **Para la etapa de campo y laboratorio**

- Estación total Leica FlexLine TS10
- Trípode
- Prismas
- GPS navegador
- Correntómetro PASCO PASPort (PS-2130)
- Celular
- Software SPARKvue
- Maquinaria pesada (excavadora)
- Cámara fotográfica
- Balanza
- Juego de tamices
- En todo el trabajo de campo se usó equipos de protección y seguridad

#### **Para la etapa de gabinete**

- Laptop
- Calculadora
- Impresora

## **Para la etapa de construcción y ensayo de modelo físico**

- Amoladora
- Máquina de soldar
- Compresora
- Pistola para pintar
- Motobomba
- Cámara fotográfica
- Cronómetro

### **3.3 Procedimiento**

#### **3.3.1 Medición de caudales del río Mashcón**

- a) Selección de secciones de aforo e identificación de huella de máximas avenidas.
- b) Aforo del río haciendo uso del método de vadeo, utilizando un correntómetro; se realiza un seccionamiento en franjas verticales cada 1m, en el eje central de cada franja se mide velocidades a una profundidad del 60% del tirante.
- c) Procesamiento de datos de aforo (áreas y velocidades), para determinar los caudales.
- d) Organización de los caudales medidos durante aproximadamente 13 meses (abril 2023 – mayo 2024).

#### **3.3.2 Caracterización morfológica del río Mashcón y estructura de captación**

- a) Levantamiento topográfico del área de estudio para su representación mediante curvas a nivel y las medidas de todas las partes de la captación.
- b) Elaboración de planos topográficos de curvas de nivel y ubicación de los componentes de la captación.
- c) Estimación de las pendientes longitudinales del tramo del río en estudio (pendiente original del cauce y pendiente afectada por la colmatación).

#### **3.3.3 Caracterización granulométrica de los sedimentos**

- a) Toma de muestras en un tramo de 100 m aguas arriba de la captación, para medir muestras mayores a 3 pulgadas, se hace uso de regla y wincha y se mide directamente en campo; y para muestras con diámetro menor se realizan calicatas con ayuda de maquinaria pesada (excavadora), luego se lleva una muestra (extraída mediante cuarteo, después de mezclar el

material de 3 calicatas representativas) al laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Nacional de Cajamarca.

b) Generación de la curva granulométrica.

### **3.3.4 Ensayo de descolmatación inducida**

El instrumento a usar para obtener información es el modelo físico a escala reducida 1/20.

a) Cálculo de parámetros de diseño del modelo hidráulico

b) Diseño del modelo hidráulico a escala 1/20, para esto se considera la ley de Froude, sin distorsión.

c) Preparación e impresión de planos del modelo físico.

d) Construcción del modelo físico.

e) Calibración del modelo: se realiza este proceso haciendo mediciones de tirantes, caudales, profundidades de sedimentos, se verifica la correcta relación de escalas entre modelo y prototipo. Los sedimentos en el modelo representan la colmatación actual de la captación, se toma en consideración que los materiales más cercanos a la captación son arenas con limos, y los más alejados sean gravas con arenas, se trata de representar lo más aproximado posible al estado del prototipo.

f) Se representa la colmatación con materiales que cumplen la relación de escalas, luego se apertura el barrage fusible central y se hace circular sucesivamente los caudales equivalentes ocurridos en el río en el periodo abril 2023 – mayo 2024. Se hace primeramente pruebas representando el barrage actual aperturado en el centro (20% del total), luego reemplaza por el nuevo barrage. Durante este proceso ocurre la descolmatación por lo que se toman medidas de caudales en el bocal, profundidades de los sedimentos, en función de la escala de tiempo.

g) Ensayos en el modelo con sedimentos: se ha reemplazado el barrage existente por un barrage fijo en los costados y fusible en la parte central (la parte fusible tendrá una longitud equivalente al 20% del ancho total del barrage; se hace circular caudales a escala

correspondientes a los ocurridos durante el periodo de aforos abril 2023 – mayo 2024, los caudales que circulan se miden volumétricamente (tanto en el bocal como en el cauce).

- h) Se toma medidas de las profundidades descolmataadas de sedimentos en el lecho del río al finalizar la temporada de lluvias (mayo 2024).
- i) Reconstrucción del barrage fusible y medición de caudales en el bocal.
- j) Análisis de datos obtenidos durante el ensayo.

### **3.4 Métodos de investigación**

Desde la perspectiva del pensamiento, se emplea el método de inducción-deducción. Para investigar la relación causa-efecto, se recurre al método experimental. En esta situación, la apertura del barrage fusible central, en conjunto con los caudales ocurridos en el periodo de estudio, son los causantes de la erosión de los sedimentos atrapados aguas arriba del barrage. Como efecto se tiene la descolmatación del vocal de la captación.

Se trata de una investigación aplicada, debido a que es de índole práctica y se basa en los hallazgos y progresos de la investigación básica, enriqueciéndose de estos para su aplicación práctica en estructuras similares.

Se considera una investigación cuantitativa, dado que se utiliza principalmente valores numéricos para la presentación de datos provenientes de mediciones y cálculos.

Es una investigación de campo y laboratorio, debido a que se recopila información de eventos naturales de campo y esto se recrea en un ambiente artificial para realizar estudios mediante la simulación de sucesos.

### **3.5 Población, muestra, unidad de análisis**

- a) Población y Muestra:** La población y la muestra están constituidas por las misma estructura que ha sido elegida de manera conveniente, y es la Captación Huacariz, ubicada en el río Mashcón.
- b) Unidad de análisis:** Constituida por el modelo físico a escala reducida 1/20, de la Captación Huacariz y un tramo de 100 m aguas arriba y 50 m aguas abajo del barrage.

c) **Unidad de observación:** Tramo colmatado aguas arriba del barrage y el bocal de la Captación Huacariz.

### 3.6 Técnicas e instrumentos de recopilación de información

#### 3.6.1 El prototipo

La geometría de la captación Huacariz fue recopilada haciendo mediciones directas y se usó una estación total y wincha metálica. Los materiales que constituyen las distintas partes de la captación se determinaron de manera visual en el sitio de emplazamiento.

**Figura 19:** *Captación Huacariz*



La morfología del río Mashcón de un tramo de 300 m aguas arriba y 50 m aguas abajo del barrage se obtuvo realizando un levantamiento topográfico usando una estación total Leica FlexLine TS10, la toma de puntos se realizó seccionando el cauce cada 10 y 20 metros de manera estratégica, identificando puntos para cálculo de pendientes, talweg, taludes de la rivera.

**Figura 20:** *Levantamiento topográfico del prototipo*

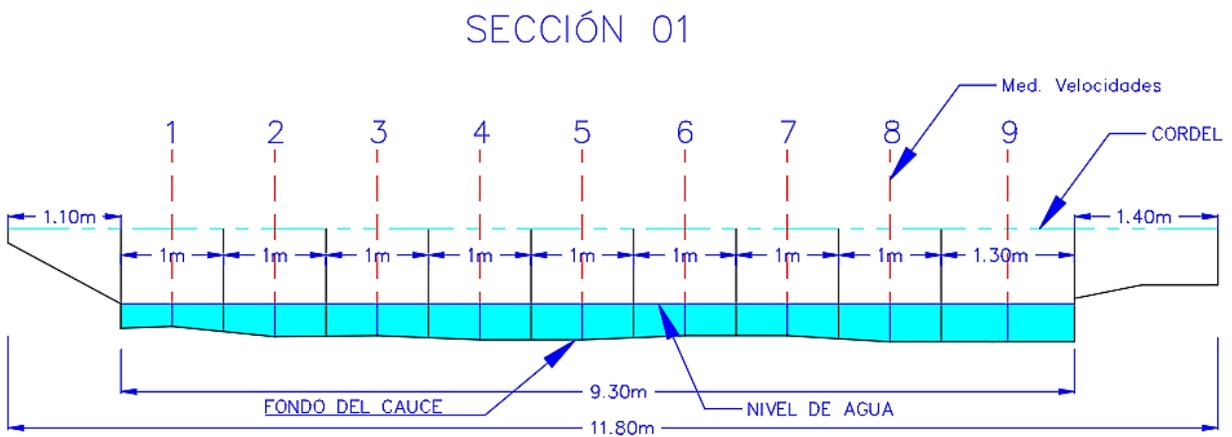


Los caudales del río Mashcón se midieron en 2 secciones ubicadas a 220 y 240 metros aguas arriba del barrage, cada sección se dividió en franjas verticales cada 1m usando un cordel marcado con cintas, en los laterales de cada franja se mide una altura geométrica (desde el cordel hasta el fondo del cauce, en los ejes de cada lateral se mide los tirantes y se registra velocidades a una profundidad del 60% de estos, para ello se usó una regla delgada de madera graduada hasta milímetros y un correntómetro.

**Figura 21:** Aforo del río Mashcón a 240m aguas arriba del barrage



**Figura 22:** Esquema de registro de tirantes, áreas y velocidades en los aforos



La toma de muestras, para granulometría de guijarros y cantos, se recogieron 100 muestras aleatorias de la superficie y subsuperficie, de tamaños mayores a 3 pulgadas y se determinó sus dimensiones directamente en el mismo lugar de muestreo. Para la granulometría de arenas y gravas, se realizó 6 calicatas con la ayuda de maquinaria pesada (excavadora), las calicatas estuvieron a 1, 5, 10, 15, 20, 30 metros del barrage, se excavó una profundidad aproximadamente de 0.9 a 1 metro, donde era evidente por la resistencia a ser excavado que estaba el fondo original del cauce.

**Figura 23:** *Muestreo de guijarros y cantos*



**Figura 24:** Muestreo de arenas y gravas (calicatas)



**Figura 25:** Sedimentos extraídos de las calicatas



Nota: para ser llevados al laboratorio se han escogido materiales de las 3 calicatas más representativas y se ha mezclado en campo, luego se realiza un cuarteo para separar la parte que será analizada.

El análisis mecánico de la muestra de limos, arenas y gravas, se realizó haciendo uso de un juego de tamices con aberturas de 3" (75mm) hasta tamiz N° 200 (0.08mm) y cazoleta para limos, una balanza electrónica con precisión de 1g; en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Nacional de Cajamarca. Con la información recopilada se construye la curva granulométrica que representa a este material.

**Figura 26:** *Tamizado de muestras de sedimento*



### **3.7 Tratamiento y análisis de datos**

Se usó los datos del levantamiento topográfico de la estructura y el tramo del río en estudio, para procesarlos y representarlos en planos, para esto se empleó el programa Excel y AutoCAD Civil 3D 2024.

Los programas mencionados anteriormente también fueron usados para el cálculo de áreas, velocidades promedio, caudales, generación de curvas granulométricas de sedimentos, cálculos de parámetros y diseño del modelo a escala reducida.

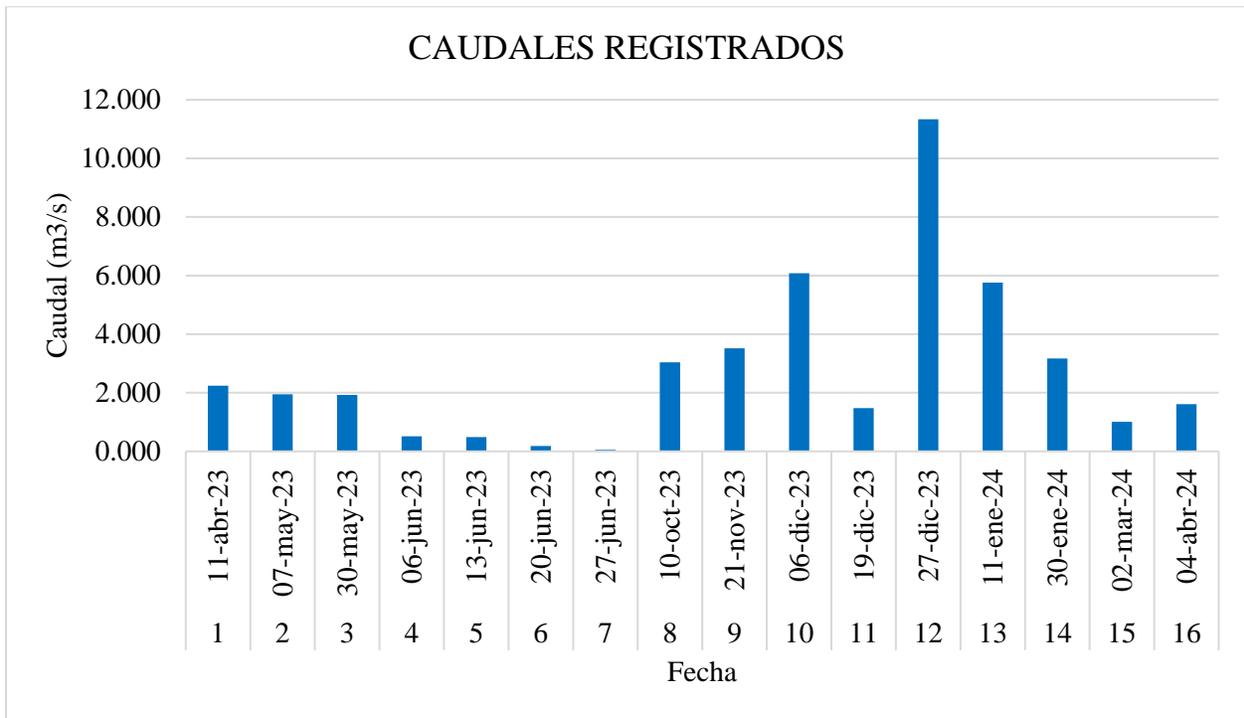
## CAPÍTULO IV: PRESENTACIÓN, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### a) Caudales del río Mashcón

**Tabla 6:** Caudales del río Mashcón aguas arriba de la captación Huacariz

<b>AFORO</b> N°	<b>FECHA</b>	<b>CAUDAL (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>DURACIÓN</b> <b>(DÍAS)</b>	<b>DURACIÓN</b> <b>(HORAS)</b>
1	11-abr-23	2.244	4	96
2	07-may-23	1.948	11	264
3	30-may-23	1.924	5	120
4	06-jun-23	0.516	6	144
5	13-jun-23	0.485	6	144
6	20-jun-23	0.183	7	168
7	27-jun-23	0.051	10	240
8	10-oct-23	3.041	4	96
9	21-nov-23	3.518	3	72
10	06-dic-23	6.081	2	48
11	19-dic-23	1.473	7	168
12	27-dic-23	11.336	1/4	6
13	11-ene-24	5.759	2	48
14	30-ene-24	3.171	3	72
15	02-mar-24	1.009	15	360
16	04-abr-24	1.612	12	288

**Figura 27:** Resultados de caudales obtenidos mediante aforos



Los caudales son bastante variados; tomando en cuenta los meses más lluviosos del año, se han registrado valores altos en los meses de octubre a enero. El caudal mayor ocurrió en el mes de diciembre y tiene un valor de  $11.336\text{m}^3/\text{s}$ . Los caudales bajos se registraron desde junio hasta la primera semana de octubre.

Nota: Las lluvias más intensas en meses que generalmente no debe llover demasiado, es un fenómeno que puede explicarse por varios factores interrelacionados, principalmente ligados al cambio climático y las alteraciones en los patrones meteorológicos globales.

### b) Granulometría superficial del río Mashcón

**Tabla 7:** Muestras de guijarros y cantos del río Mashcón

Nº	Tamaño b (cm)						
1	7.8	26	16	51	11.5	76	29
2	7.7	27	13	52	18	77	19
3	7.9	28	13.5	53	14	78	19

4	8.4	29	13.5	54	16	79	12
5	8.6	30	12	55	20.5	80	13.5
6	8.2	31	11.5	56	33	81	14.3
7	7.8	32	11.5	57	21	82	15.5
8	8	33	13	58	16	83	18.5
9	10	34	13	59	22	84	16
10	9	35	22	60	32	85	21
11	8.8	36	12	61	27	86	21.5
12	8.4	37	12	62	19	87	26.5
13	7.9	38	9.5	63	14	88	39
14	8.3	39	25	64	15	89	40
15	8.6	40	8.5	65	9.5	90	35
16	8.7	41	15	66	14	91	18
17	10.5	42	11	67	15	92	27
18	9.2	43	13	68	13	93	25
19	8.1	44	8	69	16	94	27.5
20	8.2	45	11	70	23	95	38
21	8.7	46	9.5	71	14	96	26.5
22	8.9	47	11	72	29	97	33
23	9.1	48	15	73	22	98	32.5
24	10.4	49	10	74	25	99	28
25	9	50	15	75	16	100	25.5

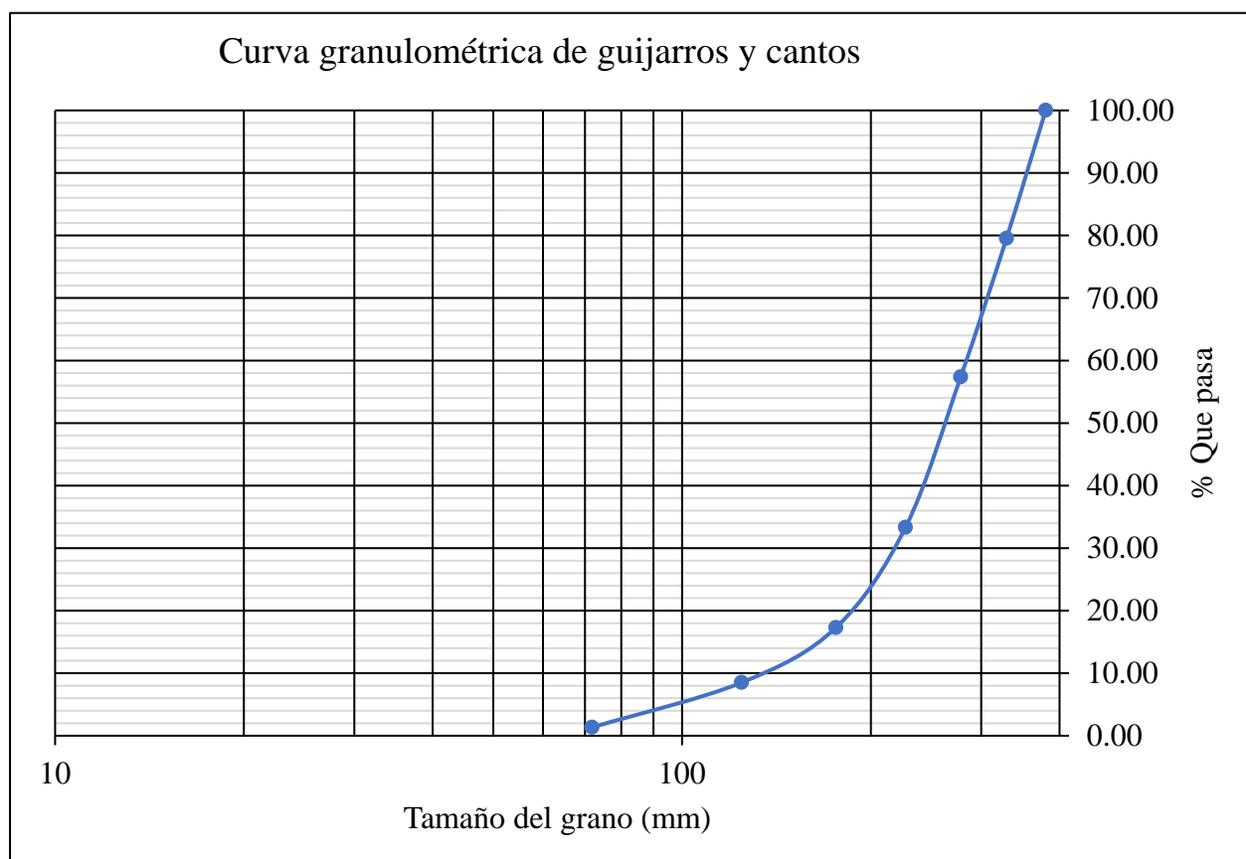
**Tabla 8:** *Conteo guijarros y cantos para análisis granulométrico*

Fracción pulg	Diámetro		Factor de ponderación $D^3$ ( $\text{mm}^3$ ) ( $10^3$ )	Conteo para cada fracción	Conteo x $D^3$ ( $10^6$ )	Porcentaje %	Porcentaje que pasa %
	Media Geométrica mm	pulg					
16 a 14	380	14.967	54938.042	3	164.814	20.462	100.00
14 a 12	329	12.961	35683.305	5	178.417	22.150	79.54
12 a 10	278	10.954	21541.355	9	193.872	24.069	57.39

10 a 8	227	8.944	11725.628	11	128.982	16.013	33.32
8 a 6	176	6.928	5449.580	13	70.845	8.795	17.31
6 a 4	124	4.899	1926.717	30	57.802	7.176	8.51
4 a 2	72	2.828	370.797	29	10.753	1.335	1.33
<b>Total</b>				<b>100</b>	<b>805.484</b>	<b>100.000</b>	

En la **Tabla 8** se puede observar que las partículas de gujarros y cantos tienen tamaños que van desde 2 hasta 16 pulgadas, notándose que las comprendidas entre 4 y 6 pulgadas son las predominantes.

**Figura 28:** *Distribución granulométrica de gujarros y cantos*



✓ Cálculo de la rugosidad de manning para guijarros y cantos:

Teniendo un valor de  $d_{90} = 0.35671\text{m}$  y haciendo uso de la ecuación (6) se obtiene un valor de  $n = 0.0324 \text{ s/m}^{1/3}$ .

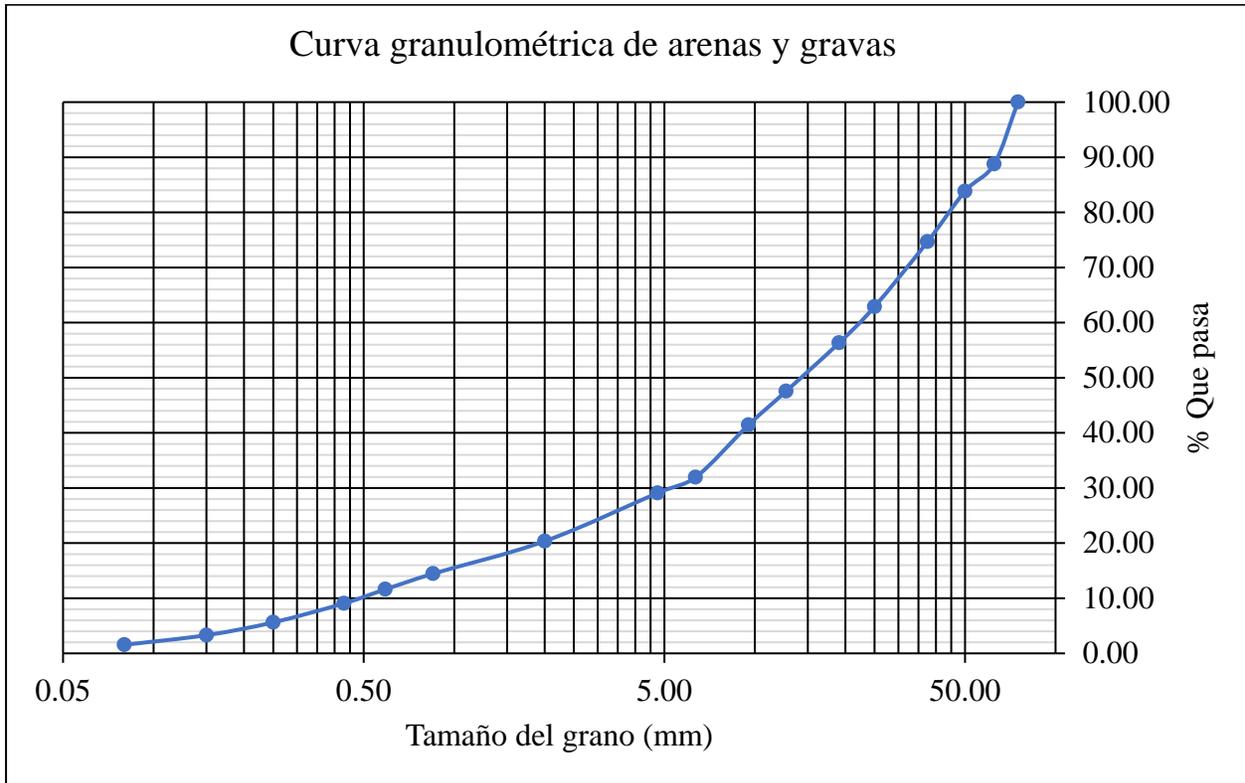
**c) Sedimentos del tramo de estudio en el Río Mashcón**

**Tabla 9:** Tamizado de los sedimentos del río Mashcón

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido (%)	Peso retenido acumulado (%)	Peso que pasa (%)
3"	75.00	0.00	0.00	0.00	100.00
2 ½"	62.50	675.00	11.25	11.25	88.75
2"	50.00	295.00	4.92	16.17	83.83
1 ½"	37.50	550.00	9.17	25.33	74.67
1"	25.00	707.00	11.78	37.12	62.88
¾"	19.05	394.00	6.57	43.68	56.32
½"	12.70	526.00	8.77	52.45	47.55
3/8"	9.53	366.00	6.10	58.55	41.45
¼"	6.35	571.00	9.52	68.07	31.93
N°4	4.75	170.00	2.83	70.90	29.10
N°10	2.00	525.00	8.75	79.65	20.35
N°20	0.85	354.00	5.90	85.55	14.45
N°30	0.59	170.00	2.83	88.38	11.62
N°40	0.43	153.00	2.55	90.93	9.07
N°60	0.25	207.00	3.45	94.38	5.62
N°100	0.15	139.00	2.32	96.70	3.30
N°200	0.08	105.00	1.75	98.45	1.55
Cazoleta	0.00	93.00	1.55	100.00	0.00
<b>TOTAL</b>		<b>6000.00</b>			

Los sedimentos acumulados aguas arriba del barrage, están compuestos por gravas, arenas y limos. Los sedimentos más alejados del barrage son arenas y gravas con pocos limos, los más cercanos al barrage tienen una mayor cantidad de limos y arena con poca grava.

**Figura 29:** Distribución granulométrica de arenas y gravas



✓ Cálculo de la rugosidad de manning para arenas y gravas:

Teniendo un valor de  $d_{90} = 0.63965\text{m}$  y haciendo uso de la ecuación (6) se obtiene un valor de  $n = 0.0243 \text{ s/m}^{1/3}$ .

**d) Identificación de huella hídrica y cálculo de caudal de máximas avenidas**

Dato  $n = 0.0324 \text{ s/m}^{1/3}$

Haciendo uso de la ecuación (4), se realiza el cálculo de caudal máximo en tres secciones del cauce.

**Tabla 10:** Caudal de máximas avenidas

Sección	A	Pm	R	S (m/m)	Q
01	18.162	15.913	1.141	0.0041	39.063 m <sup>3</sup> /s
02	17.454	14.802	1.179	0.0038	37.302 m <sup>3</sup> /s
03	17.662	14.932	1.183	0.0039	38.215 m <sup>3</sup> /s
<b>Promedio =</b>					<b>38.193m<sup>3</sup>/s</b>

Este caudal promedio será considerado como un caudal de máximas avenidas para un periodo de retorno de 30 años.

### e) Características morfológicas del tramo de estudio del río Mashcón

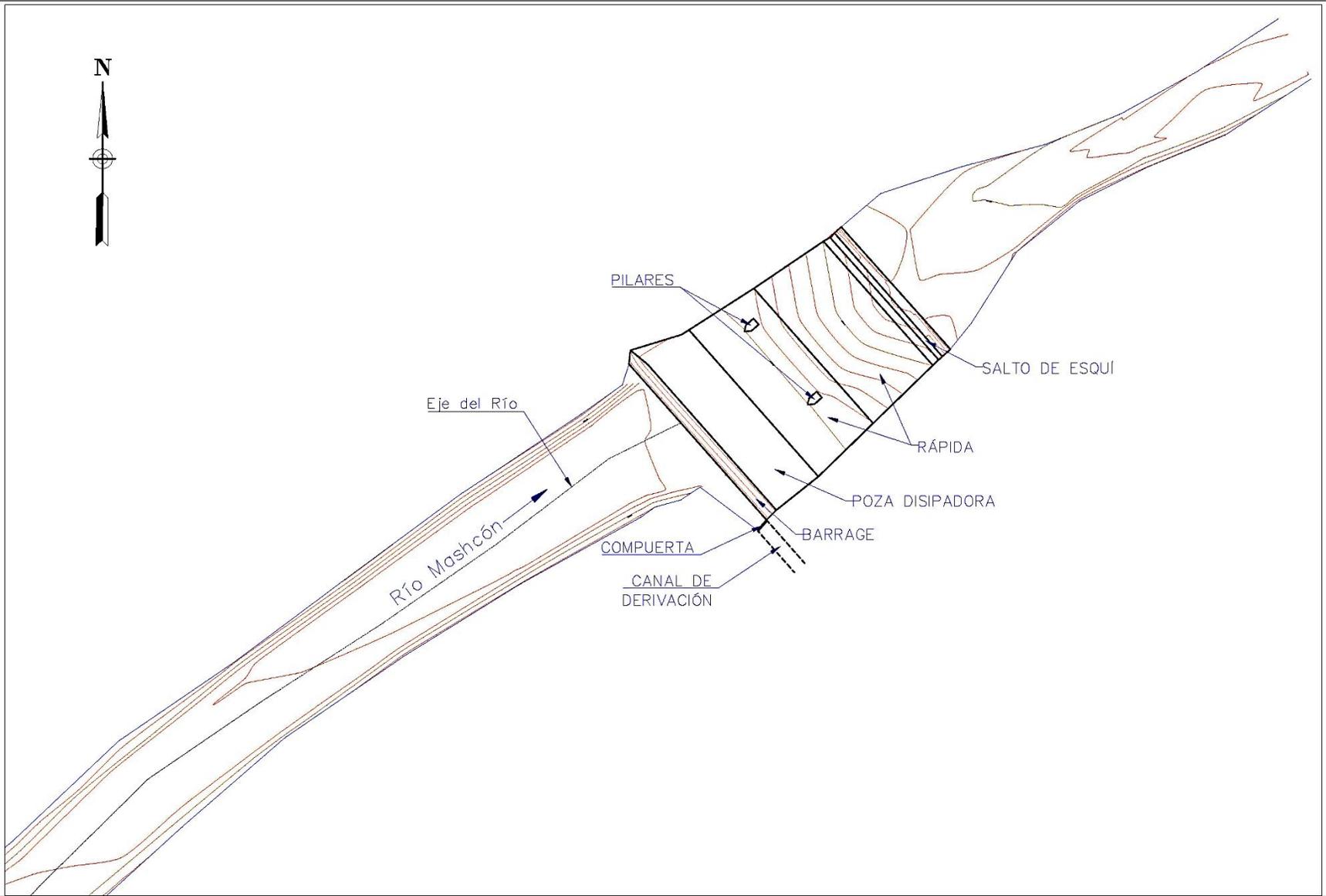
#### Topografía

- ✓ El tramo del prototipo que será plasmado en un modelo físico tiene las siguientes dimensiones, 103.54m aguas arriba del barrage, la estructura está compuesta por barrage, poza disipadora, rápida y salto de esquí, que en conjunto suman 36.46m, aguas abajo se considera un tramo de 10.00m; en total todo el tramo a ser modelado tiene 150.00m.
- ✓ **Captación Huacariz:** ubicada en el cauce del río Mashcón a una altitud de 2724.00 m.s.n.m., está compuesta por las siguientes partes.
  - a) Un barrage tipo Creager de concreto armado, de 30.00m de longitud, con una altura de corona de 1.10m, actualmente se encuentra en buenas condiciones.
  - b) Una poza disipadora de 6.35m de longitud, se encuentra destruida por la fuerza del flujo.
  - c) Una rápida de 23.00m de longitud, está en buenas condiciones.
  - d) Un salto de esquí que abarca una longitud de 3.40m y también está en condiciones buenas.
  - e) Muros de encauzamiento en ambos costados de la estructura aguas abajo del barrage.

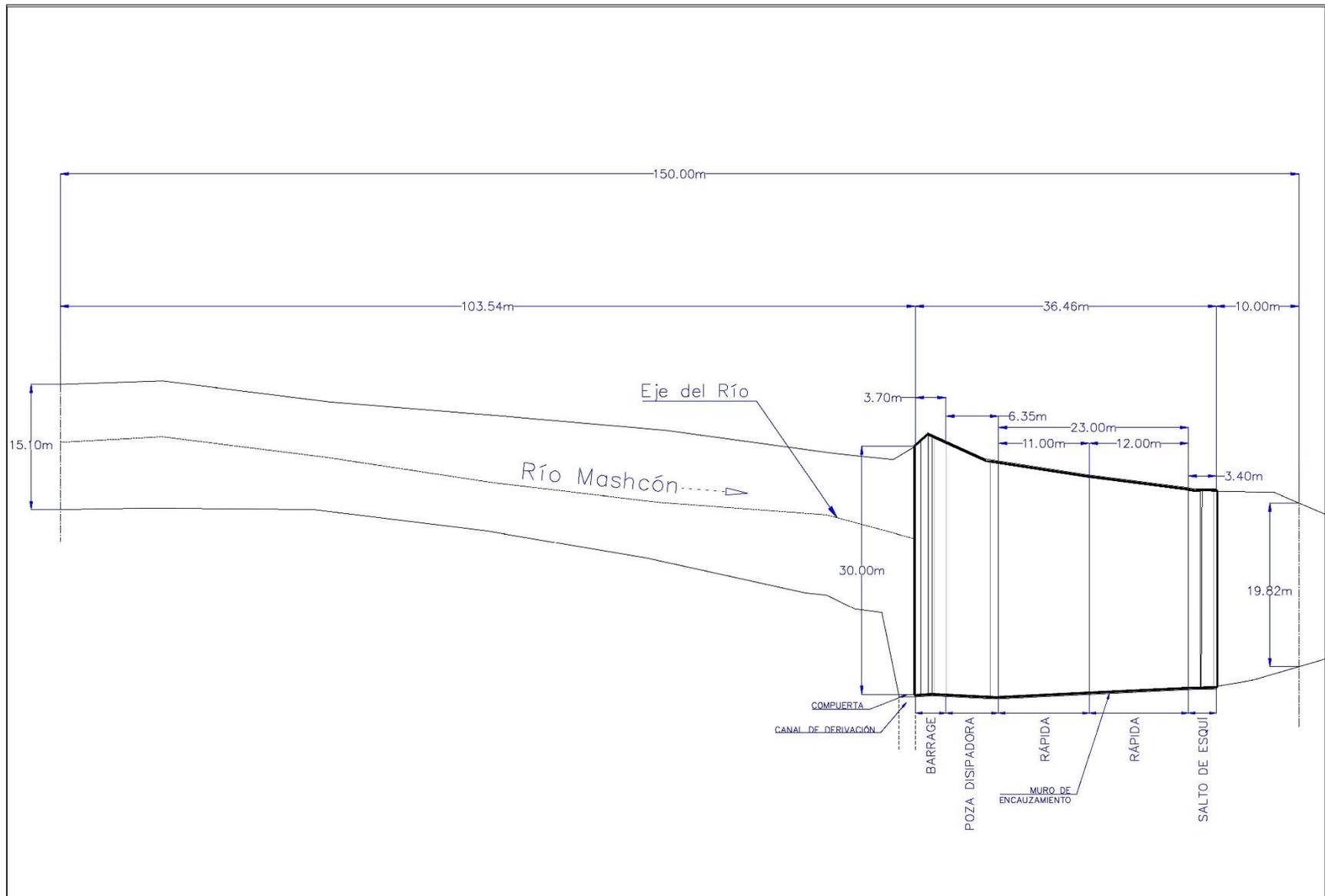
✓ **Tramo de estudio aguas arriba del barrage:** está conformado por un recorrido de 103.54m, la pendiente del río antes que ocurra la colmatación se ha estimado que es de 0.307% y después de ocurrida la colmatación se ha calculado que es de -0.004%.

Teniendo en cuenta la forma de sus secciones transversales y la pendiente, el tramo de estudio pertenece a un río maduro, se caracteriza por no tener erosión en el fondo sino en los márgenes.

**Figura 30:** Plano general de la zona de estudio



**Figura 31:** Plano – partes y dimensiones del prototipo



## f) Datos del prototipo

**Tabla 11:** Datos del prototipo considerados para diseño del modelo físico

Parámetro	Magnitud	Unidad
Caudal menor	1.473	m <sup>3</sup> /s
Caudal mayor	11.336	m <sup>3</sup> /s
Longitud del tramo del río	150.000	m
Pendiente del cauce antes de la colmatación	0.00307	m/m
Pendiente del cauce colmatado	-0.00004	m/m
d <sub>90</sub> de sedimentos (arenas y gravas)	0.064	m
d <sub>90</sub> de sedimentos (guijarros y cantos)	0.357	m
d <sub>10</sub> de sedimentos (guijarros y cantos)	0.136	m
Longitud del barrage	30.000	m
Altura del barrage	1.100	m
Longitud del bocal	0.800	m
Altura del bocal	0.600	m
Longitud poza disipadora de energía	6.350	m
Ancho poza disipadora de energía	30.000	m
Longitud de la rápida	23.000	m
Caudal de dotación	0.410	m <sup>3</sup> /s

## g) Diseño del modelo físico

Se ha seleccionado una escala de 1/20, la cual permite que ocurra la turbulencia del flujo (Re > 5000), así como también permite la utilización del espacio disponible para su posible construcción.

### ✓ Caudal mayor de prueba del modelo

Para determinar este parámetro se da uso a la ecuación (22), a continuación, se resuelve:

$$\lambda_Q = \lambda^{5/2}, \text{ donde } \lambda \text{ es la escala geométrica que es } 1/20, \text{ entonces:}$$

$Q_M = Q_P (20)^{-5/2}$ , donde M y P significan modelo y prototipo respectivamente.

Se obtiene:  $Q_M = 11.336(20)^{-5/2} = 0.006337 \text{ m}^3 / \text{s} = 6.337 \text{ L} / \text{s} = 380.22 \text{ L} / \text{min}$  (caudal mayor para pruebas del modelo).

### ✓ Caudal menor del modelo

Es el menor caudal de prueba que debe ser verificado con el número de Reynolds en el modelo ( $Re_M > 5000$ ).

De acuerdo a la ecuación (23), el número de Reynolds en el modelo se determina con la expresión siguiente:

$$Re_M = \frac{V_M D_{HM}}{\mu_M}$$

donde, la velocidad media en el modelo ( $V_M$ ) se calcula con la ecuación (21), de la cual resulta:

$\lambda_v = \lambda^{1/2}$ , donde  $\lambda$  es la escala geométrica que es 1/20, entonces:

$$V_M = V_P \left( \frac{1}{20} \right)^{1/2}$$

La velocidad en el prototipo ( $V_P$ ), es la velocidad media en la sección de aforo para el caudal  $1.473 \text{ m}^3/\text{s}$ .

El diámetro hidráulico en el prototipo ( $D_{HP}$ ) es cuatro veces el radio hidráulico. Para el caudal  $1.473 \text{ m}^3/\text{s}$  resulta

$$D_{HP} = 4 \left( \frac{A}{P_m} \right) = 4 \left( \frac{2.526}{8.706} \right) = 1.161 \text{ m}$$

donde, A: área de la sección ( $\text{m}^2$ ) y  $P_m$ : perímetro mojado (m)

El diámetro hidráulico en el modelo es:  $D_{HM} = 1.161/20 = 0.058 \text{ m}$

El fluido a utilizar en el modelo es agua; la viscosidad cinemática para una temperatura de  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  (temperatura media anual para la ciudad de Cajamarca, según la estación climatológica

Augusto Weberbauer ubicada en el campus de la sede central de la Universidad Nacional de Cajamarca) es  $\vartheta_M = 0,0000011076 \text{ m}^2/\text{s}$ .

El número de Reynolds en el modelo resulta

$$\text{Re}_M = \frac{(1.473)(0.058)}{0.0000011076} = 6717 > 5000 \quad (\text{Cumple con la condición para flujo turbulento})$$

Por lo tanto, el menor caudal a utilizar en el modelo es:

$Q_M = 1.173 (20)^{-5/2} = 0.000824 \text{ m}^3 / \text{s} = 0.824 \text{ L} / \text{s} = 49.42 \text{ L} / \text{min}$  (caudal menor para pruebas del modelo).

### ✓ Escalamiento de rugosidad del lecho del río

El lecho del tramo evaluado del río Mashcón, está conformado por mezclas de limos, arenas, gravas, guijarros y cantos.

Para representar la rugosidad de Manning en el modelo se utilizará la rugosidad de Manning del prototipo ( $n_p$ ) calculada con la ecuación (6), en la cual se reemplaza el promedio del tamaño de partícula  $d_{90}$  obtenida de arenas y gravas (0.0640 m), y de guijarros y cantos (0.3567 m).

$$n_p = \frac{(d_{90})^{1/6}}{26} = \frac{1}{26} \left( \frac{0.0640 + 0.3567}{2} \right)^{1/6} = 0.0297 \frac{\text{s}}{\text{m}^{1/3}}$$

La rugosidad de Manning en el modelo se calcula con la ecuación (28), de la cual se tiene:

$$n_M = n_p \left( \frac{1}{20} \right)^{1/6} = 0.0297 \left( \frac{1}{20} \right)^{1/6} = 0.018 \frac{\text{s}}{\text{m}^{1/3}} . \text{ Esta rugosidad corresponde a superficie}$$

de un canal revestido con concreto sin terminar que varía de 0.014 a 0.020  $\text{s}/\text{m}^{1/3}$  (French, 1988).

### ✓ Escalamiento de rugosidad de la estructura de captación

Se estima la rugosidad del prototipo que corresponde a concreto terminado que corresponde a  $0.013 \text{ s/m}^{1/3}$ .

$$\text{En el modelo, } n_M = n_P \left( \frac{1}{20} \right)^{1/6} = 0.015 \left( \frac{1}{20} \right)^{1/6} = 0.009 \frac{\text{s}}{\text{m}^{1/3}}, \text{ esta rugosidad corresponde}$$

a una superficie de vidrio. Por esta razón y para tener una mayor trabajabilidad al momento de la construcción se opta por utilizar plancha de acero liso galvanizado que tiene una suavidad cercana a la del vidrio.

### h) Datos del modelo hidráulico

**Tabla 12:** *Datos del modelo hidráulico a escala 1/20*

Parámetro	Magnitud	Unidad
Caudal menor	49.42	L/min
Caudal mayor	380.23	L/min
Longitud del tramo del río	7.50	m
Pendiente del cauce antes de la colmatación	0.00307	m/m
Pendiente del cauce colmatado	-0.00004	m/m
d <sub>90</sub> de sedimentos (arenas y gravas a escala)	3.20	mm
d <sub>90</sub> de sedimentos (guijarros y cantos a escala)	17.84	mm
d <sub>10</sub> de sedimentos (guijarros y cantos a escala)	6.81	mm
Longitud del barrage	1.50	m
Altura del barrage	0.055	m
Longitud del bocal	0.040	m
Altura del bocal	0.030	m
Longitud poza disipadora de energía	0.318	m
Ancho poza disipadora de energía	1.500	m
Longitud de la rápida	1.150	m
Caudal de dotación (a escala)	13.75	L/min

### i) Selección de los sedimentos para el modelo

Se debe cumplir con la condición de similitud de froude para el grano ( $F^*_m = F^*_p$ )

De las fórmulas:

$$F_m^* = \frac{\gamma \cdot R_m \cdot S_m}{(\gamma_s - \gamma)_m d_m}$$

$$F_p^* = \frac{\gamma \cdot R_p \cdot S_p}{(\gamma_s - \gamma)_p d_p}$$

Teniendo que para un caudal de  $1.473 \text{ m}^3/\text{s}$ , el diámetro hidráulico es:

$$D_{HP} = 4 \left( \frac{A}{P_m} \right) = 4 \left( \frac{2.526}{8.706} \right) = 1.161 \text{ m}$$

Entonces:

$$R_H = \frac{A}{P_m}, \quad R_{Hp} = \frac{2.526}{8.706} = 0.2901$$

Donde:

$$R_p = 0.2901 \text{ m}$$

$$d_p = 0.357 \text{ m}$$

$$R_m = 0.014505 \text{ m}$$

$$\gamma = \text{a } 15 \text{ }^\circ\text{C} = 999.2 \text{ kg/m}^3$$

$$S_m = S_p = 0.00307 \text{ m/m}$$

$$\gamma_{sm} = \gamma_{sp} = 2540 \text{ kg/m}^3$$

$$d_m = 17.84 \text{ mm} = 0.01784 \text{ m}$$

Nota: el peso específico de sedimentos se considera el valor calculado para el proyecto “Construcción puente el Molino sobre el río Mashcón en el centro poblado de Samana Cruz – Cajamarca”.

$$F_m^* = \frac{999.2 \times 0.014505 \times 0.00307}{(2540 - 999.2) \times 0.01784} = 0.001618703$$

$$F_p^* = \frac{999.2 \times 0.2901 \times 0.00307}{(2540 - 999.2) \times 0.357} = 0.00161779$$

Con este resultado, podemos decir que  $F^*_m = F^*_p$ , por lo tanto, se afirma que se cumple la similitud sedimentológica entre modelo y prototipo.

## j) Escalamiento de los sedimentos del río

El coeficiente de uniformidad de los sedimentos del cauce ( $Cu > 2$ ), nos indica una distribución granulométrica no uniforme; entonces es conveniente utilizar como tamaño máximo de sedimentos para el modelo el valor de  $d_{90}$ .

Para la escala 1/20, se tiene:

- ✓  $d_{90}$  (arenas y gravas a escala) = 3.20 mm (material que pasa el tamiz N° 4 = 4.75mm)
- ✓  $d_{90}$  (guijarros y cantos a escala) = 17.84 mm (material que pasa el tamiz de  $\frac{3}{4}$ " = 19.05mm)
- ✓  $d_{10}$  (guijarros y cantos a escala) = 6.81 mm (material retenido por el tamiz  $\frac{1}{4}$ " = 6.35mm)

Entonces, los guijarros y cantos a ser utilizados en el modelo se obtienen del mismo material del río Mashcón que pasa el tamiz de  $\frac{3}{4}$ " y son retenidos por el tamiz de  $\frac{1}{4}$ "; para las arenas y grabas también se utiliza el material que pasa el tamiz N° 4.

## k) Construcción del modelo físico

Se construyó el modelo físico a escala 1/20, para ello se plasma todas las medidas en planos a detalle.

## l) Caudales y tiempos para los ensayos

Los caudales elegidos del prototipo se encuentran en un rango que va desde 1.473 m<sup>3</sup>/s hasta 11.336 m<sup>3</sup>/s, con duraciones desde 6 a 288 horas.

Para calcular el caudal del modelo, se hace uso de la escala de semejanza de caudal ecuación (22).

Para determinar el tiempo a escala consideramos que la ecuación (21), que expresa la escala de velocidad se puede expresar en términos de distancia y tiempo, entonces:

Si se tiene  $\lambda_v = \lambda^{1/2}$  se deduce que  $\lambda_t = \lambda^{1/2}$ , donde  $\lambda_t$  es la escala de tiempos.

**Tabla 13:** Caudales y tiempos de duración en prototipo y modelo

AFORO N°	FECHA	CAUDAL EN	DURACIÓN EN	CAUDAL EN	DURACIÓN
		PROTOTIPO (m <sup>3</sup> /s)	PROTOTIPO (horas)	MODELO (l/min)	EN MODELO (horas)
1	11-abr-23	2.244	96	75.26	21.47
2	07-may-23	1.948	264	65.35	59.03
8	10-oct-23	3.041	96	102.01	21.47
9	21-nov-23	3.518	72	118.01	16.10
10	06-dic-23	6.081	48	203.97	10.73
11	19-dic-23	1.473	168	49.42	37.57
12	27-dic-23	11.336	6	380.23	1.34
13	11-ene-24	5.759	48	193.16	10.73
14	30-ene-24	3.171	72	106.37	16.10
16	04-abr-24	1.612	288	54.06	64.40

**m) Calibración del modelo**

Se lleva a cabo la calibración del modelo teniendo en cuenta los caudales de ensayo, para cada caudal se ha medido un tirante en la corona del barrage del prototipo, este tirante se verifica que se cumpla en el modelo a escala.

En el cuadro siguiente se contempla la comparación de tirantes en el prototipo con los medidos en el modelo físico.

Datos medidos en campo		Datos a escala 1/20		Datos medidos en el modelo	
Caudal m <sup>3</sup> /s	Tirante sobre el barrage (cm)	Caudal (l/min)	Tirante sobre el barrage (mm)	Tirante sobre el barrage (mm)	Similitud
2.244	11.0	75	5.5	5.5	100.0%
1.948	10.1	65	5.1	5.0	99.0%
3.041	13.5	102	6.8	7.0	96.4%
3.518	15.0	118	7.5	7.5	100.0%

6.081	22.0	204	11.0	11.0	100.0%
1.473	8.5	49	4.3	4.0	94.1%
11.336	32.8	380	16.4	16.0	97.6%
5.759	21.0	193	10.5	10.5	100.0%
3.171	14.2	106	7.1	7.0	98.6%
1.612	9.0	54	4.5	5.0	90.0%
				<b>Promedio =</b>	<b>97.6%</b>

Con una similitud de 97.6%, teniendo en cuenta que la regla de medición de caudales para el modelo tiene una escala mínima de 0.5 mm, se puede decir que el modelo físico a escala 1:20 está correctamente calibrado.

#### n) Diseño del Barrage Fijo – Fusible Central

A continuación, se presentan los datos necesarios para realizar el diseño hidráulico del barrage fijo – fusible central, dichos datos han sido calculados anteriormente.

**Tabla 14:** *Parámetros de diseño calculados*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor obtenido</b>
$X_d = d_{50}$ (cm) de guijarros y cantos (material grueso)	26.530
$S_0$ (m/m) del río ( $\theta$ )	0.00307
T (m) ancho del río	30.000
$L_{tb}$ (m) longitud total del barrage	31.540
$d_{90}$ (cm) del material grueso	35.671
$d_m$ (cm) de guijarros y cantos	16.370
$d_{50}$ (cm) de arenas y gravas	1.459
S (m/m) del antecanal	0.004
$Q_d$ ( $m^3/s$ ) dotación	0.410
$Q_1$ ( $m^3/s$ ) del río, período de retorno de 1 año	11.336
$D_b$ (m) distancia entre el eje del barrage y una paralela a este que pase por el centro del bocal, m	6.04
$Q$ ( $m^3/s$ ) Avenida para período de retorno de 30 años	38.193
$\alpha$ ( $^\circ$ )	85.000
$D_{m\acute{a}x}$ (m) bolo del río	0.400

$d_{90}$ (cm) de arenas y gravas	6.397
$d_m$ (cm) de arenas y gravas	1.982

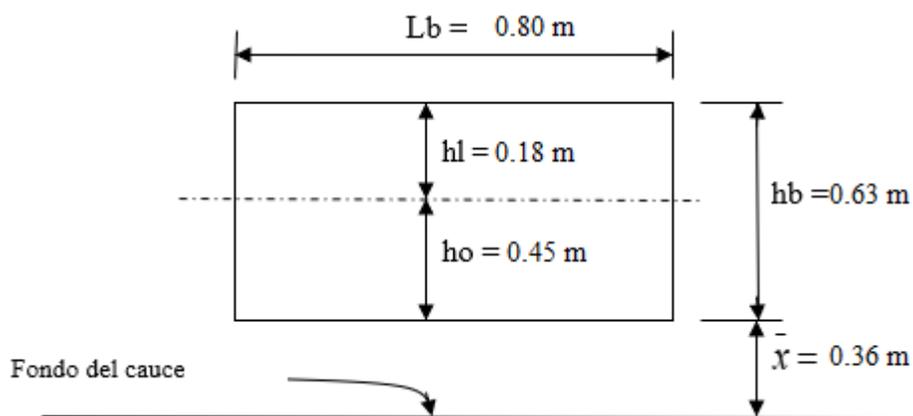
## I. Diseño del bocal

Se hace uso de las ecuaciones (15), (16), (17) y (18) para obtener la carga hidráulica en el bocal, altura del bocal y altura libre del bocal.

**Tabla 15:** Datos calculados de dimensionamiento del bocal

Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Plantilla del antecanal	B =	0.80	m
Longitud del bocal	Lb =	0.80	m
Carga del bocal	h0 =	0.45	m
Pérdida por rejilla	$\Delta h$ =	0.13	m
Espesor de barrotes a usar (1/2")	e =	0.0127	m
Altura libre	hl =	0.18	m
Altura de bocal	hb =	0.63	m
Altura libre bajo el bocal ( $d_{90}$ del material grueso)	$\bar{x}$	0.36	m

**Figura 32:** Bocal dimensionado



## II. Diseño del barrage

Por cuestiones económicas y constructivas, se ha elegido un barrage fijo – fusible central que tiene como componentes las partes fijas con una inclinación de  $20^\circ$  respecto a la línea transversal del cauce y la parte fusible que viene a representar el 20% del ancho del río.

Utilizando la ecuación (11), se determina la altura P del barrage (altura de la corona del barrage fijo – fusible central).

**Tabla 16:** *Parámetros y altura P del barrage, calculados*

Parámetro	Abreviatura	Valor	Unidad
Altura libre bajo el bocal (d90 del material grueso)	$\bar{x}$	0.360	m
Carga del bocal	h0	0.450	m
Distancia entre el eje del barrage y una paralela a este que pase por el centro del bocal	Db	6.040	m
Angulo formado por la horizontal y el fondo longitudinal del cauce	$\theta$	0.003	rad
Perdida de energía por rejilla	$\Delta h$	0.130	rad
<b>Altura de la corona del barrage fijo – fusible central</b>	<b>P</b>	<b>0.960</b>	<b>m</b>

### Geometría de la parte fija del barrage

- Forma trapezoidal
- Talud aguas arriba 1:1(H:V)
- Talud aguas abajo 2.5:1(H:V)
- Ancho de la corona = 0.4 m

### Geometría de la parte fusible del barrage

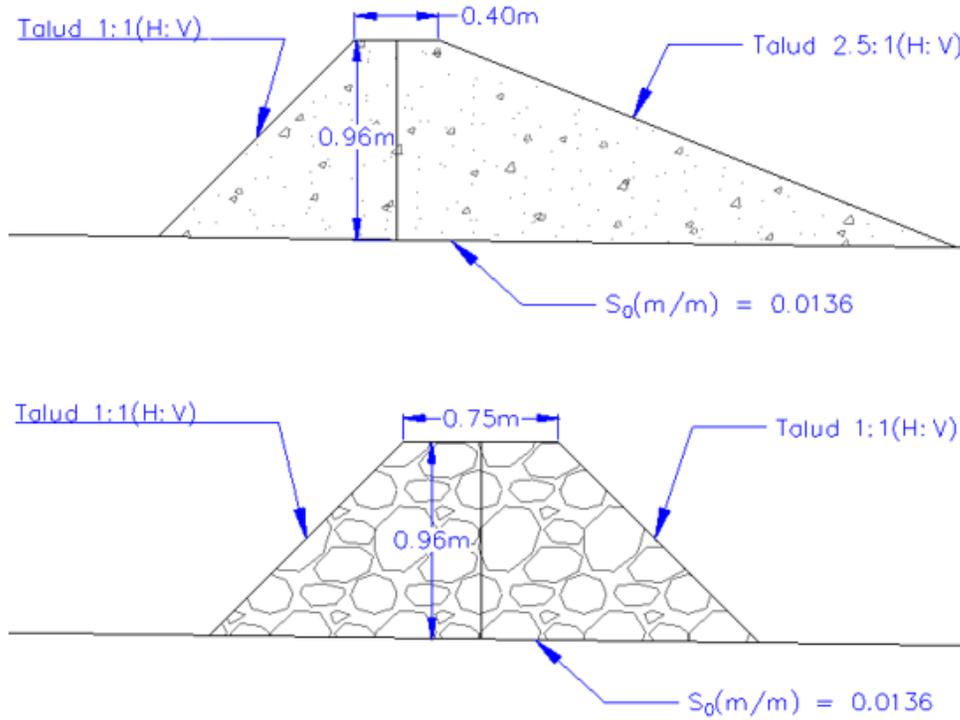
- Forma trapezoidal
- Taludes aguas arriba y aguas abajo 1:1 (H:V)
- Ancho mínimo de corona (Ac)

Con la ecuación (14) calculamos el ancho mínimo de corona, obteniendo un valor de 0.713m, por tanto, se opta por trabajar con  $Ac = 0.75m$ .

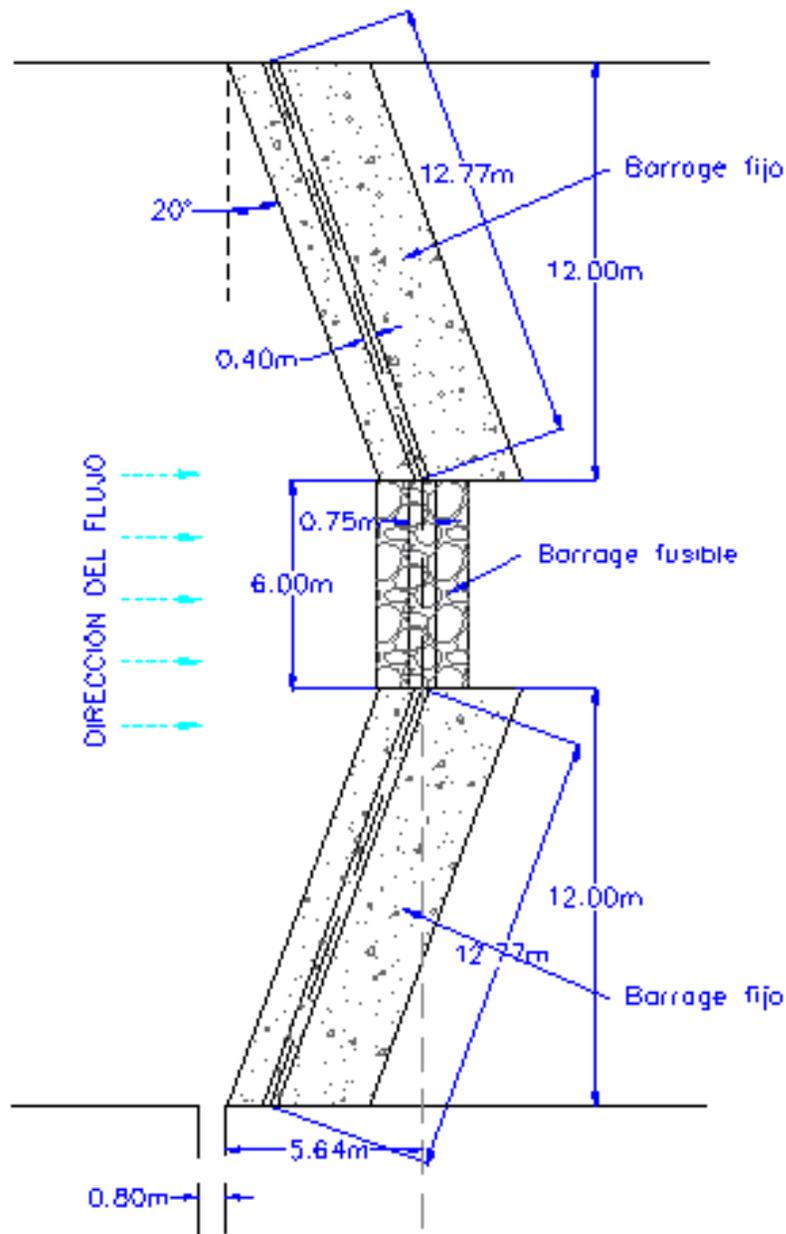
- Siendo el ancho del río igual a 30.00m y teniendo en cuenta que la parte fusible es el 20%, entonces el ancho del barrage fusible es igual a 6.00m.

A continuación, se representa geoméricamente los datos calculados:

**Figura 33:** *Perfiles de parte fija y fusible del barrage*



**Figura 34:** Vista en planta de diseño de barrage fijo fusible central



## o) Ensayo del modelo

Para efectos de la investigación se trabaja los ensayos en 2 etapas, la primera en la que se evalúa los sucesos en la estructura colmatada y en la segunda etapa se realiza la descolmatación inducida y se miden los efectos de este proceso. En ambas etapas se hacen circular los caudales medidos en campo representados a escala.

### ✓ Ensayo en estructura colmatada

Se realiza con la finalidad de determinar la eficiencia con la que está funcionando el bocal afectado por la colmatación, en este proceso se toma medidas altura de sedimentos y también se miden los caudales que ingresan por el bocal obstruido parcialmente, para luego ser comparados con el caudal de dotación requerido.

A continuación, se muestran los datos obtenidos durante este ensayo:

**Tabla 17:** *Profundidad de sedimentos en estructura colmatada*

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.50	0.92	0.74	0.62	0.38	0.36	0.30	0.08	0.02	0.02
2	0.84	0.90	0.80	0.64	0.44	0.42	0.28	0.10	0.04	0.02
3	1.10	0.92	0.80	0.70	0.38	0.42	0.26	0.08	0.04	0.02
4	1.00	0.82	0.72	0.70	0.42	0.42	0.30	0.08	0.04	0.02
5	0.86	0.76	0.72	0.78	0.48	0.36	0.28	0.08	0.02	0.02
6	1.04	0.86	0.72	0.82	0.52	0.26	0.22	0.08	0.02	0.02
7	1.02	0.94	0.72	0.86						
8	0.72									
9	0.96									

*Notas:* Profundidad de sedimentos representada en metros,

los ejes transversales se han tomado cada 10 m (medido en el eje del río), excepto el primer eje que está a 4 m del barrage,

los puntos de registro están cada 2 m y sobre cada eje transversal.

Desde la construcción de la estructura se han ido acumulando sedimentos aguas arriba del barrage, estos sedimentos han alcanzado acumularse tanto que han alcanzado la corona del

barrage, han ocupado aproximadamente un tramo de 70 metros aguas arriba del barrage. Los sedimentos acumulados junto al barrage han alcanzado una altura de 1.10 m que es la altura que tiene la corona del barrage, y a 70 m aguas arriba han alcanzado hasta 0.30 m de altura.

**Tabla 18:** *Eficiencia de captación en estructura colmatada*

Caudal en el río (m <sup>3</sup> /s)	Datos teóricos		Datos experimentales	
	Caudal en modelo (l/min)	Caudal de dotación en modelo (l/min)	Caudal derivado (l/min)	Eficiencia de captación
2.244	75.26	13.75	6.86	49.9%
1.948	65.35	13.75	6.78	49.3%
3.041	102.01	13.75	6.99	50.8%
3.518	118.01	13.75	7.10	51.7%
6.081	203.97	13.75	7.42	53.9%
1.473	49.42	13.75	6.51	47.3%
11.336	380.23	13.75	7.65	55.6%
5.759	193.16	13.75	7.37	53.6%
3.171	106.37	13.75	6.97	50.7%
1.612	54.06	13.75	6.72	48.9%
<b>Eficiencia de captación promedio =</b>				<b>51.2%</b>

*Notas:* Caudal de dotación = 0.41 m<sup>3</sup>/s = 410 l/s,  
Caudal de dotación en modelo = 13.75 l/min.

La gran cantidad de sedimentos acumulados en toda la estructura y principalmente junto al bocal de captación han ocasionado la reducción del caudal derivado, la tabla anterior muestra que la eficiencia promedio de captación en condiciones de la estructura actual es solo de un 51.2 %, tomando en cuenta que el caudal de dotación es de 410 l/s, en promedio solo se estaría derivando 210 l/s.

#### ✓ **Ensayo de descolmatación inducida**

En esta etapa se realiza las pruebas haciendo la apertura del 20% de la longitud total del barrage actual en la parte central y se evalúa la descolmatación para esta situación. Luego se realiza el reemplazo del barrage actual por un barrage fijo – fusible central con una inclinación de 20 grados en las partes fijas, al finalizar este proceso se toman medidas de

profundidades de sedimentos en distintas secciones aguas arriba del barrage. Finalmente, se reconstruye el barrage fusible y se toman medidas de caudales en el bocal para ser comparados con el caudal de dotación y determinar la eficiencia de captación.

Primero se realizó la prueba con la apertura de la parte central del barrage actual, en este caso se observa que la descolmatación solo se produce en la parte central del cauce, los costados y especialmente el lado de interés que es el que antecede el bocal no se logra descolmatar.

**Figura 35:** *Apertura e inicio de descolmatación - pruebas en barrage original*



*Nota:* Se realiza pruebas con los caudales más altos, con la finalidad de comprobar la eficiencia de descolmatación en estas condiciones.

Finalizadas las pruebas en el barrage actual, como se muestra en la siguiente figura, se verifica que, en esta condición, no hay una descolmatación óptima a nivel del bocal, por lo que se concluye que no es conveniente ni beneficiable considerar esta alternativa.

**Figura 36:** *Situación final - pruebas en barrage original*



Después de lo anteriormente demostrado, se procede a realizar el reemplazo del barrage actual por el barrage propuesto.

**Figura 37:** *Implantación del nuevo barrage*



Con la nueva estructura propuesta se inicia las pruebas de descolmatación inducida, a continuación, se muestra figuras y cuadros de los resultados obtenidos.

**Figura 38:** *Pruebas en la nueva estructura*



**Figura 39:** *Resultados finales de descolmatación inducida*



**Figura 40:** Condiciones del bocal al finalizar la descolmatación inducida con el nuevo barrage



**Tabla 19:** Profundidad de sedimentos en estructura descolmatada

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.14	0.06	0.12	0.08	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02	0.00
2	0.16	0.04	0.12	0.06	0.08	0.08	0.06	0.06	0.02	0.00
3	0.14	0.08	0.18	0.10	0.08	0.12	0.04	0.04	0.02	0.02
4	0.14	0.10	0.10	0.14	0.12	0.12	0.04	0.02	0.02	0.00
5	0.18	0.04	0.20	0.14	0.10	0.06	0.08	0.04	0.00	0.02
6	0.20	0.14	0.16	0.14	0.08	0.02	0.04	0.04	0.02	0.00
7	0.20	0.14	0.20	0.12						
8	0.18									
9	0.14									

*Notas:* Profundidad de sedimentos representada en metros,

los ejes transversales se han tomado cada 10 m (medido en el eje del río), excepto el primer eje que está a 4 m del barrage,

los puntos de registro están cada 2 m y sobre cada eje transversal.

**Tabla 20:** Profundidad de sedimentos descolmatados al finalizar los ensayos

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.36	0.86	0.62	0.54	0.34	0.32	0.26	0.06	0.00	0.02
2	0.68	0.86	0.68	0.58	0.36	0.34	0.22	0.04	0.02	0.02
3	0.96	0.84	0.62	0.60	0.30	0.30	0.22	0.04	0.02	0.00
4	0.86	0.72	0.62	0.56	0.30	0.30	0.26	0.06	0.02	0.02
5	0.68	0.72	0.52	0.64	0.38	0.30	0.20	0.04	0.02	0.00
6	0.84	0.72	0.56	0.68	0.44	0.24	0.18	0.04	0.00	0.02
7	0.82	0.80	0.52	0.74						
8	0.54									
9	0.82									

*Notas:* Profundidad de sedimentos representada en metros,

los ejes transversales se han tomado cada 10 m (medido en el eje del río), excepto el primer eje que está a 4 m del barrage,

los puntos de registro están cada 2 m y sobre cada eje transversal.

Las dos tablas anteriores presentan datos que demuestran los efectos positivos del proceso de descolmatación inducida, las alturas de sedimentos se han reducido considerablemente, se ha logrado descolmatar hasta 0.96 m de altura de los sedimentos aledaños al barrage y 0.26 m de altura en el inicio del tramo colmatado que está a 70 m aguas arriba del barrage. El bocal se encuentra totalmente libre de sedimentos.

**Tabla 21:** Eficiencia de captación en estructura descolmatada

Caudal en el río (m <sup>3</sup> /s)	Datos teóricos		Datos experimentales	
	Caudal en modelo (l/min)	Caudal de dotación en modelo (l/min)	Caudal derivado (l/min)	Eficiencia de captación
2.244	75.26	13.75	18.71	136.1%
1.948	65.35	13.75	18.56	135.0%
3.041	102.01	13.75	19.42	141.3%
3.518	118.01	13.75	21.29	154.8%
6.081	203.97	13.75	24.50	178.2%
1.473	49.42	13.75	18.61	135.3%
11.336	380.23	13.75	27.42	199.4%
5.759	193.16	13.75	23.81	173.1%

3.171	106.37	13.75	21.34	155.1%
1.612	54.06	13.75	18.52	134.6%
<b>Eficiencia de captación promedio =</b>				<b>154.3%</b>
<b>Eficiencia de captación =</b>				<b>100 %</b>

*Notas:* Caudal de dotación =  $0.41 \text{ m}^3/\text{s} = 410 \text{ l/s}$ ,  
Caudal de dotación en modelo = 13.75 l/min.

Después que se ha llevado a cabo el proceso de descolmatación inducida, se midieron los caudales que se derivan hacia el canal, se evidencia que los volúmenes de agua derivada, superan el caudal de dotación. Esto indica que la eficiencia de captación es de 100%.

## **CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

- ✓ Al realizar ensayos en la estructura actual se demuestra que por el hecho de no existir una inclinación en las partes fijas del barrage, el arrastre de sedimentos es mínimo y no es suficiente para descolmatar la parte principal que es el la entrada del bocal.
  
- ✓ Después de emplazar el nuevo barrage, el cual tiene una inclinación de 20 grados en las partes fijas y aperturado en la parte central, se demuestra que se produce una descolmatación completa del bocal.
  
- ✓ La morfología del río aguas arriba del barrage, después de haberse concluido el proceso de descolmatación inducida generada por la acción erosiva del agua. La altura de sedimentos bajo el bocal es insignificativa y no genera problema alguno con el caudal de captación, aguas arriba del barrage el lecho ha recuperado su pendiente natural.
  
- ✓ Los caudales medidos antes de la descolmatación están por debajo del caudal de dotación, se ha calculado que la eficiencia de captación promedio solo llega a 51.2%. Después de haber realizado el reemplazo de la antigua estructura por el nuevo barrage y transcurrido el proceso de descolmatación, los caudales medidos son iguales e incluso mayores al caudal de dotación, esto demuestra que, con este nuevo diseño, la eficiencia de captación es de 100 %.

## 5.2 Recomendaciones

- ✓ Teniendo en cuenta que en Cajamarca existen gran cantidad de captaciones colmatadas y por tanto presentan una notable reducción en la eficiencia de captación, es recomendable que se realicen más estudios relacionados a este tema.
- ✓ Lo desarrollado en esta tesis sirve base y modelo para la realización de nuevos estudios que implican los procesos de descolmatación inducida.
- ✓ Los planos, cálculos, diseño y demás datos obtenidos en este estudio pueden ser aplicados para el mejoramiento de los sistemas de riego que están siendo afectados por el gran problema que es la colmatación de la principal estructura que es la captación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Bibliografía

- ANA. (2010a). *Criterios de Diseño de Obras Hidráulicas Para la Formulación de Proyectos Hidráulicos Multisectoriales y de Afianzamiento Hídrico* (1.<sup>a</sup> ed.). Nippon Koei.
- ANA. (2010b). *Plan de Gestión de los Recursos Hídricos en las Cuencas Mashcón y Chonta* (1.<sup>a</sup> ed.). Nippon Koei.
- ANA. (2017). *Delimitación de Fajas Marginales*.
- Apaclla Nalvarte, R. (2014). *Hidráulica Fluvial* (1.<sup>a</sup> ed.). Fondo Editorial - UNALM.
- Aponte Rosales, C. (2018). *Factibilidad de Aplicar la Metodología de Descolmatación UDEP en el Embalse Gallito Ciego*. Universidad de Piura.
- Azevedo Netto, J. M. (1998). *Manual de Hidráulica* (8.<sup>a</sup> ed.). Editora Edgard Blucher LTDA.
- Basile, P. A. (2018). *Transporte de Sedimentos y Morfodinámica de Ríos Aluviales* (1.<sup>a</sup> ed.). UNR Editora.
- Bolinaga I., J. J. (1979). *Drenaje Urbano* (1.<sup>a</sup> ed.). Instituto Nacional de Obras Sanitarias.
- Bustamante Vásquez, E. Y. (2018). *Disponibilidad de Agua de Escorrentía en la Captación Huacaríz del Río Mashcón, Generada a Partir de Información Climática*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Calle Velasco, S. I. (2018). *Estudio de las Técnicas de Descolmatación de Embalses*. Universidad de Piura.
- Camargo Hernández, J. E., y Franco, V. (1993). Adquisición de Datos. En *Manual de Ingeniería de Ríos* (1.<sup>a</sup> ed., p. 140). Instituto de Ingeniería.
- Farías, M., Reyes, J., Sánchez, I., Gerrero, L., y Tesén, K. (2018, abril 24). *UDEP Elabora una Propuesta para Descolmatar Poechos*.

- French, R. H. (1988). *Hidráulica de Canales Abiertos* (UNAM (ed.); 1.ª ed.). Programas Educativos S.A.
- García Flores, M., y Maza Álvarez, J. (1993). Origen y propiedades de los sedimentos. En *Manual de Ingeniería de Ríos* (1.ª ed., p. 111). UNAM.
- Huamán Vidaurre, J. F. (2022). Captación Derivadora de Alta Montaña. En *Separata del curso de estructuras hidráulicas* (4).
- Huamán Vidaurre, J. F. (2016). *Efectos de la Descolmatación Inducida en la Eficiencia de Captación y en la Morfología del Río Grande-Cajamarca, Aguas Arriba del Barrage*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- ICC. (2017). *Manual de Medición de Caudales* (1.ª ed., p. 18). ICC.
- Kraatz, D. B., y Mahajan, I. K. (1982). Pequeñas Obras Hidráulicas. En *Estudio FAO : Riego y drenaje* (1.ª ed., p. 165). Roma.
- Lambe, W., y Whitman, R. (1991). *Mecánica de Suelos* (1.ª ed.). Editorial Limusa S.A.
- Martín Vide, J. P. (2002). *Ingeniería de Ríos* (S. L. Edicions UPC (ed.); 1.ª ed.). Alfaomega S.A.
- Meyer Peter, E., y Müller, R. (1948). Fórmulas para el Transporte de Carga. En *Apéndice 2*.
- Ochoa, T. (2011). Técnicas de muestreo de sedimentos en los lechos de los ríos. En *Hidráulica de Ríos* (1.ª ed., pp. 91-94). Kimpres Ltda.
- Organización Meteorológica Mundial. (2020). *Guía de prácticas hidrológicas* (1.ª ed.). OMM.
- PASCO. (2024). *PASPORT Flow Rate/Temperature Sensor - PS-2130 - Products / PASCO*.
- Poleto, C., Dalfré Filho, J., y Sotero Salustiano, A. (2023). *Anales del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2022 : volumen 3 : hidráulica de ríos*.
- Rabanal Silva, D. J. (2018). *Zonificación de Áreas Inundables del Barrio La Breña Ocasionado por Avenidas Extraordinarias del Río Grande de Celendín – Cajamarca*. Universidad Nacional de Cajamarca.

Rocha Felices, A. (1998). *Introducción a la Hidráulica Fluvial* (1.<sup>a</sup> ed.). UNI.

Rocha Felices, A. (2006). La Problemática de la Sedimentación de Embalses en el Aprovechamiento de los Ríos Peruanos, Aplicada al Embalse de Poechos. En *Primer Congreso Internacional de Hidráulica, Hidrología, Seaniemiento y Medio Ambiente*.

Rodríguez Gutiérrez, W. Á. (2023). Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(2).

SENAMHI. (2011). *Guía de Hidrometría* (1.<sup>a</sup> ed.). SENAMHI.

Unión Geofísica Americana. (s. f.). *Clasificación de Sedimentos*.

[https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Clasificación\\_de\\_sedimentos#Referencias](https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Clasificación_de_sedimentos#Referencias)

Vergara Sánchez, M. A. (1993). *Técnicas de Modelación en Hidráulica* (1.<sup>a</sup> ed.). Alfaomega S.A.

Villón Béjar, M. (2002). *Hidrología* (2.<sup>a</sup> ed.). Editorial Villón.

## ANEXOS

### Anexo N° 1: Panel Fotográfico

#### A. Medición de caudales en el río Mashcón

**Figura 41:** *Ubicación de secciones de aforo*



**Figura 42:** *Aforo con correntómetro*



**Figura 43:** Registro de tirantes y velocidades durante aforos



**Figura 44:** Medición de tirantes sobre la corona del barrage



**Figura 45:** Identificación de huella de máximas avenidas



## **B. Topografía**

**Figura 46:** *Medición de puntos topográficos aguas arriba del barrage*



**Figura 47:** *Medición de puntos en la estructura de captación*



**Figura 48:** *Medición de puntos aguas abajo de la estructura*



## C. Granulometría

**Figura 49:** *Maquinaria utilizada para extracción de muestras*



**Figura 50:** *Extracción de muestras de sedimentos colmatados*



**Figura 52:** *Muestras de sedimento extraídas*



**Figura 51:** *Selección de sedimentos representativos (mezclado y cuarteo)*



**Figura 53:** Juego de tamices utilizado (laboratorio de mecánica de suelos - UNC)



**Figura 54:** Procesamiento de muestras en el laboratorio



**Figura 55:** Selección de partículas que se usarán en el modelo físico



## D. Modelo físico, construcción y calibración

**Figura 56:** *Proceso de construcción de modelo a escala 1:20*



**Figura 57:** *Modelo físico construido*



**Figura 58:** *Caracterización de la colmatación aguas arriba*



**Figura 59:** *Colmatación cercana al barrage y bocal*



**Figura 60:** *Bocal colmatado con sedimentos*



**Figura 61:** *Nivelación de ejes de registro mediante platinas horizontales*



**Figura 62:** *Medición de la profundidad de los sedimentos*



**Figura 63:** *Medición de tirantes sobre la corona del barrage*



**Figura 64:** *Medición de caudales en proceso de calibración*



## E. Ensayos en el modelo

**Figura 65:** *Medición de caudales en la fase de estructura colmatada*



**Figura 66:** *Regulación de caudales*



**Figura 67:** *Apertura del 20% de la parte central del barrage original*



**Figura 68:** *Resultado de aperturar la parte central del barrage original*



**Figura 69:** *Sustitución de nuevo barrage*



**Figura 70:** *Arrastre de sedimentos durante el ensayo con un caudal de  $6.081\text{m}^3/\text{s}$*



**Figura 71:** Arrastre de sedimentos durante el ensayo con un caudal de  $11.336 \text{ m}^3/\text{s}$



**Figura 72:** Desarrollo del proceso de descolmatación



**Figura 73:** *Descolmatación del bocal de captación*



**Figura 74:** *Culminación del pruebas de descolmatación*



**Figura 75:** Bocal 100% libre de sedimentos después de terminado el proceso de descolmatación



**Figura 76:** *Medición de altura de sedimentos antes de la descolmatación*



**Figura 77:** *Medición de altura de sedimentos después de la descolmatación*



**Figura 78:** *Funcionamiento de barrage fijo - fusible central*



**Figura 79:** *Funcionamiento a 100% del bocal de captación*



**Figura 80:** *Medición de caudales después de la descolmatación y construcción de la parte fusible del barrage*



## Anexo N° 2: Datos y cálculos

### 1. Aforos con correntómetro PASCO PASPort (PS-2130)

✓ Plantilla de aforos y cálculo de caudales

Aforo 10:		Fecha	Hora		Condición		
		06-dic-23	7:00 AM		Nublado-sin lluvia-lluvio la noche anterior		
SECCIÓN - 01							
Progr.	HG(cm)	HA(cm)	0.4HA	V(m/s)	A(m <sup>2</sup> )	Qi (m <sup>3</sup> /s)	Q(total) (m <sup>3</sup> /s)
1	77.0	62.0	24.8	1.396	0.654	0.913	6.076
2	102.4	62.0	24.8	1.869	0.587	1.097	
3	102.4	61.0	24.4	1.693	0.596	1.009	
4	107.8	59.0	23.6	1.472	0.588	0.866	
5	103.2	59.5	23.8	1.494	0.582	0.870	
6	104.6	55.0	22.0	0.924	0.565	0.522	
7	105.2	62.0	24.8	0.702	0.603	0.423	
8	105.8	60.0	24.0	0.545	0.692	0.377	
9	77.0						
10							
11							
12							
13							
SECCIÓN - 02							
Progr.	HG(cm)	HA(cm)	0.4HA	V(m/s)	A(m <sup>2</sup> )	Qi (m <sup>3</sup> /s)	Q(total) (m <sup>3</sup> /s)
1	107.5	57.0	22.8	1.049	0.550	0.577	6.086
2	135.9	57.5	23.0	1.309	0.577	0.755	
3	135.0	51.0	20.4	1.412	0.538	0.760	
4	133.2	58.0	23.2	1.165	0.576	0.671	
5	136.0	60.0	24.0	1.392	0.601	0.837	
6	139.2	57.0	22.8	1.054	0.587	0.619	
7	136.5	63.0	25.2	0.956	0.615	0.588	
8	138.4	61.0	24.4	1.245	1.028	1.280	
9	140.4						
10	107.0						
11							

**CAUDAL PROMEDIO = 6.081 m<sup>3</sup>/s**

## 2. Cálculo de caudales durante ensayos

### Plantillas de medición de caudales durante ensayos

Datos teóricos		Recipiente de medición	Datos experimentales				
Q del río ( $m^3/s$ )	Q del modelo (l/min)	Volumen (L)	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$T_{prom}$ (seg)	Q (l/min)
2.244	75.26	20	15.96	15.78	16.11	15.95	75.24
1.948	65.35	20	17.95	19.00	18.35	18.43	65.10
3.041	102.01	20	12.07	11.45	11.75	11.76	102.07
3.518	118.01	20	10.58	9.87	9.92	10.12	118.54
6.081	203.97	20	5.86	5.81	5.96	5.88	204.20
1.473	49.42	20	23.86	24.85	24.42	24.38	49.23
11.336	380.23	40	5.96	6.52	6.51	6.33	379.15
5.759	193.16	20	6.28	6.33	6.03	6.21	193.13
3.171	106.37	20	11.00	10.95	11.45	11.13	107.78
1.612	54.06	20	21.61	22.50	22.62	22.24	53.95

Datos teóricos		Recipiente de medición	Datos experimentales				
Q del río ( $m^3/s$ )	Q del modelo (l/min)	Volumen de medición (L)	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$T_{prom}$ (seg)	Q del canal (l/min)
2.244	75.26	9	78.70	79.21	78.39	78.77	6.86
1.948	65.35	9	79.80	79.28	79.92	79.67	6.78
3.041	102.01	9	77.58	76.94	77.25	77.26	6.99
3.518	118.01	9	76.87	75.92	75.26	76.02	7.10
6.081	203.97	9	72.80	73.06	72.61	72.82	7.42
1.473	49.42	9	83.20	82.86	82.97	83.01	6.51
11.336	380.23	9	70.71	70.06	71.00	70.59	7.65
5.759	193.16	9	73.31	73.51	72.90	73.24	7.37
3.171	106.37	9	77.38	77.35	77.62	77.45	6.97
1.612	54.06	9	81.07	80.03	80.05	80.38	6.72

### 3. Medición de morfología del río (sedimentos)

Características morfológicas del tramo evaluado (altura de sedimentos), estructura colmatada

#### Profundidad desde la platina hasta el fondo del cauce sin sedimentos (mm)

(Puntos transversales cada 10 cm = 2 m)

(Ejes longitudinales cada 50 cm = 10 m)

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	145	170	181	169	175	178	184	181	185	182
2	161	170	182	171	178	182	185	182	188	183
3	171	169	183	175	176	184	185	182	188	184
4	172	168	182	177	179	185	187	181	187	184
5	166	166	182	179	180	183	184	180	185	185
6	172	169	181	180	179	176	182	180	183	186
7	170	171	179	181						
8	154									
9	165									

#### Profundidad desde la platina hasta el fondo del cauce con sedimentos (mm)

(Puntos transversales cada 10 cm = 2 m)

(Ejes longitudinales cada 50 cm = 10 m)

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	120	124	144	138	156	160	169	177	184	181
2	119	125	142	139	156	161	171	177	186	182
3	116	123	143	140	157	163	172	178	186	183
4	122	127	146	142	158	164	172	177	185	183
5	123	128	146	140	156	165	170	176	184	184
6	120	126	145	139	153	163	171	176	182	185
7	119	124	143	138						
8	118									
9	117									

#### Profundidad de los sedimentos (mm) en el modelo a escala 1/20

(Puntos transversales cada 10 cm = 2 m)

(Ejes longitudinales cada 50 cm = 10 m)

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25	46	37	31	19	18	15	4	1	1
2	42	45	40	32	22	21	14	5	2	1
3	55	46	40	35	19	21	13	4	2	1
4	50	41	36	35	21	21	15	4	2	1
5	43	38	36	39	24	18	14	4	1	1
6	52	43	36	41	26	13	11	4	1	1
7	51	47	36	43						
8	36									
9	48									

#### 4. Medición de morfología del río (sedimentos)

Características morfológicas del tramo evaluado (altura de sedimentos), estructura descolmatada

##### Profundidad desde la platina hasta el fondo del cauce con sedimentos (mm)

(Puntos transversales cada 10 cm = 2 m)

(Ejes longitudinales cada 50 cm = 10 m)

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	138	167	175	165	173	176	182	180	184	182
2	153	168	176	168	174	178	182	179	187	183
3	164	165	174	170	172	178	183	180	187	183
4	165	163	177	170	173	179	185	180	186	184
5	157	164	172	172	175	180	180	178	185	184
6	162	162	173	173	175	175	180	178	182	186
7	160	164	169	175						
8	145									
9	158									

##### Profundidad de los sedimentos (mm) en el modelo a escala 1/20

(Puntos transversales cada 10 cm = 2 m)

(Ejes longitudinales cada 50 cm = 10 m)

Pto.	Ejes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7	3	6	4	2	2	2	1	1	0
2	8	2	6	3	4	4	3	3	1	0
3	7	4	9	5	4	6	2	2	1	1
4	7	5	5	7	6	6	2	1	1	0
5	9	2	10	7	5	3	4	2	0	1
6	10	7	8	7	4	1	2	2	1	0
7	10	7	10	6						
8	9									
9	7									

### **Anexo N° 3: Planos**

1. PLANO DE UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO
2. PLANO TOPOGRÁFICO GENERAL
3. PLANO DE PERFIL LONGITUDINAL Y SECCIONES TRANSVERSALES
4. PLANO DETALLADO DEL PROTOTIPO (CAPTACIÓN HUACARIZ)
5. PLANO DE MODELO FÍSICO
6. PLANO DE BARRAGE FIJO - FUSIBLE CENTRAL