

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA
CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL
COMPLEJO ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN, CUSCO, 2024**

PRESENTADO POR:

Br. FELIX MANUEL JOYAS ESCALANTE

Br. LEONARDO CRISTIAN LUNA BEJAR

PARA OPTAR AL TÍTULO

PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ASESOR:

Ing. CARLOS HUGO LOAYZA SCHIAFFINO

CUSCO – PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor CARLOS HUGO LOAIZA SCHIAFFINO
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE
..... DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS
..... INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN, CUSCO, 2024

Presentado por: FELIX MANUEL JOYAS ESCALANTE DNI N° 71429347;
presentado por: LEONARDO CRISTIAN LUNA BEJAR DNI N°: 72322640
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 2 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 15 de ENERO de 20 26



Firma

Post firma CARLOS HUGO LOAIZA SCHIAFFINO

Nro. de DNI 23870541

ORCID del Asesor 0000 - 0003 - 4405 - 4185

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259 : 546408401

LEONARDO-FELIX LUNA BEJAR -JOYAS ESCALANTE

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN E...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:546408401

Fecha de entrega

15 ene 2026, 9:22 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

15 ene 2026, 9:35 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁU....pdf

Tamaño del archivo

50.7 MB

459 páginas

60.840 palabras

344.461 caracteres

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...




Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 20 palabras)

Exclusiones

- N.º de fuente excluida

Fuentes principales

- 1%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 1%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis, en primer lugar, a Dios, por brindarme vida, salud y fortaleza para superar cada dificultad presentada a lo largo de mi formación académica. Asimismo, la dedico a mis padres Norma y Jorge, por su apoyo incondicional, sacrificio constante y confianza depositada en mí, siendo el pilar fundamental que me motivó a culminar esta etapa profesional. De manera especial, dedico esta tesis a mi hermana Daniela, por su acompañamiento, comprensión y palabras de aliento y por creer en mí. Finalmente, dedico este trabajo a mi abuelita Ceferina, que en paz descanse, cuyo recuerdo, enseñanzas y cariño permanecen como una fuente permanente de motivación para seguir adelante y alcanzar mis metas profesionales.

Leonardo Cristian Luna Bejar

Dedico el presente trabajo, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, la perseverancia y la serenidad necesarias para afrontar cada desafío a lo largo de este proceso académico. A mis padres, por su amor incondicional, su sacrificio constante y su apoyo inquebrantable, que han sido el pilar fundamental de mi formación personal y profesional, y la motivación permanente para seguir adelante. Finalmente, a mi familia, por su comprensión, paciencia y confianza depositada en mí, especialmente en los momentos de mayor exigencia, cuando su acompañamiento y aliento fueron determinantes para alcanzar este logro.

Felix Manuel Joyas Escalante

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por brindarme salud, fortaleza y sabiduría para culminar esta etapa de mi formación profesional. Expreso mi sincero agradecimiento a mis padres, por su apoyo constante, esfuerzo y motivación a lo largo de mi carrera universitaria. Asimismo, agradezco a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y a la Facultad de Ingeniería Civil, por la formación académica brindada y las facilidades otorgadas para el desarrollo de la presente investigación. De igual manera, agradezco a mis docentes por sus enseñanzas y orientación académica, y su apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Finalmente, expreso mi agradecimiento a mis amigos y familiares, por su apoyo, compañerismo y palabras de aliento durante todo el proceso de elaboración de esta tesis.

Leonardo Cristian Luna Bejar

Agradezco profundamente a mi familia, por su respaldo constante, su paciencia y su fe en mí durante todo este proceso, incluso cuando el camino se hizo difícil; a mis padres, por los sacrificios silenciosos que hicieron posible mi formación profesional; a mis seres queridos y amigos cercanos, por su apoyo emocional y palabras de aliento; y, de manera especial, a mi asesor de tesis por su orientación académica, así como a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por haber contribuido a mi formación como ingeniero civil.

Felix Manuel Joyas Escalante

RESUMEN

El estudio se centra en la eficiencia de disipación de energía cinética en las estructuras hidráulicas incaicas del Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco, 2024, resaltando el comportamiento del flujo al ingresar y egresar de cada disipador. Esta investigación surge de comprender cómo la ingeniería inca optimizaba la regulación del agua.

Para abordar esta problemática, se combinó observaciones de campo con técnicas de medición y CFD. Los caudales se determinaron mediante vertedero, mientras que las velocidades se estimaron usando el método LSPIV. Paralelamente, se realizó un modelamiento numérico tridimensional con FLOW-3D, lo que permitió simular el comportamiento del flujo bajo condiciones controladas y compararlas con los datos reales, garantizando la fiabilidad de los resultados.

Las eficiencias de disipación de energía cinética obtenidas para los siete disipadores evaluados fueron: Canal en forma de S: 61.56 %, Canal en forma de T: 55.07 %, Canal en forma de zigzag: 39.51 %, Entrada recta y salida lateral: 68.72 %, Entrada lateral y salida recta: 41.41 %, y Pendiente invertida: 94.04 %. La combinación de caudal y velocidad mostró que mayores valores de flujo generan turbulencia, favoreciendo la pérdida de energía, mientras que las propiedades del fluido permitieron reproducir las condiciones observadas en campo.

Esto evidencio que las estructuras hidráulicas de Tipón fueron diseñadas con criterios avanzados, los cuales favorecen de manera efectiva la disipación de energía y la regulación del flujo, aprovechando la geometría y las condiciones locales.

Palabras Clave: Disipación, Energía, Estructuras hidráulicas incas, Modelamiento CFD

ABSTRACT

This study focuses on the efficiency of kinetic energy dissipation in the Inca hydraulic structures of the Tipón Archaeological Complex, Cusco, 2024, highlighting the flow behavior at the inlet and outlet of each dissipator. This research arises from the need to understand how Inca engineering optimized water regulation.

To address this problem, field observations were combined with measurement techniques and Computational Fluid Dynamics (CFD). Discharges were determined using the weir method, while flow velocities were estimated through the Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) method. In parallel, three-dimensional numerical modeling was performed using FLOW-3D, allowing the simulation of flow behavior under controlled conditions and comparison with field data, thus ensuring the reliability of the results.

The kinetic energy dissipation efficiencies obtained for the seven evaluated dissipators were: S-shaped channel: 61.56%, T-shaped channel: 55.07%, zigzag channel: 39.51%, straight inlet with lateral outlet: 68.72%, lateral inlet with straight outlet: 41.41%, and inverted slope: 94.04%. The combination of discharge and velocity showed that higher flow values generate increased turbulence, promoting energy loss, while the fluid properties enabled the reproduction of the conditions observed in the field.

These results demonstrate that the hydraulic structures of Tipón were designed using advanced engineering criteria, which effectively enhance energy dissipation and flow regulation by taking advantage of geometry and local conditions.

Keywords: Dissipation, Energy, Inca hydraulic structures, CFD modeling

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	IV
1. CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema:.....	1
1.2. Formulación De Problemas	2
1.2.1. Problema General:	2
1.2.2. Problemas Específicos:	2
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. Conveniencia.....	3
1.3.2. Relevancia Social.....	4
1.3.3. Implicancias Prácticas.....	4
1.3.4. Valor Teórico	5
1.3.5. Utilidad Metodológica	6
1.4. Objetivos De La Investigación.....	7
1.4.1. Objetivo General	7
1.4.2. Objetivos Específicos.....	7
1.5. Delimitación De La Investigación.....	7

1.5.1.	Delimitación Espacial	7
1.5.2.	Delimitación Temporal	10
2.	CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	11
2.1.	Antecedentes de la Investigación	11
2.1.1.	Antecedente Locales de Investigación.....	11
2.1.2.	Antecedente Nacionales de Investigación	13
2.1.3.	Antecedentes Internacionales de Investigación	17
2.2.	Bases teóricas	20
2.2.1.	Definición Conceptual	20
2.2.2.	Definición Operacional	73
2.3.	Hipótesis.....	76
2.3.1.	Hipótesis General.....	76
2.3.2.	Hipótesis Específicas	76
2.4.	Variables.....	76
2.4.1.	Identificación de Variables	76
2.4.2.	Operacionalización de Variables	77
2.5.	Definición de Términos Básicos	78
3.	CAPITULO III MÉTODO.....	80
3.1.	Alcance del Estudio.....	80
3.1.1.	Nivel de la Investigación	80

3.1.2.	Tipo de la Investigación.....	80
3.2.	Diseño de la Investigación	81
3.3.	Población.....	82
3.3.1.	Unidad de Estudio.....	83
3.4.	Muestra.....	83
3.4.1.	Tipo de muestreo.....	83
3.4.2.	Técnicas de selección de muestra	84
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	85
3.5.1.	Técnicas de recolección de datos	85
3.5.2.	Instrumentos de recolección de datos	86
3.6.	Validez y confiabilidad de instrumentos.....	87
3.6.1.	Validación de instrumentos.....	87
3.6.2.	Confiabilidad de instrumentos	87
3.7.	Plan de análisis de datos.....	88
3.8.	Procedimientos para la Recolección y Análisis de Datos	89
3.8.1.	Escaneo LiDAR de los disipadores hidráulicos incas.....	90
3.8.2.	Adquisición y análisis de imágenes del flujo mediante el método LSPIV	97
3.8.3.	Determinación del caudal mediante el método del vertedero	102
3.8.4.	Modelamiento computacional del comportamiento hidráulico en FLOW-3D	107
4.	CAPITULO IV RESULTADOS.....	112

4.1.	Resultados respecto a los objetivos específicos.	113
4.1.1.	Evaluación de la influencia de la geometría en la eficiencia de disipación de energía cinética	113
4.1.2.	Determinación de las propiedades del fluido en las estructuras hidráulicas incas de disipación de energía cinética	123
4.1.3.	Análisis de las características del flujo y su influencia en la eficiencia de disipación de energía cinética.....	128
4.1.4.	Variación de la eficiencia de disipación de energía cinética entre los diferentes tipos de estructuras hidráulicas incas	274
4.2.	Resultados respecto al objetivo general	276
4.2.1.	Cálculo de la eficiencia de disipación de la energía cinética.....	276
5.	CAPITULO V: DISCUSIÓN.....	314
5.1.	Descripción de los hallazgos más relevantes y significativos.....	314
5.1.1.	Canal en forma de S.....	314
5.1.2.	Canal en forma de T.....	315
5.1.3.	Canal en forma de Zigzag.....	316
5.1.4.	Caída con doble salida	317
5.1.5.	Caída con entrada recta y salida lateral.....	318
5.1.6.	Caída con entrada lateral y salida recta.....	319
5.1.7.	Canal con pendiente invertida.....	320
5.2.	Limitaciones del estudio.....	320

5.2.1. Limitaciones en la toma de datos de campo	321
5.2.2. Limitaciones técnicas del modelamiento numérico	321
5.2.3. Limitaciones conceptuales y de alcance	322
5.3. Comparación crítica con la literatura existente	323
5.4. Implicancias del estudio	325
CONCLUSIONES.....	327
RECOMENDACIONES.....	330
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	331
ANEXOS.....	336

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Descripción de modelos más comunes en FLOW-3D.....</i>	50
Tabla 2	<i>Ventajas del modelo RNG k- ϵ</i>	51
Tabla 3	<i>Método FAVOR y SIMPLE</i>	63
Tabla 4	<i>Operacionalización de variables</i>	77
Tabla 5	<i>Cálculo de la temperatura de los disipadores</i>	124
Tabla 6	<i>Resultados del análisis del vertedero del disipador en forma de S</i>	129
Tabla 7	<i>Resultados del análisis del vertedero del disipador en forma de T</i>	130
Tabla 8	<i>Resultados del análisis del vertedero del disipador en forma de Zigzag</i>	131
Tabla 9	<i>Resultados del análisis del vertedero del disipador de caída con doble salida</i>	132
Tabla 10	<i>Resultados del análisis del vertedero del disipador con caída con entrada recta y salida lateral</i>	133
Tabla 11	<i>Resultados del análisis del vertedero del disipador con caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	134
Tabla 12	<i>Resultados del análisis del vertedero del disipador con pendiente invertida</i>	135
Tabla 13	<i>Validación del Caudal</i>	136
Tabla 14	<i>Información del video del LSPIV del disipador en forma de S - Entrada</i>	138
Tabla 15	<i>Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de S - Entrada.....</i>	139
Tabla 16	<i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador en forma de S - Entrada</i>	140
Tabla 17	<i>Información del video del LSPIV del disipador en forma de S - Salida</i>	142
Tabla 18	<i>Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de S - Salida.....</i>	142

Tabla 19 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador en forma de S - Salida</i>	143
Tabla 20 <i>Información del video del LSPIV del disipador en forma de T - Entrada</i>	145
Tabla 21 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de T - Entrada</i>	145
Tabla 22 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador en forma de T - Entrada</i>	146
Tabla 23 <i>Información del video del LSPIV del disipador en forma de T - Salida.....</i>	148
Tabla 24 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de T - Salida</i>	148
Tabla 25 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador en forma de T - Salida</i>	149
Tabla 26 <i>Información del video del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Entrada</i>	151
Tabla 27 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Entrada.....</i>	151
Tabla 28 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Entrada</i>	152
Tabla 29 <i>Información del video del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida</i>	154
Tabla 30 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida.....</i>	154
Tabla 31 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida</i>	155
Tabla 32 <i>Información del video del LSPIV del disipador con caída con doble salida - Entrada</i>	157
Tabla 33 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con doble salida - Entrada</i>	157

Tabla 34 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador con caída con doble salida - Entrada.....</i>	158
Tabla 35 <i>Información del video del LSPIV del disipador con caída con doble salida - Salida.....</i>	160
Tabla 36 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con doble salida - Salida.....</i>	160
Tabla 37 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador con caída con doble salida - Salida.....</i>	161
Tabla 38 <i>Información del video del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada</i>	163
Tabla 39 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada</i>	163
Tabla 40 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada</i>	164
Tabla 41 <i>Información del video del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida</i>	166
Tabla 42 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida</i>	166
Tabla 43 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida</i>	167
Tabla 44 <i>Información del video del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta - Entrada.....</i>	169
Tabla 45 <i>Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta - Entrada.....</i>	169

Tabla 46 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta - Entrada</i>	170
Tabla 47 <i>Información del video del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta – Salida</i>	172
Tabla 48 <i>Detalles de medición del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta - Salida.....</i>	172
Tabla 49 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta - Salida</i>	173
Tabla 50 <i>Información del video del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada .</i>	175
Tabla 51 <i>Detalles de medición del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada ...</i>	175
Tabla 52 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada</i>	176
Tabla 53 <i>Información del video del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida</i>	178
Tabla 54 <i>Detalles de medición del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida.....</i>	178
Tabla 55 <i>Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida</i>	179
Tabla 56 <i>Velocidades resultantes de la ecuación general de continuidad</i>	182
Tabla 57 <i>Velocidades resultantes del método de LSPIV.....</i>	183
Tabla 58 <i>Cálculo de rugosidad.....</i>	185
Tabla 59 <i>Tabla de coeficientes de Manning según el material.....</i>	187
Tabla 60 <i>Resultados de la validación de los diferentes métodos usados.....</i>	269
Tabla 61 <i>Energía Cinética en el punto de entrada del dissipador en forma de S.....</i>	280
Tabla 62 <i>Energía Cinética en el punto de salida del dissipador en forma de S</i>	281

Tabla 63 <i>Energía Cinética en el punto de entrada del disipador en forma de T</i>	285
Tabla 64 <i>Energía Cinética en el punto de salida del disipador en forma de T</i>	286
Tabla 65 <i>Energía Cinética en el punto de entrada del disipador en forma de Zigzag</i>	290
Tabla 66 <i>Energía Cinética en el punto de salida del disipador en forma de Zigzag</i>	291
Tabla 67 <i>Energía Cinética en el punto de entrada del disipador de caída de doble salida.....</i>	295
Tabla 68 <i>Energía Cinética en el punto de salida del disipador de caída de doble salida</i>	296
Tabla 69 <i>Energía Cinética en el punto de entrada del disipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	301
Tabla 70 <i>Energía Cinética en el punto de salida del disipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	302
Tabla 71 <i>Energía Cinética en el punto de entrada del disipador con caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	306
Tabla 72 <i>Energía Cinética en el punto de salida del disipador con caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	307
Tabla 73 <i>Energía Cinética en el punto de entrada del disipador con pendiente invertida</i>	311
Tabla 74 <i>Energía Cinética en el punto de salida del disipador con pendiente invertida.....</i>	312

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Localización política y geográfica del parque arqueológico de Tipón</i>	8
Figura 2 <i>Mapa topográfico y del parque arqueológico de Tipón.....</i>	9
Figura 3 <i>Parámetros de Vertederos.....</i>	22
Figura 4 <i>Esquema de pozo amortiguador ubicado al pie del cimacio vertedor.....</i>	23
Figura 5 <i>Densidad y de diferentes objetos y su comportamiento de manera diferente en un líquido</i>	24
Figura 6 <i>Velocidad relativa de un fluido sobre superficie plano</i>	26
Figura 7 <i>Caudal</i>	27
Figura 8 <i>Tirante hidráulico.....</i>	28
Figura 9 <i>Elementos geométricos de la sección transversal de un canal abierto.....</i>	28
Figura 10 <i>Disipadores de Energía.....</i>	36
Figura 11 <i>Representación de malla 3D</i>	43
Figura 12 <i>Volumen de control</i>	44
Figura 13 <i>Condiciones de límite</i>	47
Figura 14 <i>Tipos de Turbulencia.....</i>	52
Figura 15 <i>Método de Volúmenes Finitos</i>	55
Figura 16 <i>Malla Ortogonal FVM.....</i>	58
Figura 17 <i>Multimallado en Flow 3D</i>	61
Figura 18 <i>Mapa de Tipón.....</i>	82
Figura 19 <i>Flujograma general del procedimiento metodológico</i>	89
Figura 20 <i>Ubicación de los disipadores a estudiar</i>	95

Figura 21 <i>Flujograma del procedimiento metodológico para el levantamiento y procesamiento de datos mediante escaneo LiDAR</i>	96
Figura 22 <i>Flujograma del procedimiento metodológico para la adquisición y análisis de imágenes del flujo mediante el método LSPIV</i>	101
Figura 23 <i>Vertedero</i>	104
Figura 24 <i>Flujograma del procedimiento metodológico para la determinación del caudal mediante el método del vertedero</i>	106
Figura 25 <i>Flujograma del procedimiento metodológico para el modelamiento computacional del comportamiento hidráulico</i>	111
Figura 26 <i>Nube de Puntos Obtenido del Vuelo del LIDAR</i>	114
Figura 27 <i>Escaneo LIDAR de todo el Complejo Arqueológico de Tipon</i>	114
Figura 28 <i>Procesamiento del disipador en forma de S</i>	116
Figura 29 <i>Procesamiento del disipador en forma de T</i>	117
Figura 30 <i>Procesamiento del disipador en forma de Zigzag</i>	118
Figura 31 <i>Procesamiento del disipador caída con doble salida</i>	119
Figura 32 <i>Procesamiento del disipador caída con entrada recta y salida lateral</i>	120
Figura 33 <i>Procesamiento del disipador caída con entrada lateral y salida recta</i>	121
Figura 34 <i>Procesamiento del disipador en pendiente invertida</i>	122
Figura 35 <i>Gráfico temperatura vs densidad</i>	126
Figura 36 <i>Realización del método del vertedero en el disipador en forma de S</i>	129
Figura 37 <i>Realización del método del vertedero en el disipador en forma de T</i>	130
Figura 38 <i>Realización del método del vertedero en el disipador en forma de Zigzag</i>	131
Figura 39 <i>Realización del método del vertedero en el disipador de caída con doble salida ...</i>	132

Figura 40 <i>Realización del método del vertedero en el dissipador con caída con entrada recta y salida lateral</i>	133
Figura 41 <i>Realización del método del vertedero del canal con caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	134
Figura 42 <i>Realización del método del vertedero del canal con pendiente invertida.....</i>	135
Figura 43 <i>Validación del Caudal del Vertedero con Aforamiento</i>	137
Figura 44 <i>Sección Transversal del dissipador en forma de S - Entrada.....</i>	139
Figura 45 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de S - Entrada</i>	141
Figura 46 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de S - Entrada.....</i>	141
Figura 47 <i>Sección Transversal del dissipador en forma de S - Salida</i>	142
Figura 48 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de S - Salida</i>	144
Figura 49 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de S - Entrada.....</i>	144
Figura 50 <i>Sección Transversal del dissipador en forma de T - Entrada</i>	145
Figura 51 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de T - Entrada</i>	147
Figura 52 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de T - Entrada.....</i>	147
Figura 53 <i>Sección Transversal del dissipador en forma de T - Salida</i>	148
Figura 54 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de T - Salida.....</i>	150
Figura 55 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de T - Salida</i>	150
Figura 56 <i>Sección Transversal del dissipador en forma de Zigzag - Entrada.....</i>	151
Figura 57 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Entrada</i>	153
Figura 58 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Entrada</i>	153
Figura 59 <i>Sección Transversal del dissipador en forma de Zigzag - Salida.....</i>	154
Figura 60 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Salida</i>	156

Figura 61 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Salida.....</i>	156
Figura 62 <i>Sección Transversal del dissipador con caída con doble salida - Entrada.....</i>	157
Figura 63 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada</i>	159
Figura 64 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada</i>	159
Figura 65 <i>Sección Transversal del dissipador con caída con doble salida - Salida.....</i>	160
Figura 66 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Salida</i>	162
Figura 67 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Salida</i>	162
Figura 68 <i>Sección Transversal del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada</i>	164
Figura 69 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada</i>	165
Figura 70 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada</i>	165
Figura 71 <i>Sección Transversal del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida</i>	167
Figura 72 <i>Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida</i>	168
Figura 73 <i>Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida</i>	168

Figura 74 Sección Transversal del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta -	
Entrada	170
Figura 75 Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y	
salida recta - Entrada	171
Figura 76 Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida	
recta - Entrada	171
Figura 77 Sección Transversal del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta -	
Salida	173
Figura 78 Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y	
salida recta - Salida	174
Figura 79 Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida	
recta - Salida	174
Figura 80 Sección Transversal del dissipador con pendiente invertida - Entrada	175
Figura 81 Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada	
.....	177
Figura 82 Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada ..	177
Figura 83 Sección Transversal del dissipador con pendiente invertida - Salida	178
Figura 84 Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida	180
Figura 85 Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida	180
Figura 86 Validación de la velocidad de entrada entre LSPIV y con la ecuación general de	
continuidad	183
Figura 87 Validación de la velocidad de salida entre LSPIV y con la ecuación general de	
continuidad	184

Figura 88	<i>Toma aérea con dron del dissipador en forma en S</i>	188
Figura 89	<i>Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de S....</i>	189
Figura 90	<i>Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de S</i>	190
Figura 91	<i>Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del dissipador en forma de S</i>	191
Figura 92	<i>Perfil longitudinal del dissipador en forma de S</i>	192
Figura 93	<i>Líneas de flujo del dissipador en forma de S</i>	193
Figura 94	<i>Distribución del campo de velocidades en el dissipador en forma de S</i>	194
Figura 95	<i>Puntos de comprobación del dissipador en forma de S.....</i>	195
Figura 96	<i>Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador en forma de S</i>	196
Figura 97	<i>Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador en forma de S</i>	196
Figura 98	<i>Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador en forma de S</i>	197
Figura 99	<i>Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador en forma de S</i>	198
Figura 100	<i>Toma aérea con dron del dissipador en forma en T</i>	199
Figura 101	<i>Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de T .</i>	200
Figura 102	<i>Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de T</i>	200
Figura 103	<i>Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del dissipador en forma de T</i>	201
Figura 104	<i>Perfil longitudinal del dissipador en forma de T</i>	202
Figura 105	<i>Líneas de flujo del dissipador en forma de T</i>	203
Figura 106	<i>Distribución del campo de velocidades en el dissipador en forma de T</i>	204
Figura 107	<i>Puntos de comprobación del dissipador en forma de T</i>	205

Figura 108	<i>Corte transversal del P1 de comprobación del disipador en forma de T</i>	205
Figura 109	<i>Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del disipador en forma de T</i>	206
Figura 110	<i>Corte transversal del P2 de comprobación del disipador en forma de T</i>	207
Figura 111	<i>Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del disipador en forma de T</i>	208
Figura 112	<i>Toma aérea con dron del disipador en forma en Zigzag</i>	209
Figura 113	<i>Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del disipador en forma de Zigzag</i>	210
Figura 114	<i>Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del disipador en forma de Zigzag</i>	210
Figura 115	<i>Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del disipador en forma de Zigzag.....</i>	211
Figura 116	<i>Perfil longitudinal del disipador en forma de Zigzag</i>	212
Figura 117	<i>Líneas de flujo del disipador en forma de Zigzag</i>	213
Figura 118	<i>Distribución del campo de velocidades en el disipador en forma de Zigzag.....</i>	214
Figura 119	<i>Puntos de comprobación del disipador en forma de Zigzag</i>	215
Figura 120	<i>Corte transversal del P1 de comprobación del disipador en forma de Zigzag</i>	215
Figura 121	<i>Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del disipador en forma de Zigzag.....</i>	216
Figura 122	<i>Corte transversal del P2 de comprobación del disipador en forma de Zigzag</i>	217
Figura 123	<i>Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del disipador en forma de Zigzag.....</i>	218
Figura 124	<i>Toma aérea con dron del disipador de caída con doble salida</i>	219

Figura 125 Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del disipador de caída con doble salida.....	220
Figura 126 Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del disipador de caída con doble salida.....	221
Figura 127 Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del disipador de caída con doble salida.....	222
Figura 128 Perfil longitudinal del disipador de caída con doble salida	223
Figura 129 Distribución de presión del disipador de caída con doble salida.....	224
Figura 130 Distribución del campo de velocidades en el disipador de caída con doble salida	225
Figura 131 Líneas de flujo del disipador de caída con doble salida.....	226
Figura 132 Puntos de comprobación del disipador de caída con doble salida.....	227
Figura 133 Corte transversal del P1 de comprobación del disipador de caída con doble salida	227
Figura 134 Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del disipador de caída con doble salida.....	228
Figura 135 Corte transversal del P2 de comprobación del disipador de caída con doble salida	229
Figura 136 Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del disipador de caída con doble salida.....	229
Figura 137 Corte transversal del P3 de comprobación del disipador de caída con doble salida	230

Figura 138 <i>Extracción de velocidades del P3 del corte transversal del dissipador de caída con doble salida</i>	231
Figura 139 <i>Toma aérea con dron del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral..</i>	232
Figura 140 <i>Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral.....</i>	233
Figura 141 <i>Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	234
Figura 142 <i>Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral.....</i>	235
Figura 143 <i>Perfil lateral del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral.....</i>	236
Figura 144 <i>Distribución de presión del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	237
Figura 145 <i>Distribución del campo de velocidades en el dissipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	238
Figura 146 <i>Líneas de flujo del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral.....</i>	239
Figura 147 <i>Puntos de comprobación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	240
Figura 148 <i>Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	240
Figura 149 <i>Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral.....</i>	241
Figura 150 <i>Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	242

Figura 151 <i>Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral.....</i>	243
Figura 152 <i>Toma aérea con dron del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta..</i>	244
Figura 153 <i>Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	245
Figura 154 <i>Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta</i>	246
Figura 155 <i>Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	247
Figura 156 <i>Perfil longitudinal del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	248
Figura 157 <i>Distribución de presión del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta</i>	249
Figura 158 <i>Distribución del campo de velocidades en el dissipador de caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	250
Figura 159 <i>Líneas de flujo del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta.....</i>	251
Figura 160 <i>Puntos de comprobación del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta</i>	252
Figura 161 <i>Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador de caída con entrada lateral y salida</i>	253
Figura 162 <i>Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador de caída con entrada lateral y salida</i>	254
Figura 163 <i>Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador de caída con entrada lateral y salida</i>	255

Figura 164 <i>Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador de caída con entrada lateral y salida</i>	256
Figura 165 <i>Toma aérea con dron del dissipador con pendiente invertida</i>	257
Figura 166 <i>Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador con pendiente invertida</i>	258
Figura 167 <i>Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador con pendiente invertida</i>	259
Figura 168 <i>Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del dissipador con pendiente invertida</i>	260
Figura 169 <i>Perfil lateral del dissipador con pendiente invertida</i>	261
Figura 170 <i>Distribución del campo de velocidades en el dissipador con pendiente invertida..</i>	262
Figura 171 <i>Líneas de flujo del dissipador con pendiente invertida</i>	263
Figura 172 <i>Puntos de comprobación del dissipador con pendiente invertida</i>	264
Figura 173 <i>Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador con pendiente invertida</i>	265
Figura 174 <i>Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador con pendiente invertida</i>	266
Figura 175 <i>Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador con pendiente</i>	267
Figura 176 <i>Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador con pendiente invertida</i>	268
Figura 177 <i>Gráfico del análisis comparativo del caudal de entrada entre LSPIV y Vertedero</i>	270
Figura 178 <i>Gráfico del análisis comparativo del caudal de salida entre LSPIV y Vertedero .</i>	270
Figura 179 <i>Gráfico del análisis comparativo de la velocidad de entrada entre LSPIV y Simulación.....</i>	271

Figura 180 <i>Gráfico del análisis comparativo de la velocidad de salida entre LSPIV y Simulación.....</i>	272
Figura 181 <i>Variación de la eficiencia de energía cinética de disipación entre los disipadores</i>	274
Figura 182 <i>Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador en forma de S</i>	278
Figura 183 <i>Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del disipador en forma de S</i>	279
Figura 184 <i>Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del disipador en forma de S</i>	280
Figura 185 <i>Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador en forma de T</i>	283
Figura 186 <i>Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del disipador en forma de T</i>	284
Figura 187 <i>Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del disipador en forma de T</i>	285
Figura 188 <i>Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador en forma de Zigzag</i>	288
Figura 189 <i>Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del disipador en forma de Zigzag</i>	289
Figura 190 <i>Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del disipador en forma de Zigzag.....</i>	290

Figura 191 <i>Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador con caída con doble salida</i>	293
Figura 192 <i>Sección transversal de velocidad del disipador de caída de doble caída (Entrada, Salida 1, Salida 2).....</i>	294
Figura 193 <i>Número de froude del disipador con caída de doble salida en perfil longitudinal</i>	298
Figura 194 <i>Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	299
Figura 195 <i>Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del disipador de caída con entrada recta y salida lateral.....</i>	300
Figura 196 <i>Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del disipador de caída con entrada recta y salida lateral</i>	301
Figura 197 <i>Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador de caída con entrada lateral y salida recta</i>	304
Figura 198 <i>Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del disipador con caída con entrada lateral y salida recta</i>	305
Figura 199 <i>Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del disipador con caída con entrada lateral y salida recta</i>	306
Figura 200 <i>Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador con pendiente invertida.....</i>	309
Figura 201 <i>Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del disipador con pendiente invertida</i>	310
Figura 202 <i>Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del disipador con pendiente invertida.....</i>	311

LISTADO DE ABREVIATURAS

3D	Tres Dimensiones
CAD	Diseño Asistido por Computadora (Computer-Aided Design)
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics)
CFL	Condición de Courant–Friedrichs–Lewy
DNS	Simulación Numérica Directa (Direct Numerical Simulation)
FAVOR	Representación de Obstáculos de Área/Volumen Fraccional (Fractional Area/Volume Obstacle Representation)
Fr	Número de Froude
FVM	Método de Volúmenes Finitos (Finite Volume Method)
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System)
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
Ks	Coefficiente de rugosidad absoluta equivalente
LES	Simulación de Grandes Remolinos (Large Eddy Simulation)
LiDAR	Detección y Rango de Luz (Light Detection and Ranging)
LSPIV	Velocimetría de Imágenes de Partículas a Gran Escala (Large Scale Particle Image Velocimetry)
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
n	Coefficiente de rugosidad de Manning
PPK	Cinemática Post-Procesada (Post-Processed Kinematic)
QUICK	Interpolación Cuadrática Ascendente para Cinemática Convectiva (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)
RANS	Promedio de Reynolds de Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

Re	Número de Reynolds
RNG	Grupo de Renormalización (Renormalization Group)
RTK	Cinemática en Tiempo Real (Real Time Kinematic)
SIMPLE	Método Semi-Implícito para Ecuaciones Vinculadas a la Presión (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)
SOR	Sobrerrelajación Sucesiva (Successive Over-Relaxation)
SST	Transporte de Esfuerzo Cortante (Shear Stress Transport)
STL	Lenguaje de Triángulos Estándar (Standard Triangle Language / Stereolithography)
VOF	Volumen de Fluido (Volume of Fluid)
We	Número de Weber

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del Problema:

En la actualidad, uno de los principales problemas en el análisis y diseño de canales hidráulicos es la insuficiente comprensión del proceso de disipación de la energía cinética del flujo, especialmente en estructuras hidráulicas antiguas construidas con criterios empíricos. Esta limitación genera dificultades para evaluar su comportamiento hidráulico real, lo que puede derivar en procesos de erosión, socavación y deterioro progresivo de las estructuras, comprometiendo su estabilidad y funcionamiento. En el caso de sistemas hidráulicos patrimoniales como los del Complejo Arqueológico de Tipón, estas problemáticas se intensifican debido a la necesidad de preservar la integridad de las obras, lo que restringe el uso de métodos tradicionales invasivos para su evaluación.

Asimismo, los ingenieros enfrentan una marcada escasez de información técnica precisa y actualizada sobre la geometría real, rugosidad y condiciones hidráulicas de estas estructuras, debido a su compleja configuración, difícil acceso y a la ausencia de monitoreos sistemáticos. El uso de metodologías convencionales limita la capacidad de describir con exactitud la distribución de velocidades, las zonas de alta energía y los mecanismos reales de disipación, lo que dificulta la formulación de diagnósticos confiables y propuestas de intervención adecuadas. Esta situación incrementa la incertidumbre en la toma de decisiones técnicas y restringe la posibilidad de evaluar escenarios alternativos sin intervenir físicamente las estructuras.

Frente a esta problemática, el empleo de tecnologías modernas no invasivas como el escaneo topográfico mediante sistemas LiDAR, la estimación de velocidades superficiales mediante la técnica LSPIV y el modelamiento hidráulico tridimensional basado en Dinámica de

Fluidos Computacional (CFD) se presenta como una alternativa técnica necesaria. Estas herramientas permiten obtener representaciones detalladas y precisas de la geometría real de las estructuras, así como analizar el comportamiento del flujo con mayor nivel de detalle, identificando zonas críticas, puntos de concentración de energía y patrones hidráulicos complejos que no pueden ser evaluados adecuadamente con métodos tradicionales.

La falta de estudios específicos que correlacionen la geometría y las propiedades del flujo con la eficiencia de disipación de energía cinética limita el aprovechamiento pleno de estas herramientas. Por ello, resulta necesario desarrollar investigaciones que permitan evaluar de manera rigurosa el comportamiento hidráulico de estas estructuras, contribuyendo tanto a su conservación como a la generación de conocimiento técnico aplicable al diseño de sistemas hidráulicos modernos.

1.2. Formulación De Problemas

1.2.1. Problema General:

¿Cuál es la eficiencia de disipación de energía cinética de las estructuras hidráulicas incas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

1.2.2. Problemas Específicos:

¿Cómo influye la geometría de las estructuras hidráulicas incas en la eficiencia de disipación de energía cinética en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

¿Cuáles son las propiedades del fluido de las estructuras hidráulicas incas de disipación de energía cinética en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

¿Cómo influyen las características del flujo en la eficiencia de disipación de energía cinética de las estructuras hidráulicas incas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

¿Cómo varía la eficiencia de disipación de energía cinética entre los diferentes tipos de estructuras hidráulicas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

1.3. Justificación

1.3.1. Conveniencia

La relevancia de este estudio radica en su potencial para generar un conocimiento profundo y detallado acerca de las avanzadas técnicas de ingeniería hidráulica que fueron desarrolladas por la civilización inca, pese a no contar con la tecnología moderna. El análisis centrado en el complejo arqueológico de Tipón permitió una comprensión más precisa de los métodos empleados por esta cultura para controlar y reducir la energía cinética del agua de manera eficiente. Tal comprensión no solo aportará al conocimiento histórico y técnico, sino que también podrá ser aprovechada en el diseño y perfeccionamiento de sistemas hidráulicos actuales. Estos nuevos sistemas tendrían la posibilidad de integrar principios ancestrales que favorezcan una mayor eficiencia energética y sostenibilidad, lo cual resulta fundamental frente a los retos contemporáneos en la gestión del recurso hídrico. En este sentido, la investigación no se limita a modelar canales pequeños, sino que busca generar un conocimiento integral sobre la eficiencia hidráulica de las estructuras incas de Tipón. Comprender estos mecanismos resulta conveniente porque permite rescatar principios ancestrales aplicables en la ingeniería civil moderna, ofreciendo soluciones sostenibles y adaptadas a contextos actuales de gestión del agua, así como herramientas que pueden ser útiles para la preservación patrimonial y la prevención de problemas hidráulicos en escenarios contemporáneos.

1.3.2. Relevancia Social

El estudio sobre la capacidad de las estructuras hidráulicas incas ubicadas en el Complejo Arqueológico de Tipón para disipar la energía cinética del agua adquiere relevancia no solo por su valor técnico, sino también por sus repercusiones sociales y culturales. Esta investigación contribuye al refuerzo de la identidad cultural y al reconocimiento del legado ancestral entre los habitantes de la zona, ya que la conservación de estas obras no solo resguarda un patrimonio histórico de incalculable valor, sino que también fortalece el sentido de pertenencia y orgullo local, generando beneficios para la comunidad inmediata y la sociedad en su conjunto. Asimismo, la preservación de este sitio arqueológico puede impulsar el turismo sostenible, generando empleo, desarrollo económico regional y fomentando nuevas investigaciones en el Complejo.

En este marco, los resultados obtenidos aportan tanto al ámbito académico como a la valorización del patrimonio hidráulico inca, pues la modelación y los análisis realizados permiten planificar estrategias de conservación que, además de fortalecer la identidad cultural, potencian el turismo cultural y científico en Tipón, contribuyendo al desarrollo económico sostenible de la región.

1.3.3. Implicancias Prácticas

Estudiar cuán eficientemente las estructuras hidráulicas incas de Tipón logran disipar la energía cinética del flujo permite comprender con mayor profundidad el comportamiento hidráulico de las distintas configuraciones empleadas en el Complejo Arqueológico de Tipón. Este conocimiento puede ser aplicado en diversos contextos de la ingeniería moderna dentro de nuestra región, brindando modelos funcionales que integran principios ancestrales con soluciones contemporáneas.

Asimismo, este tipo de análisis resulta clave para la protección del patrimonio cultural, ya que contribuye a preservar la funcionalidad y estabilidad de los antiguos sistemas hidráulicos mediante estudios no invasivos, evitando deterioros estructurales que comprometan su valor histórico. Además, permite mejorar el aprovechamiento del recurso hídrico mediante propuestas técnicas sostenibles, aplicables a contextos actuales con condiciones geográficas y sociales similares. Desde la práctica ingenieril, la tesis ofrece criterios replicables para el diseño y rediseño de canales modernos, evitando procesos erosivos. A su vez, la metodología utilizada permite extender los modelos hacia el análisis de escenarios extremos, como avenidas súbitas o colapsos estructurales, aportando a la gestión del riesgo y la prevención de desastres naturales que amenazan tanto infraestructuras modernas como comunidades vulnerables.

1.3.4. Valor Teórico

La presente investigación tiene como propósito comprender la eficiencia con la que las estructuras hidráulicas incas, ubicadas en el Complejo Arqueológico de Tipón (Cusco), lograban controlar y reducir la energía cinética del agua. Este enfoque busca rescatar los fundamentos de la ingeniería ancestral aplicada por esta civilización andina. Al examinar los mecanismos utilizados para atenuar la fuerza del flujo, se puede validar y enriquecer el conocimiento actual sobre sus técnicas hidráulicas. Asimismo, el estudio propone una articulación entre la hidráulica moderna y la conservación del patrimonio, aportando un marco teórico útil para interpretar, proteger y aprovechar sistemas hidráulicos de valor histórico. De igual modo, se plantea un fundamento técnico riguroso que puede orientar futuras investigaciones y soluciones aplicadas a la gestión del agua, tanto en sitios arqueológicos como en entornos contemporáneos.

El estudio brinda un aporte teórico al cuantificar la eficiencia hidráulica de estructuras incas, lo cual enriquece el conocimiento sobre la ingeniería ancestral y su vigencia en la actualidad.

Al comparar estos resultados con la hidráulica moderna, se establece un marco conceptual que articula pasado y presente, mostrando que las soluciones incas no solo fueron efectivas en su época, sino que continúan siendo un referente válido para la ciencia actual.

1.3.5. Utilidad Metodológica

El estudio de cuán eficientemente las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón (Cusco) disipan la energía cinética del flujo requiere la aplicación de metodologías avanzadas de análisis hidráulico. Para lograr una caracterización precisa, se emplean modelos computacionales en tres dimensiones, escaneo topográfico con tecnología LiDAR, y medición de velocidades superficiales mediante el método LSPIV. Estas herramientas tecnológicas permiten simular de forma detallada el comportamiento del agua dentro de las estructuras, brindando una representación cercana a la realidad física del flujo.

Asimismo, la obtención de datos en el lugar a través de técnicas de medición precisas permite verificar los modelos teóricos, ajustar las simulaciones y así poder hacer una comparación completa. Este análisis nos asegura resultados exactos y confiables del funcionamiento hidráulico y también establece una base sólida y estable para poder hacer estrategias de conservación dentro del complejo.

La combinación de escaneo LiDAR, análisis LSPIV, modelación numérica en FLOW-3D y mediciones con métodos tradicionales constituye una metodología robusta y replicable. Esta integración tecnológica también ofrece un caso de estudio aplicable en la formación académica y en futuras investigaciones. La metodología puede emplearse en otros sitios arqueológicos o en proyectos contemporáneos de infraestructura hidráulica, sirviendo como guía para evaluar eficiencia, conservación y seguridad estructural.

1.4. Objetivos De La Investigación

1.4.1. Objetivo General

Analizar la eficiencia de disipación de energía cinética de las estructuras hidráulicas incas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

1.4.2. Objetivos Específicos

Analizar la influencia de la geometría de las estructuras hidráulicas incas en la disipación de energía cinética en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

Determinar las propiedades del fluido de las estructuras hidráulicas incas de disipación de energía cinética en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

Analizar las características del flujo de las estructuras hidráulicas incas de disipación de energía cinética en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

Determinar la variación de la eficiencia de disipación de energía cinética entre los distintos tipos de estructuras hidráulicas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

1.5. Delimitación De La Investigación

1.5.1. Delimitación Espacial

El presente estudio se desarrolló en el Parque Arqueológico de Tipón, situado en la localidad de Choquepata, perteneciente a la provincia de Quispicanchi, en la región Cusco, Perú. Esta zona arqueológica se ubica aproximadamente a 27 kilómetros al sureste de la ciudad del Cusco.

Localización Política:

País: Perú

Región: Cusco

Provincia: Quispicanchi

Distrito: Oropesa

Figura 1

Localización política y geográfica del parque arqueológico de Tipón



CUSCO - PERÚ



QUISPICANCHIS - CUSCO



OROPESA - QUISPICANCHI



PARQUE DE TIPON - OROPESA

Nota. Extraído de Archivo: Perú - Cuzco Department (locator map).svg.

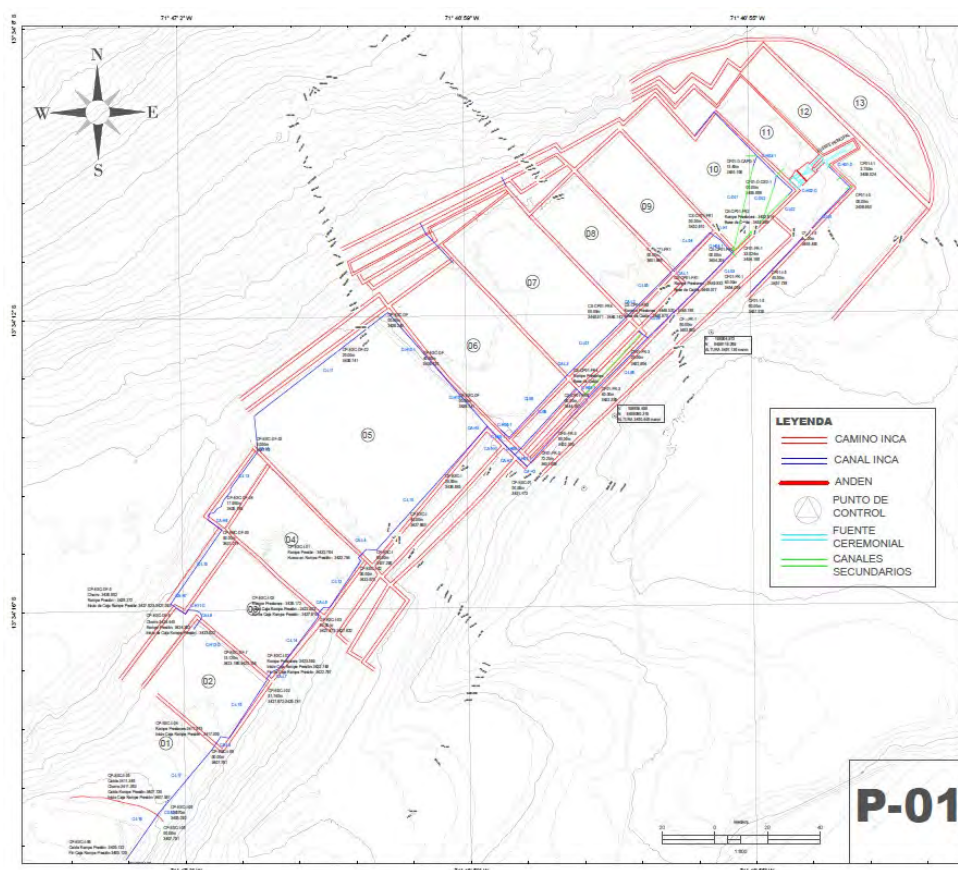
Localización Geográfica:

Este centro arqueológico se encuentra ubicado a unos 23 km al sureste de la ciudad. Se encuentra en el Valle Sagrado de los Incas, a una altitud aproximada de 3,500 m.s.n.m. Según las coordenadas latitud: Aproximadamente 13°34'40" S y longitud: Aproximadamente 71°48'20" O

Tipón tiene una extensión de 239 hectáreas aproximadamente en un perímetro de 6445 metros lineales. Se encuentra en la ladera del cerro Pachatusan, dentro del valle del río Huatanay (afluente del Vilcanota).

Figura 2

Mapa topográfico y del parque arqueológico de Tipón



Nota. Elaboración Propia

1.5.2. Delimitación Temporal

La investigación de la tesis se desarrolló entre los años 2024 y 2025. Durante este tiempo se organizaron las distintas etapas necesarias para cumplir con los objetivos del estudio. En los primeros meses de 2024 se realizó la revisión de información previa, tanto bibliográfica como histórica, que servirá como base para entender mejor el funcionamiento de las estructuras hidráulicas incas.

Más adelante, a lo largo del mismo año, se llevó a cabo las visitas al Complejo Arqueológico de Tipón. En estas salidas de campo se recogieron datos sobre la geometría de las estructuras, las características del agua y otros aspectos necesarios para el análisis. Este trabajo de campo se adaptó al clima de la zona, ya que las temporadas de lluvia pueden influir en la calidad de las mediciones, por lo que será importante elegir bien los meses en los que se trabajará.

En la segunda parte de 2024 se procesó la información recogida y se prepararán los materiales que servirán de base para el modelamiento en computadora. Ya en 2025, el enfoque fue puesto en las simulaciones hidráulicas, la comparación de resultados y la validación de las hipótesis. Durante este año también se avanzó en la redacción final de la tesis, organizando los resultados de una forma clara y comprensible.

El tiempo que fue elegido responde tanto a los plazos académicos de la universidad como a la necesidad de contar con un margen suficiente para que cada etapa se realice con calma y sin apresuramientos. De esta manera, se buscó asegurar que el trabajo de campo, el análisis y la escritura se complementen entre sí y den como resultado una investigación confiable y bien fundamentada.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedente Locales de Investigación

(Arangoitia Valdivia, 2020) durante su trabajo de investigación para su doctorado acerca de “Eficiencia Hídrica Del Sistema De Riego Inca De Tipón, Considerando La Concepción Del Sistema Y Sus Obras De Infraestructura Hidráulica Cusco – 2020” considerando un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo).

El propósito del estudio desarrollado por (Arangoitia Valdivia, 2020) fue analizar de manera integral el sistema de riego incaico en Tipón, abordando tanto sus dimensiones funcionales como su impacto cultural y técnico. Para ello, estableció una serie de objetivos específicos que permitieron evaluar no solo el desempeño operativo del sistema, sino también su importancia para la comunidad local, su aplicabilidad metodológica en estudios hidráulicos y su relevancia dentro del conocimiento académico. El enfoque adoptado combinó elementos cuantitativos y cualitativos, con el fin de obtener una comprensión más completa de su eficiencia hídrica.

En cuanto a la metodología, (Arangoitia Valdivia, 2020) aplicó un enfoque mixto, integrando herramientas estadísticas y métodos cualitativos para el procesamiento de información. El diseño elegido fue de tipo correlacional, orientado a identificar vínculos significativos entre las variables analizadas. El trabajo de campo se sustentó en una muestra representativa y empleó técnicas como entrevistas personales y cuestionarios estructurados, lo que permitió obtener datos sólidos y contextualizados.

Los datos analizados mediante herramientas estadísticas indicaron que el sistema de riego incaico presente en Tipón alcanza una eficiencia aproximada del 94%, superando ampliamente los

promedios registrados en sistemas de irrigación similares. Además, se identificó que gran parte de los productores agrícolas locales posee un conocimiento apropiado respecto al funcionamiento y conservación de dicha infraestructura hidráulica. En conclusión, se evidenció que iniciativas orientadas a preservar y adaptar este tipo de tecnologías ancestrales pueden contribuir significativamente al bienestar de las poblaciones rurales dedicadas a la agricultura local (Arangoitia Valdivia, 2020).

(Saloma Valdivia, 2014) durante su trabajo de investigación "Análisis del comportamiento hidráulico de las principales obras dentro del complejo arqueológico de Tipón" desarrollada en la zona principal del Complejo Arqueológico de Tipón, lugar denominado por algunos autores como el templo del agua del Imperio Incaico, ubicado en la Comunidad de Choquepata, Distrito de Oropesa, Provincia de Quispicanchis, Departamento de Cusco. El objetivo principal fue Evaluar el comportamiento del sistema hidráulico construido por los incas, mediante métodos e instrumentos de ingeniería modernos, tomando como referencia las principales obras hidráulicas del Complejo Arqueológico de Tipón, de esa manera poder aportar un punto de vista más técnico para su correcta conservación y posible reutilización.

La metodología consistió en: realizar un inventario de las distintas obras hidráulicas situadas en la zona de estudio; luego se realizó la recolección de datos necesarios como: cotas, propiedades geométricas, caudales; con el fin de realizar un análisis matemático mediante fórmulas de ingeniería vigentes en la actualidad; de igual forma se realizó un estudio hidrológico a la microcuenca de Cruz Moqo y se regionalizó datos meteorológicos a partir de 6 estaciones (Saloma Valdivia, 2014).

Entre los resultados más resaltantes se encontró que en esta zona es el lugar donde existe mayor intensidad de precipitación y menor evaporación dentro de la cuenca del valle de Cusco, y el sistema hidráulico funciona con un caudal promedio de 25 lts/seg pudiendo transportar hasta 565% de veces este caudal. La conclusión de la investigación fue que Tipón es un banco hidráulico a escala real donde los Incas enseñaron a sus jóvenes ingenieros el comportamiento hidráulico de diferentes tipos de obras (Saloma Valdivia, 2014).

2.1.2. Antecedente Nacionales de Investigación

En la tesis titulada “Estudio experimental de un vertedero triangular y modelación con OpenFOAM”, elaborada por (López Fry & Chung Benites, 2023), se llevó a cabo una investigación centrada en el análisis de las condiciones hidráulicas que se presentan en un vertedero de geometría triangular con borde delgado. El estudio combinó experimentación física y simulación computacional, con el objetivo de evaluar la precisión del modelo numérico a través de una comparación de resultados obtenidos con mallas de distinto tamaño en el entorno de OpenFOAM.

La presente investigación tuvo como propósito principal examinar el desempeño hidráulico de un vertedero de tipo triangular con pared delgada, mediante la aplicación de un enfoque comparativo entre pruebas experimentales y simulación numérica. Para ello, se consideraron cuatro valores distintos de caudal. La variable tomada como base para el análisis fue la carga hidráulica, entendida como la altura del flujo inmediatamente aguas arriba del vértice del vertedero (López Fry & Chung Benites, 2023).

En el desarrollo del modelo numérico del vertedero triangular, se recurrió a la técnica de dinámica de fluidos computacional (CFD). Para ello, se utilizaron diversas herramientas digitales, entre ellas AutoCAD para la elaboración de la geometría, Salome para la generación de la malla,

y OpenFOAM para la simulación. Se configuraron dos discretizaciones espaciales distintas —una con dimensiones de malla entre 0.007-0.03 y otra de 0.01-0.05— a fin de comparar su influencia en los resultados obtenidos. Además, se aplicaron cinco métricas estadísticas con el propósito de contrastar la precisión de las simulaciones frente a los datos experimentales (López Fry & Chung Benites, 2023).

Ambas configuraciones de malla proporcionaron resultados aceptables, demostrando una coherencia significativa con las mediciones experimentales. No obstante, la malla de mayor tamaño relativo (0.01-0.05) presentó un comportamiento ligeramente más favorable en los análisis estadísticos, alcanzando valores como un error absoluto medio de 0.0077 y un error porcentual absoluto medio del 8.13%. Estos resultados refuerzan la confiabilidad del modelo CFD como herramienta para representar fenómenos hidráulicos en vertederos triangulares (López Fry & Chung Benites, 2023).

Los autores concluyen que el enfoque basado en CFD demostró ser eficiente para la comparación del comportamiento hidráulico de vertederos triangulares de pared delgada. Si bien ambas mallas ofrecieron buenos resultados, la configuración con tamaño de celda de 0.01-0.05 evidenció un rendimiento estadístico superior. Por lo tanto, el modelo numérico propuesto podría emplearse como base en investigaciones futuras relacionadas con estructuras hidráulicas similares (López Fry & Chung Benites, 2023).

(Díaz Vilca & Morales Pino, 2021) realiza la tesis “Análisis Del Comportamiento Hidráulico De Vertederos De Perfil Tipo Creager Empleando Modelos Numéricos CFD En OpenFOAM” con el propósito de analizar el comportamiento hidráulico de los vertederos de perfil

tipo Creager mediante la simulación numérica de Modelos Numéricos CFD en el software OpenFOAM. El autor busca identificar las características hidráulicas de los vertederos de perfil tipo Creager a través del uso de la simulación numérica, para posteriormente aplicar los hallazgos en el diseño y mejora de vertederos de este tipo en futuras investigaciones.

Objetivo: El objetivo específico de esta investigación consiste en evaluar el comportamiento hidráulico de vertederos con perfil tipo Creager mediante simulaciones numéricas CFD, empleando el software OpenFOAM. El estudio busco evaluar los campos de presiones, así como las velocidades del sistema, las cargas de operación, los tirantes del flujo, los coeficientes de descarga, entre otros parámetros hidráulicos relevantes.(Díaz Vilca & Morales Pino, 2021)

Método de Investigación: El método utilizado en este trabajo fue la simulación mediante Modelos Numéricos CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) en el software OpenFOAM. El proceso incluyó la selección del solver adecuado (interFoam) y modelo de turbulencia (Standard K-Epsilon) para la simulación. También se realizó un proceso iterativo de generación de la malla computacional e identificación de los parámetros más relevantes del software.(Díaz Vilca & Morales Pino, 2021)

Resultados: Según los datos obtenidos se parecen al comportamiento hidráulico mostrado en los modelos experimentales previos, lo que indica la validez del uso de la simulación numérica como herramienta de análisis hidráulico. Además, se logró identificar con mayor profundidad las características hidráulicas del modelo a escala 1:20 y en un prototipo a escala real.(Díaz Vilca & Morales Pino, 2021)

Conclusión: Las conclusiones del estudio señalan que la simulación numérica mediante Modelos Numéricos CFD en el software OpenFOAM es una herramienta adecuada para el análisis

hidráulico de vertederos de perfil tipo Creager. Se observa la importancia de la correcta elección del solver y el modelo de turbulencia para obtener resultados fiables. Además, se señalan las implicaciones prácticas de los resultados dados para una mejora en los diseños futuros y se sugieren posibles líneas de investigación para profundizar en el tema.(Díaz Vilca & Morales Pino, 2021)

(Cantaro Fabian, 2024) realiza la tesis “Evaluación de la disipación de energía en aliviaderos escalonados de sección constante y variable mediante modelación numérica tridimensional” se puede observar es que la tesis se enfoca en evaluar la disipación de energía en aliviaderos escalonados con secciones constante y que estos son variables a través de modelación numérica en tres dimensiones, y que se utilizan diferentes técnicas e instrumentos para poder realizar la investigación.

Objetivos: El objetivo principal de la investigación es analizar cuál de las distintas alternativas de aliviaderos escalonados, con secciones geométricas constantes y variables, proporciona una óptima disipación de energía. Se plantean objetivos específicos como determinar la variación de la velocidad, del tirante y de la energía residual en el pie de los distintos aliviaderos escalonados, de sección variable convergente y de sección constante, mediante modelación numérica en tres dimensiones también llamada tridimensional. (Cantaro Fabian, 2024)

Métodos de Investigación: El método utilizado para llevar a cabo la investigación incluye la modelación numérica tridimensional de los aliviaderos escalonados, utilizando el software ANSYS Fluent, y la simulación de distintos escenarios de flujo utilizando el modelo turbulento

RANS k- ϵ . Se describen las simulaciones realizadas para cada configuración de aliviadero y se presentan los resultados numéricos obtenidos. (Cantaro Fabian, 2024)

Resultados: Los resultados obtenidos muestran que la sección variable convergente del aliviadero escalonado proporciona una mejor disipación de energía que la sección constante, lo que indica que la variación de la sección transversal en el aliviadero escalonado puede afectar significativamente la disipación de energía del flujo. Además, se encontró que la velocidad, el tirante y la energía residual varían significativamente en función de la sección transversal de los aliviaderos escalonados. (Cantaro Fabian, 2024)

Conclusiones: Las principales conclusiones de la investigación indican que la optimización de la sección transversal del aliviadero escalonado puede mejorar significativamente la disipación de energía hidráulica, lo que puede contribuir a reducir los costos asociados con las estructuras hidráulicas disipadoras de energía en el diseño de presas. Además, se presenta una técnica numérica eficiente para modelar y analizar aliviaderos escalonados mediante el uso del software ANSYS Fluent, lo que puede ser de gran utilidad en investigaciones futuras sobre el tema. (Cantaro Fabian, 2024)

2.1.3. Antecedentes Internacionales de Investigación

En el año 2020, Ayala Rojas y colaboradores desarrollaron una investigación orientada a evaluar la eficiencia en la disipación de energía de las estructuras hidráulicas hechas con gaviones y materiales reciclados, como neumáticos usados, mediante ensayos físicos a escala reducida. El estudio comprendió el análisis de tres tipos de estructuras: un canal escalonado ubicado en la vía Bogotá–Villavicencio, un sistema de caída escalonada en una cámara de inspección de alcantarillado pluvial situada en Acacías (Meta), y cuatro vertederos de caída libre de concreto contruidos sobre el río Fucha, en la ciudad de Bogotá (Ayala Rojas et al., 2020).

Objetivo: Según el autor, el objetivo de la investigación fue evaluar la eficiencia en la disipación de energía en estructuras hidráulicas, utilizando materiales alternativos como gaviones y neumáticos reciclados (Ayala Rojas et al., 2020).

Conclusión: Se observó mediante modelamiento a escala reducida que, al incorporar gaviones y neumáticos reciclados, se conserva el tipo de flujo, su funcionalidad y la disipación de energía supera el 92%. Se concluye, además, que la utilización de estos materiales alternativos para construir estructuras hidráulicas contribuye a reducir costos, conservar la estabilidad morfológica del cauce y permitir el flujo concentrado por el canal principal (Ayala Rojas et al., 2020).

(Ortloff, 2022) escribe un artículo científico en la revista wáter titulada “Inka Hydraulic Engineering at the Tipon Royal Compound (Perú)” donde realiza una descripción básica de las partes más importantes del sistema hidráulico del parque arqueológico de Tipón, destacando la cantidad de canales interconectados para el control del agua, las plataformas o andenes agrícolas, los diferentes cambios de sección en los canales y de algunas obras de arte más importantes. Haciendo un análisis no tan detallado del sistema de canales, pero evaluando las principales características de su sistema hidráulico comparándolos con la ingeniería hidráulica moderna.

Objetivo: Analizar de manera básica el comportamiento hidráulico del sistema de riego inca del parque arqueológico de Tipón para una mejor comprensión de esta ingeniería ancestral para compararlo con la ingeniería moderna (Ortloff, 2022).

Conclusión: La ingeniería hidráulica de Tipón, desarrollada por los Incas, era compleja y avanzada. Utilizaban múltiples fuentes de agua y un acueducto para gestionar el suministro y

drenaje de agua en terrazas agrícolas dedicadas a cultivos especiales. Los canales secundarios, que se cruzaban con los principales, permitían controlar el flujo de agua y mantener la estética de las fuentes, además de evitar derrames. Los ingenieros incas, a través de observaciones y experimentación, lograban flujos casi críticos que optimizaban la funcionalidad y apariencia de las estructuras. (Ortloff, 2022).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Definición Conceptual

2.2.1.1. Fundamentos de la hidráulica

2.2.1.1.1. Hidráulica

La hidráulica es la rama de la mecánica de fluidos que estudia el comportamiento del agua en reposo y en movimiento, así como las leyes que rigen su acción sobre las estructuras y los dispositivos destinados a su conducción, control y aprovechamiento. (Sotelo Ávila, 2002).

2.2.1.2. Sistemas y Estructuras hidráulicas

2.2.1.2.1. Sistemas Hidráulicos

Los sistemas hidráulicos son infraestructuras diseñadas para gestionar el agua en diversas aplicaciones, incluyendo su captación, almacenamiento, distribución y evacuación, y son fundamentales para el abastecimiento de agua, la irrigación y la prevención de inundaciones.

Los sistemas hidráulicos son definidos como componentes esenciales de los sistemas de acueductos. Estos sistemas incluyen una variedad de estructuras hidráulicas diseñadas para transportar y tratar el agua, asegurando su disponibilidad y calidad para satisfacer las diferentes necesidades de la población. La exposición principalmente a las inclemencias del tiempo y el inevitable deterioro de estas estructuras pueden generar problemas importantes y que pueda requerir largos periodos de reparación (Granados et al., 2022).

2.2.1.2.2. Estructuras Hidráulicas

Las estructuras hidráulicas son componentes esenciales diseñados para gestionar los recursos hídricos de forma eficaz. Estas estructuras incluyen infraestructuras polivalentes, sistemas de riego, mecanismos de control de inundaciones, centrales hidroeléctricas, embalses y obras de saneamiento. La conexión directa entre las estructuras hidráulicas y el entorno que las rodea

plantea desafíos para los ingenieros, obligándoles a adaptar los diseños a las limitaciones ambientales. El rendimiento y la funcionalidad de las estructuras hidráulicas pueden verse afectados por su interacción con el medio ambiente, lo que genera costos económicos y sociales cuando surgen problemas después de la construcción. Los ingenieros abordan estos desafíos no sólo basándose en teorías tradicionales y experiencia profesional, sino también profundizando en el comportamiento físico del flujo de agua a través de estructuras hidráulicas utilizando modelos físicos (Barahona, 2020).

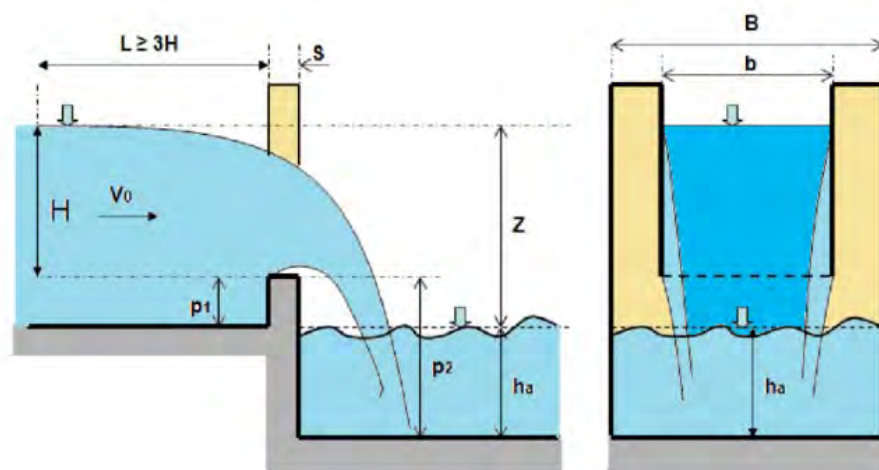
Los Tipos de Estructuras Hidráulicas son:

Canales hidráulicos

Un canal hidráulico es una conducción abierta, natural o artificial, diseñada para transportar agua bajo la acción de la gravedad, en la cual el flujo presenta una superficie libre expuesta a la presión atmosférica y su comportamiento está gobernado por las leyes de la hidráulica de flujo a superficie libre. (Sotelo Ávila, 2002).

Vertederos

Un vertedero es una estructura hidráulica que se utiliza para controlar el nivel del agua en un canal o en un río. Esta estructura es capaz de permitir el flujo del agua al sobrepasar una elevación determinada, por lo que se utiliza para evitar que se produzcan inundaciones y daños en las estructuras aledañas. El vertedero es especialmente útil en situaciones en las que el caudal es muy elevado y se requiere una regulación efectiva del nivel del agua. Además, se utilizan distintos tipos de vertederos, como vertederos de superficie libre, vertederos laterales, vertederos escalonados, entre otros, que se adaptan a las distintas necesidades hidráulicas y caudales de un sistema determinado (Ayala Rojas et al., 2020).

Figura 3*Parámetros de Vertederos*

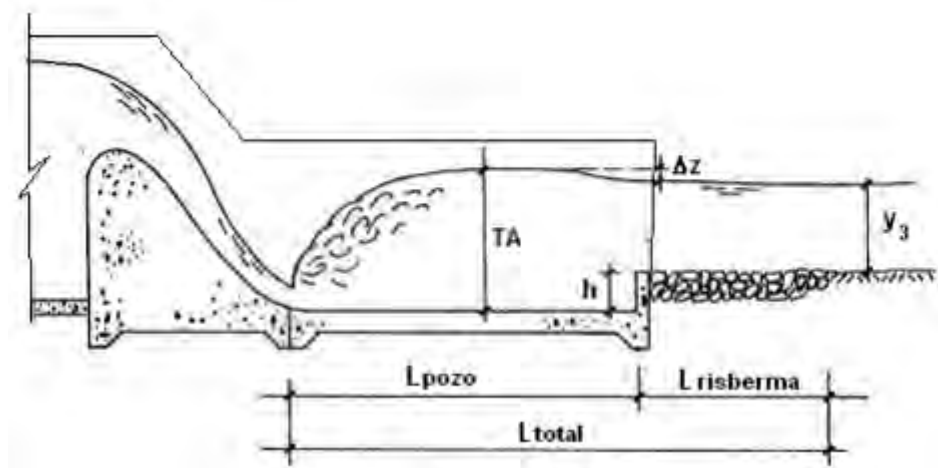
Nota. Elaborado por Washington Ramiro Sandoval Erazo

Pozos de disipación

Los pozos de disipación de energía son estructuras hidráulicas el cual su función es permitir restituir el flujo a las condiciones en las cuales se pueda aprovechar al máximo del recurso hídrico. Se utilizan para disminuir la carga hidráulica disipando por medio de estructuras de impacto y amortiguamiento, como los pozos rompe presión. Además, se pueden implementar válvulas de contraflujo o válvulas multichorro, los cuales descargan en una masa de agua o al aire. Estas estructuras de disipación de energía son obras complementarias para proyectos hidráulicos a presión (Gómez, 2016).

Figura 4

Esquema de pozo amortiguador ubicado al pie del cimacio vertedor



Nota. Extraído de “Disipadores de energía - parte II: pozo y estanque amortiguador Saltos Hidráulicos”

Según el autor, los saltos hidráulicos son "un cambio de energía que ocurre entre el flujo uniforme y la caída", y también son la disipación de energía que se produce en el colchón amortiguador después del inicio del salto hidráulico. Se pueden observar en las curvas de energía específica y de fuerza específica (Gencel, 2016).

2.2.1.3. Mecánica de fluidos aplicada a canales abiertos

2.2.1.3.1. Definición de fluidos

Los fluidos, según el autor, son sustancias que pueden fluir y adaptarse a la forma del sólido que lo contiene, lo que incluye tanto líquidos y gases. En el contexto del artículo, se enfocan en el comportamiento del agua en sistemas de canales y su interacción con estructuras hidráulicas. La comprensión de los fluidos es esencial para el diseño y análisis de sistemas de irrigación eficientes. (Collazo & Araya, 2019).

2.2.1.3.2. Propiedades de los fluidos

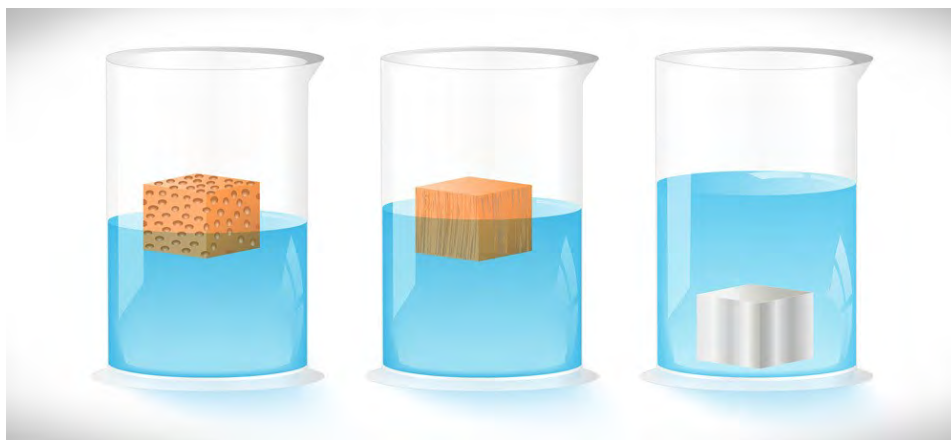
Las propiedades de los fluidos son características intrínsecas de los mismos que determinan cómo se comportan y cómo interactúan con otros objetos. Algunas de las propiedades fundamentales de los fluidos incluyen la densidad, la viscosidad, la tensión superficial, la compresibilidad y la temperatura, entre otras. Estas propiedades son importantes para comprender el comportamiento y la interacción de los fluidos en una amplia variedad de situaciones y aplicaciones (Ortiz Sánchez et al., 1972).

Densidad

La densidad es considerada una propiedad fundamental de los fluidos que se refiere a la masa contenida en un determinado volumen de la sustancia. En otras palabras, la densidad es considerada como la masa por cada unidad de volumen. La densidad es una propiedad muy importante de los fluidos ya que afecta a su comportamiento y sus interacciones con otros objetos y sustancias (Ortiz Sánchez et al., 1972).

Figura 5

Densidad y de diferentes objetos y su comportamiento de manera diferente en un líquido



Nota. Extraído de “Antón paar”

Viscosidad

La viscosidad se define como la propiedad de los fluidos que se refiere a la resistencia interna de una sustancia a un flujo laminar. Es decir, es la resistencia que un fluido encuentra al moverse o al ser movido por una fuerza externa. La viscosidad es importante ya que su valor afecta la velocidad del flujo de un fluido y su capacidad para disipar energía. Los fluidos con una viscosidad más alta tienden a fluir más lentamente y a disipar menos energía que los fluidos con una viscosidad más baja (Ortiz Sánchez et al., 1972).

Temperatura

La temperatura es una magnitud física que se utiliza fundamentalmente para medir el grado de calor o frío de un objeto o sustancia. En el contexto de la mecánica de fluidos, la temperatura describe la energía cinética promedio de las moléculas de un fluido. La temperatura del fluido puede influir en su densidad, viscosidad y otras propiedades térmicas, lo que a su vez afecta su comportamiento en diferentes situaciones de flujo. La temperatura se mide en grados Celsius (°C) o en grados Fahrenheit (°F) y se puede medir con un termómetro u otro tipo de sensor de temperatura (Ortiz Sánchez et al., 1972).

“En los fluidos, la temperatura también influye en la viscosidad, la densidad y otras propiedades termo físicas, lo que puede tener un impacto importante en los procesos de flujo y transferencia de calor” (Morales et al., 2017).

2.2.1.4. Flujo hidráulico en canales en canales abiertos

2.2.1.4.1. Definición de flujo hidráulico

El flujo hidráulico es el movimiento del agua a través de un conducto o canal, originado por una diferencia de energía, en el cual intervienen las fuerzas de gravedad, presión y fricción, y

cuyo comportamiento se analiza mediante los principios fundamentales de la hidráulica. (Sotelo Ávila, 2002).

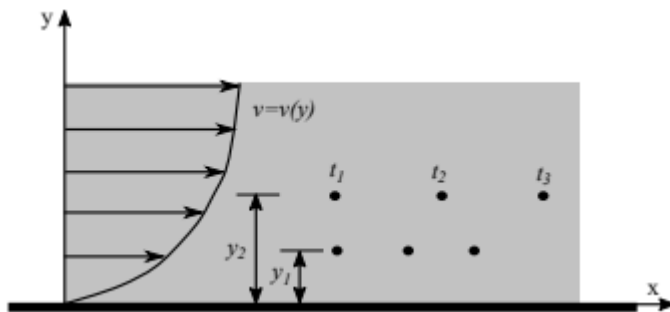
2.2.1.4.2. Características del flujo

Velocidad de flujo

La velocidad del flujo de un fluido se refiere a la rapidez con la que se mueve el fluido a través de un conducto o una tubería. La velocidad del flujo se mide en metros por segundo (m/s) y se calcula como el caudal dividido por el área transversal de la tubería. La velocidad del flujo es una propiedad importante que debe ser considerada en el diseño y operación de sistemas hidráulicos, ya que influye en la resistencia al flujo y en la transferencia de calor. La velocidad típica del flujo en sistemas hidráulicos varía desde unos pocos centímetros por segundo en sistemas de baja velocidad hasta varios metros por segundo en sistemas de alta velocidad (Ortiz Sánchez et al., 1972).

Figura 6

Velocidad relativa de un fluido sobre superficie plano



Nota. Extraído de “Mecánica de Fluidos y Bombas Fundamentos Básicos”

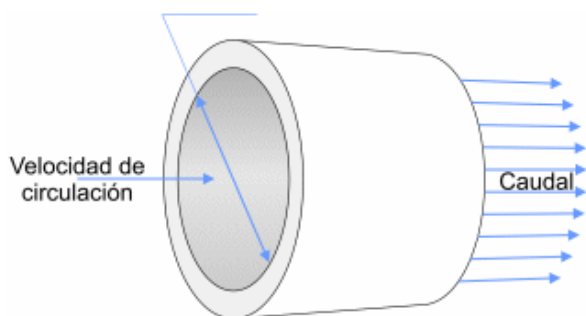
Caudal

El caudal es una magnitud hidráulica fundamental que expresa el volumen de agua que circula a través de una sección transversal de un canal o conducto en un intervalo de tiempo

determinado. Su valor depende de la velocidad media del flujo y del área hidráulica de la sección, y permite caracterizar el comportamiento del flujo, evaluar la capacidad de conducción de las estructuras hidráulicas y analizar fenómenos como la disipación de energía y las pérdidas por fricción. En hidráulica de canales abiertos, el caudal se mantiene constante en régimen permanente y constituye una variable clave para el diseño y análisis de sistemas hidráulicos. (Sotelo Ávila, 2002).

Figura 7

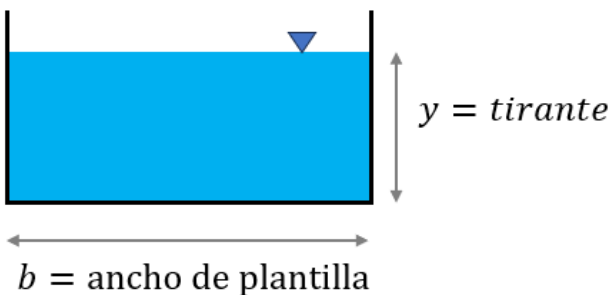
Caudal



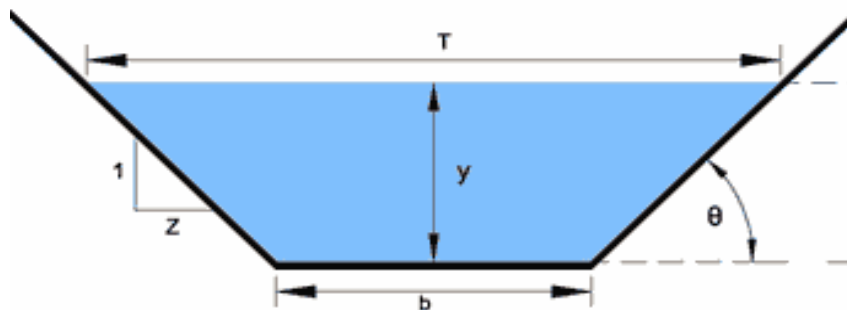
Nota. Extraído de “Calculartodo.com”

Tirante

El tirante corresponde a la profundidad del flujo en un canal a superficie libre y se define como la distancia vertical existente entre el fondo del canal y la superficie libre del agua. Esta variable es esencial para describir el estado hidráulico del flujo, ya que influye directamente en la velocidad, el área mojada y la energía específica del sistema. La variación del tirante a lo largo del canal permite identificar distintos tipos de flujo, como uniforme o variado, y es un parámetro determinante en el análisis hidráulico de canales, vertederos y estructuras de disipación de energía. (Sotelo Ávila, 2002).

Figura 8*Tirante hidráulico**Nota.* Extraído de “*Teaching Computation with MATLAB*”**2.2.1.5. Hidráulica de canales abiertos**

La hidráulica de canales abiertos se ocupa del estudio del flujo de agua en conductos que presentan una superficie libre, es decir, donde el líquido está en contacto directo con la atmósfera. Este tipo de flujo se distingue del que ocurre en tuberías cerradas, en las que el agua está completamente confinada. En general, el flujo en un conducto puede clasificarse como flujo en canal abierto o flujo a presión (en tubería) (Orjuela & Lozano, 2023).

Figura 9*Elementos geométricos de la sección transversal de un canal abierto**Nota.* Hidráulica General, Sotelo A.

2.2.1.5.1. Turbulencia

La turbulencia representa el comportamiento de los fluidos en múltiples escalas, involucrando parámetros y propiedades que permiten describir integralmente el flujo. Por ello, resulta esencial establecer una relación entre los coeficientes simplificados empleados en la hidráulica y los fenómenos hidrodinámicos detallados por la teoría de la turbulencia, con el objetivo de vincular los análisis a gran escala propios de la hidráulica con los fenómenos microscópicos característicos del régimen turbulento. (Medina et al., s. f.).

2.2.1.5.2. Fricción hidráulica

El término "fricción" se puede referir a la resistencia experimentada por un fluido mientras se mueve a través de un canal. Esta resistencia es causada por la interacción del fluido con las paredes del canal y puede afectar la velocidad, la presión y la distribución del flujo en canales. Varios factores pueden afectar la fricción en canales, como la rugosidad de las paredes, las propiedades del fluido y la geometría del canal. La fricción también puede ser un factor importante en el diseño y la operación eficiente de diversos sistemas hidráulicos, como canales de riego, sistemas de alcantarillado y acueductos (López de Mesa et al., 2023).

2.2.1.5.3. Rugosidad hidráulica

La rugosidad hidráulica es una propiedad del canal que representa el efecto de las irregularidades presentes en el fondo y las paredes sobre el movimiento del flujo. Estas irregularidades generan perturbaciones en la capa límite del agua, incrementando la fricción y, en consecuencia, las pérdidas de energía a lo largo del canal. En canales abiertos, la rugosidad depende tanto de las características físicas del material del lecho como tamaño, forma y distribución de los granos como de factores adicionales, entre ellos la vegetación, las juntas, las irregularidades constructivas y el deterioro superficial. (Chow, 1994) señala que la rugosidad

hidráulica es uno de los principales factores que controlan la resistencia al flujo, influyendo directamente en la velocidad, el tirante y la capacidad de disipación de energía del escurrimiento.

2.2.1.6. Régimen del flujo

2.2.1.6.1. Número de Reynolds (*Re*)

El número de Reynolds viene a ser un número adimensional que se usa para caracterizar el flujo de un fluido. El número de Reynolds viene a ser la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que están presentes en un fluido. Este número se utiliza para determinar el régimen de flujo, ya sea laminar o turbulento, de un fluido que fluye en un conducto. El número de Reynolds es importante para el diseño y la evaluación de sistemas de tuberías e instalaciones hidráulicas, ya que influye en la resistencia al flujo y en la transferencia de calor (Ortiz Sánchez et al., 1972).

Formalmente, el número de Reynolds se puede expresar como:

$$R_e = \frac{\rho * V * L}{\mu} \quad (1)$$

Donde:

- ρ : Densidad del fluido
- V : Velocidad del fluido
- L : Longitud característica del flujo
- μ : Viscosidad dinámica del fluido

Flujo laminar

El flujo laminar se presenta cuando el movimiento del agua es ordenado y sin mezclas apreciables entre capas. En canales abiertos ocurre cuando el número de Reynolds es menor que 2000 ($Re < 2000$).

Flujo transicional

El flujo transicional corresponde a un estado intermedio en el que comienzan a aparecer perturbaciones e inestabilidades en el flujo. Se presenta cuando el número de Reynolds se encuentra aproximadamente entre 2000 y 4000 ($2000 < Re < 4000$).

Flujo turbulento

El flujo turbulento se caracteriza por un movimiento irregular y caótico del fluido, con fluctuaciones continuas de velocidad. En canales abiertos es el régimen más común y ocurre cuando el número de Reynolds es mayor que 4000 ($Re > 4000$).

2.2.1.6.2. Número de Froude (Fr)

El número de Froude es un parámetro adimensional que se utiliza en hidráulica para caracterizar el tipo de flujo de un líquido por un canal o conducto, en función de la relación entre la velocidad del fluido, la profundidad y la gravedad. El número de Froude se utiliza para determinar, entre otras cosas, si una sección de un canal va a presentar un salto hidráulico y cuál será su altura (Pardo, s. f.).

Formalmente, el número de Froude se puede expresar como:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g * L}} \quad (2)$$

Donde:

- V: Velocidad del fluido
- g: Aceleración debido a la gravedad
- L: Longitud característica del flujo

Régimen subcrítico

Flujo lento, más profunda, dominado por la gravedad. $Fr < 1$

Régimen crítico

Punto de cambio entre flujo lento y rápido. $Fr = 1$

Régimen supercrítico

Flujo rápido, poco profunda, dominado por la inercia $Fr > 1$

2.2.1.7. Principios fundamentales de la hidráulica***2.2.1.7.1. Conservación de la masa***

La ecuación de conservación de la masa, también conocida como la ecuación de continuidad, establece que la masa que entra en un volumen de control debe ser igual a la masa que sale de dicho volumen, más cualquier acumulación de masa dentro del mismo (Domingo, 2011).

En un contexto de fluidos, se expresa generalmente como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3)$$

Donde:

ρ : densidad del fluido [kg/m^3]

\mathbf{v} : vector velocidad del fluido [m/s]

Esta forma es válida tanto para fluidos compresibles como incompresibles. Esta ecuación refleja el principio de conservación de la masa en cualquier flujo continuo.

Para fluidos incompresibles, la ecuación se simplifica como:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (4)$$

Esto implica que la divergencia de la velocidad es cero y que la masa se conserva en un sistema cerrado.

2.2.1.7.2. Conservación de la cantidad de movimiento

Según (Sotelo Ávila, 2002), la aplicación de la segunda ley de Newton a un volumen de control en el flujo de fluidos establece que la suma vectorial de las fuerzas externas que actúan sobre la masa líquida es igual a la variación de la cantidad de movimiento por unidad de tiempo que atraviesa la superficie de control; el autor enfatiza que, debido a la distribución no uniforme de velocidades en una sección real, es indispensable introducir el coeficiente de Boussinesq para corregir el flujo de cantidad de movimiento calculado con la velocidad media.

$$\sum F = \rho * Q * (\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) \quad (5)$$

Donde:

- $\sum F$: Suma vectorial de todas las fuerzas externas (presión, gravedad, reacción de paredes) que actúan sobre el volumen
- ρ : Densidad
- Q : Caudal
- V_1, V_2 : Vectores de velocidad media en las secciones de entrada y salida
- β : Coeficiente de Boussinesq

2.2.1.7.3. *Conservación de la energía*

El principio de Bernoulli establece que, en un flujo de fluido ideal, incompresible, sin fricción y en régimen estacionario, la suma de la energía de presión, la energía cinética y la energía potencial por unidad de peso permanece constante a lo largo de una misma línea de corriente (Sotelo Ávila, 2002). Esto permite analizar velocidades, tirantes y pérdidas de energía en canales y estructuras hidráulicas. La ecuación se puede escribir como:

$$y_1 + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_f \quad (6)$$

Donde:

- z : Cota del fondo del canal
- y : Profundidad del flujo (altura del agua sobre el lecho)
- $\frac{V^2}{2g}$: Carga de velocidad
- h_f : Pérdidas de energía por fricción o turbulencia

2.2.1.8. *Energía en flujos hidráulicos*

2.2.1.8.1. *Energía cinética*

La energía cinética es una forma de energía que está asociada principalmente con el movimiento de un objeto. En la mecánica de fluidos, la energía cinética se refiere a la energía que un fluido posee debido a su movimiento en un campo de referencia inercial (Ortiz Sánchez et al., 1972).

Formalmente, la energía cinética se puede expresar como:

$$E_k = \frac{v^2}{2 * g} \quad (7)$$

Donde:

- E_k : Energía cinética del fluido
- g : Gravedad
- v : Velocidad del fluido

2.2.1.8.1. Energía potencial

La energía potencial es la energía que posee un cuerpo debido a su posición en un campo de fuerzas, especialmente en un campo gravitatorio. Esta energía representa la capacidad que tiene un cuerpo de realizar trabajo debido a su altura respecto a un nivel de referencia (Ortiz Sánchez et al., 1972).

Matemáticamente, la energía potencial gravitatoria se expresa como:

$$E_p = m * g * h \quad (8)$$

Donde:

- E_p : Energía potencial del fluido
- g : Gravedad
- h : Altura respecto al nivel de referencia

2.2.1.8.2. Energía total del flujo

La energía total del flujo en un canal abierto se define como la suma de todas las formas de energía por unidad de peso que posee el agua en un punto determinado del canal, y representa

la capacidad del flujo para realizar trabajo hidráulico. Esta energía incluye principalmente tres componentes:

$$E = y + \frac{V^2}{2g} + z \quad (9)$$

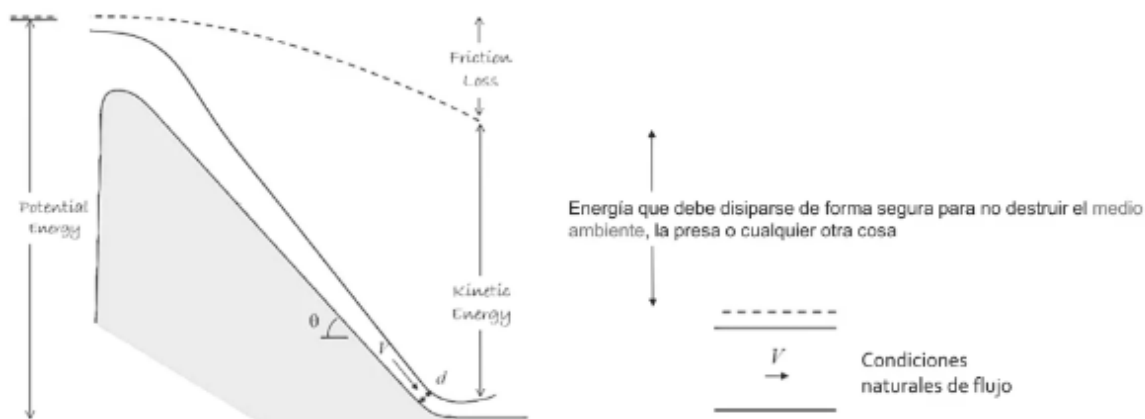
2.2.1.9. Disipación de energía

2.2.1.9.1. Disipación de energía en estructuras hidráulicas

Para el autor, las estructuras hidráulicas tienen como finalidad disipar el exceso de energía cinética presente en el flujo, ya que este exceso puede generar elevadas presiones, inducir saltos hidráulicos y provocar impactos directos del agua sobre las superficies expuestas, lo cual incrementa el riesgo de erosión aguas abajo. Para mitigar estos efectos, se emplean estructuras como los canales los vertederos de caída libre y los pozos de amortiguación, especialmente en zonas de alta pendiente. La eficacia de estos se mide mediante una relación adimensional entre la energía específica del flujo antes y después de atravesar la estructura. (Ayala et al., 2020).

Figura 10

Disipadores de Energía



Nota. Elaborado por Ing. Jorge Atau Cama

2.2.1.9.2. *Mecanismos de disipación*

La disipación de energía en estructuras hidráulicas es un proceso fundamental para la gestión eficiente del flujo de agua y la protección de las infraestructuras. Los mecanismos de disipación de energía pueden clasificarse principalmente en tres categorías: fricción, turbulencia y obstáculos.

Diversos autores destacan que entre las estructuras más comunes empleadas para disipar energía en sistemas hidráulicos se encuentran los canales escalonados, aquellos que incorporan pantallas deflectoras, los vertederos con caída libre y los pozos de amortiguación, especialmente en tramos de canales con gran pendiente. Por otro lado, los resaltos hidráulicos también cumplen un papel importante como mecanismos disipadores, debido a su capacidad para transformar el flujo rápido y delgado (supercrítico) en uno más lento y profundo (subcrítico), lo cual genera turbulencia intensa y un aumento notable en la profundidad del flujo aguas abajo. En el caso de los disipadores de caída libre, la pérdida de energía se produce por el impacto entre el chorro descendente y el cuerpo de agua que lo recibe, además del resalto hidráulico que se genera a partir de esa colisión (Ayala Rojas et al., 2020).

2.2.1.10. Técnicas de evaluación y análisis experimental

2.2.1.10.1. *Levantamiento topográfico mediante LiDAR*

Un levantamiento topográfico es un proceso utilizado para medir y representar gráficamente las características de un terreno. Este proceso es fundamental en la planificación y construcción de infraestructuras, ya que proporciona información esencial para tomar decisiones y garantizar la estabilidad y seguridad de las estructuras (Ospina & Jhoanna, 2021).

Para el autor, un levantamiento topográfico es la obtención de información geográfica que nos servirá para la creación de nubes densas de puntos, así como también los sistemas de información geográfica, los modelos digitales de terreno, los modelos digitales de elevación, modelamientos tridimensionales, entre otros, por medio de ortofotos obtenidas por un Dron (PINZÓN MONROY, 2019).

2.2.1.10.2. Velocimetría de imágenes de partículas de superficie (LSPIV)

LSPIV significa "Velocimetría de imágenes de partículas de superficie". Es un método óptico que se utiliza para medir las velocidades de fluidos utilizando una fuente de luz láser y un sistema de imágenes. Básicamente, LSPIV implica tomar imágenes de partículas en un flujo, correlacionar estas imágenes utilizando un software de análisis de imagen y, a partir de esto, determinar la velocidad del flujo en cualquier punto del campo de visión. Es especialmente útil para flujos de fluidos donde se desea medir la velocidad en superficies líquidas (Fajardo Calderón, 2010).

2.2.1.10.3. Medición de caudales mediante vertederos

La medición de caudales mediante vertederos consiste en utilizar una estructura de geometría conocida que obliga al agua a pasar por encima de una cresta, elevando la lámina de agua proporcional al caudal. Midiendo esta altura se puede determinar el caudal mediante ecuaciones que consideran la forma del vertedero y un coeficiente de descarga (Sotelo Ávila, 2002). Este método es sencillo, confiable y ampliamente usado en canales de riego y obras hidráulicas.

2.2.1.11. Modelamiento hidrodinámico computacional (CFD)

2.2.1.11.1. Fundamentos del modelamiento hidrodinámico computacional (CFD)

El modelamiento hidrodinámico computacional de fluidos es un método utilizado para simular el comportamiento de los fluidos mediante la resolución numérica de ecuaciones matemáticas. La idea básica consiste en dividir el dominio del fluido en pequeños elementos o celdas y aplicar ecuaciones que describen la dinámica y la transferencia del calor y masa dentro de cada celda. Estas ecuaciones se resuelven iterativamente en el tiempo para producir una simulación del comportamiento del fluido en un dominio tridimensional. El modelamiento 3D de fluidos es una valiosa herramienta para el diseño y la optimización de sistemas de ingeniería en los que los fluidos juegan un papel importante, como el diseño de motores de combustión, turbinas, sistemas de ventilación, entre otros (Fajardo Calderón, 2010).

2.2.1.11.2. Introducción al modelamiento hidrodinámico computacional (CFD)

El autor parte del enfoque en la disciplina de la dinámica de fluidos computacional (CFD) y presenta los conceptos esenciales para entender la naturaleza de la simulación de fluidos, incluyendo definiciones y una breve historia de la disciplina. La introducción de este tema permite representar y analizar de manera precisa el comportamiento del flujo de agua en estructuras hidráulicas y canales es apropiada para aquellos que no tienen conocimientos previos en CFD y en el modelamiento y simulación de fluidos en 3D. El autor también establece que a diferencia de los modelos unidimensionales o bidimensionales, el modelamiento 3D reproduce la variación vertical y transversal del flujo. En general, la introducción es una herramienta útil para que el lector se introduzca de manera sistemática y sencilla en el mundo del modelamiento y simulación de fluidos en 3D (Anderson, 1995).

2.2.1.11.3. Aplicaciones del modelamiento hidrodinámico computacional (CFD)

Se presentan múltiples aplicaciones de modelamiento mediante simulaciones de fluidos, incluyendo análisis de velocidad, dinámica de fluidos, propagación de ondas de calor, transferencia de momento, dinámica de gases y sistemas térmicos diversos. Se incluyen ejemplos concretos de aplicación, como la circulación alrededor de un cuerpo, la convección natural y forzada, la determinación de la carga aerodinámica, la simulación de calentamiento por conducción y la evaluación de los efectos del transporte de masa. Estas aplicaciones proporcionan una buena introducción al modelamiento y simulación en 3D para ingenieros y otros profesionales que se desempeñen en la industria. No obstante, es importante resaltar que el objetivo principal del libro es enseñar al lector los conceptos esenciales para el modelamiento de fluidos, y no simplemente mostrar cómo utilizar herramientas específicas para la simulación en 3D de flujos (Anderson, 1995).

2.2.1.11.4. Software de modelamiento hidrodinámico computacional (CFD)

FLOW-3D

FLOW-3D es un software de simulación hidrodinámica tridimensional (CFD, por sus siglas en inglés: *Computational Fluid Dynamics*) desarrollado por la empresa Flow Science Inc., orientado al modelado de flujos libres de superficie y fenómenos complejos relacionados con el movimiento de fluidos. Este programa ha sido ampliamente utilizado en disciplinas como la ingeniería hidráulica, la ingeniería ambiental, la industria energética y la investigación científica, debido a su capacidad para representar con alta precisión procesos altamente no lineales, tales como flujos con interfase libre, turbulencia, interacción fluido-estructura, transferencia de calor, sedimentación, entre otros (Flow Science Inc., 2023).

FLOW-3D basa su funcionamiento en la resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos viscosos e incompresibles, adaptadas para representar adecuadamente el comportamiento de fluidos en dominios tridimensionales. El programa utiliza un método de malla estructurada tipo *Cartesian grid*, con un enfoque de volumen fraccional (FAVOR™, *Fractional Area/Volume Obstacle Representation*) que permite una adecuada representación de geometrías complejas dentro del dominio computacional sin la necesidad de generar mallas directamente las superficies internas del fluido (Hirt & Sicilian, 1985). Asimismo, cuenta con técnicas avanzadas para la localización de la interfaz libre, como el método VOF (*Volume of Fluid*), lo que lo convierte en una herramienta idónea para el análisis de canales, vertederos, disipadores de energía, y estructuras hidráulicas en general.

Entre sus características más relevantes se encuentran:

- Modelado preciso de flujos con superficie libre, incluyendo ondas, caídas hidráulicas y flujos supercríticos.
- Inclusión de modelos de turbulencia avanzados como k- ϵ , k- ω , LES y RNG (este último utilizado en la presente investigación) (Flow Science Inc., 2023b).
- Capacidades para acoplar el flujo con procesos físicos adicionales, tales como sedimentación, transporte de partículas, cavitación, transferencia de calor, y análisis de presas o estructuras hidráulicas complejas.
- Interfaz gráfica intuitiva y herramientas de visualización integradas (FLOW-3D POST) que permiten el análisis y la interpretación eficiente de los resultados (Flow Science Inc., 2023).

FLOW-3D ha demostrado ser una herramienta confiable para el estudio de flujos en condiciones reales y experimentales, siendo validado en numerosas investigaciones y publicaciones técnicas. Su aplicación en el presente estudio permitió simular el comportamiento hidrodinámico de las estructuras hidráulicas incas del complejo arqueológico de Tipón, en Cusco, con el fin de evaluar su eficiencia en la disipación de energía cinética.

2.2.1.11.5. Métodos numéricos del modelamiento hidrodinámico computacional (CDF)

Método de volúmenes finitos.

El método de volúmenes finitos (FVM, por sus siglas en inglés) constituye una técnica fundamental en la simulación numérica de la dinámica de fluidos, al permitir resolver las ecuaciones de conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía mediante su integración sobre volúmenes finitos o celdas del dominio computacional, este método se basa en la aplicación directa de los principios físicos de conservación dentro de un volumen de control, lo que garantiza un comportamiento físico coherente del sistema modelado (Versteeg & Malalasekera, 2007).

El procedimiento general del método de volúmenes finitos involucra los siguientes pasos:

División del dominio: El dominio físico se discretiza en un conjunto de volúmenes de control no superpuestos. En FLOW-3D, esta división se realiza mediante una malla cartesiana estructurada.

Mallas estructuradas cartesianas

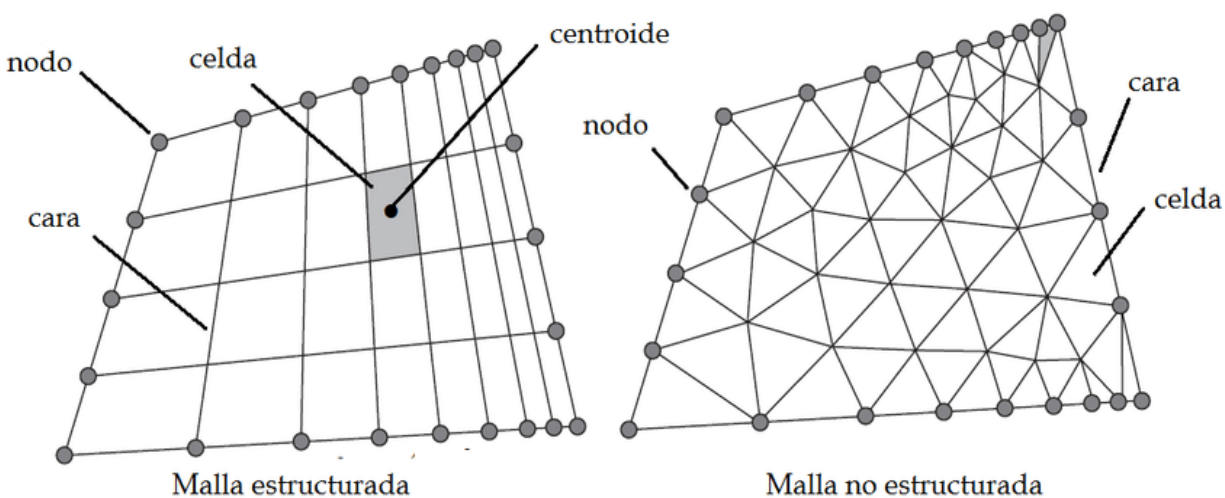
Mallas estructuradas cartesianas en FLOW-3D, el dominio computacional se representa mediante mallas estructuradas cartesianas ortogonales, es decir, una grilla regular conformada por

celdas rectangulares o cúbicas alineadas con los ejes coordenados x , y y z . Este tipo de malla se emplea con frecuencia en simulaciones de dinámica de fluidos debido a su estructura simple, su eficiencia en el procesamiento computacional y la facilidad con la que se integran los métodos numéricos en ella (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Una de las principales ventajas de las mallas estructuradas es que el número de nodos en cada dirección, así como su orden, se mantienen constantes y bien definidos. Esto permite organizar los datos del flujo (como velocidad, presión y energía) en arreglos ordenados, lo cual optimiza el almacenamiento y el cálculo durante la simulación. Además, al tratarse de una malla ortogonal, las líneas que conforman la grilla son perpendiculares entre sí, lo que simplifica el cálculo de derivadas espaciales y facilita la evaluación de los flujos entre celdas adyacentes con mayor precisión (Ferziger & Peric, 2002).

Figura 11

Representación de malla 3D



Nota. Estudio de la estabilidad de una película líquida descendente con gases concurrentes dentro de un conducto circular. Borraz L.

Integración de las ecuaciones: Las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el flujo se integran sobre cada volumen de control, transformándolas en ecuaciones integrales.

Aplicación del teorema de la divergencia: También conocido como la regla de Gauss, este teorema convierte las integrales de volumen en integrales de superficie, permitiendo evaluar los flujos netos a través de las caras de cada volumen.

Discretización espacial: Las variables del flujo (como velocidad, presión y energía) se aproximan en puntos específicos del volumen, generalmente en los centros de celda. Se utilizan esquemas de interpolación y diferenciación numérica para evaluar los términos convectivos y difusivos.

Figura 12

Volumen de control



Nota. Modelización CFD para determinar el comportamiento del fluido en tuberías de PVC.

Una de las principales ventajas del método de volúmenes finitos es que asegura la conservación local y global de las propiedades físicas, lo cual es especialmente importante en simulaciones donde se evalúan balances energéticos o pérdida de carga. Además, es aplicable tanto a flujos estacionarios como no estacionarios, compresibles o incompresibles, y se adapta eficazmente a geometrías complejas y condiciones de contorno variadas.

2.2.1.11.6. Algoritmos y técnicas computacionales

Método SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)

Una vez que las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía han sido discretizadas mediante el método de volúmenes finitos, se genera un sistema de ecuaciones algebraicas que debe resolverse numéricamente. En este proceso, FLOW-3D emplea algoritmos iterativos especialmente diseñados para lograr que las variables de flujo —como la presión y la velocidad— se acoplen de manera precisa y estable. Uno de los métodos más utilizados para este fin es el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) (Ferziger & Peric, 2002).

El algoritmo SIMPLE, desarrollado por Patankar y Spalding (1972), se ha convertido en una herramienta clave en simulaciones de flujos incompresibles. Esto se debe a que, en estos casos, la presión no tiene una ecuación propia explícita, por lo que es necesario encontrar una forma de vincularla con las velocidades del flujo. SIMPLE permite realizar este acoplamiento a través de un procedimiento iterativo en el que, partiendo de un campo de presión inicial estimado, se corrigen tanto las velocidades como la presión hasta cumplir con la ecuación de continuidad y lograr la convergencia del sistema (Patankar, 1980).

Este proceso, en líneas generales, consiste en:

- Proponer un campo de presión inicial.
- Calcular una velocidad provisional a partir de las ecuaciones de cantidad de movimiento.
- Ajustar la presión con base en una ecuación auxiliar derivada de la continuidad.
- Corregir las velocidades con la nueva presión.

- Repetir el ciclo hasta que las correcciones sean mínimas.

En FLOW-3D, el algoritmo SIMPLE se complementa con métodos iterativos Gauss-Seidel, se presentan como una extensión del método de Jacobi, donde las nuevas soluciones calculadas se actualizan inmediatamente y se utilizan en los siguientes pasos de la iteración. Es un método simple y eficiente para sistemas bien condicionados y mallas estructuradas. Y el método Successive Over-Relaxation (SOR) lo describe como una mejora del método de Gauss-Seidel, en la que se introduce un factor de relajación (ω) para acelerar la convergencia. Este método es especialmente útil en mallas estructuradas y se puede ajustar para mejorar la velocidad de convergencia del sistema, ambos métodos son eficaces para resolver los sistemas lineales provenientes de la discretización de las ecuaciones de conservación en mallas estructuradas, estos métodos permiten aprovechar la estructura del dominio computacional y mejorar el rendimiento numérico del proceso iterativo, especialmente cuando se combinan con esquemas de aceleración como los métodos multigrid (Blazek, 2015).

Método FAVORTM (Fractional Area/Volume Obstacle Representation)

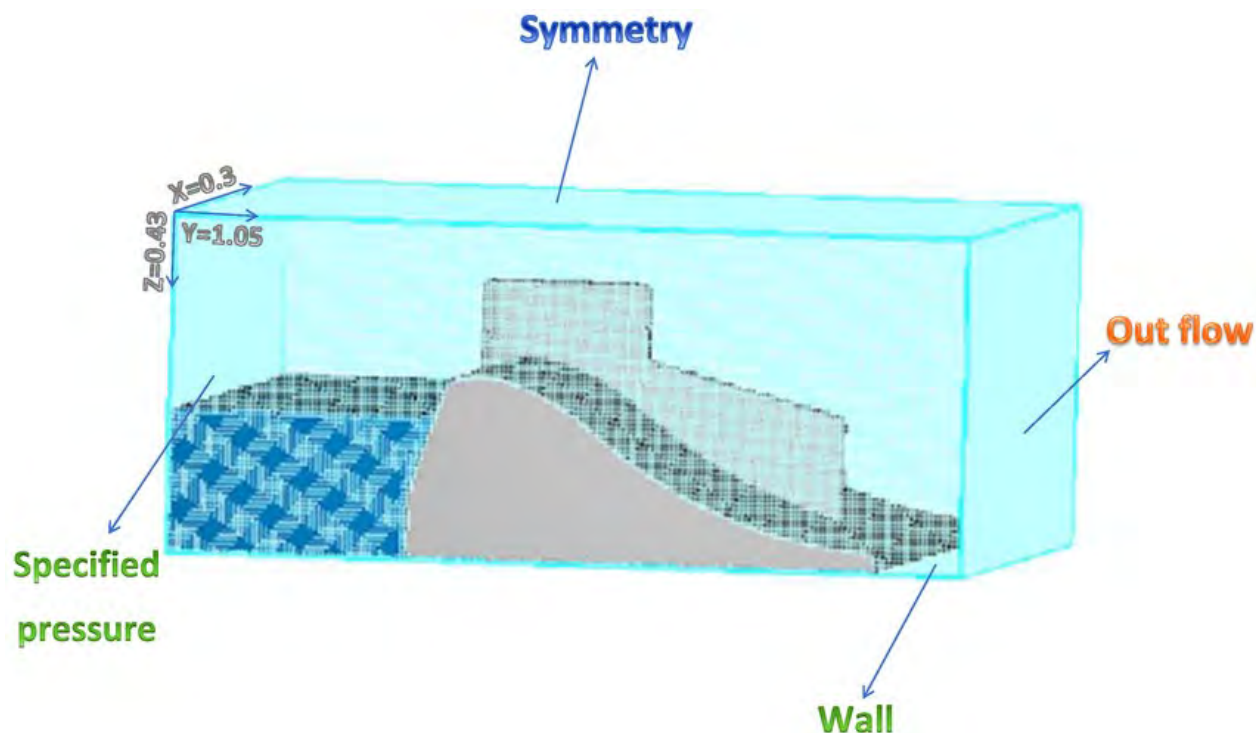
Una de las ventajas más importantes de FLOW-3D frente a otros softwares de dinámica de fluidos computacional es su capacidad para representar geometrías sólidas complejas dentro de una malla estructurada sin necesidad de realizar un mallado no estructurado ni deformar el dominio. Esto se logra gracias al uso del método FAVORTM (Fractional Area/Volume Obstacle Representation), desarrollado específicamente para mejorar la precisión geométrica en mallas cartesianas ortogonales (Hirt & Sicilian, 1985).

El método FAVORTM consiste en asignar a cada celda del dominio dos fracciones: una que representa el volumen de celda ocupado por un sólido (V_f) y otra que representa el área efectiva

de sus caras por donde puede fluir el fluido (A_f). Estas fracciones permiten modificar las ecuaciones de conservación de manera que el fluido interactúe correctamente con los obstáculos internos, incluso cuando estos no coinciden con los límites exactos de las celdas (Mccarthy & Taylor, 1985).

Figura 13

Condiciones de límite



Nota. Mozaffari, Sevda & Amini, Erfan & Mehdipour, Hossein & Neshat, Mehdi. (2022). Flow Discharge Prediction Study Using a CFD-Based Numerical Model and Gene Expression Programming. Water.

Desde un punto de vista numérico, esta técnica mejora la fidelidad de la simulación sin necesidad de utilizar mallas complicadas ni aumentar la resolución del dominio. Además, el uso de FAVOR™ permite conservar las propiedades de las mallas estructuradas, como la eficiencia computacional y la facilidad de implementación de los esquemas de volúmenes finitos.

2.2.1.11.7. Modelos de turbulencia en el modelamiento hidrodinámico computacional

(CFD)

Modelo $k-\varepsilon$

El modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ es uno de los modelos más utilizados en mecánica de fluidos computacional para representar flujos turbulentos completamente desarrollados. Este modelo se basa en la resolución de dos ecuaciones de transporte adicionales: una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la tasa de disipación de dicha energía (ε), permitiendo estimar la viscosidad turbulenta del flujo. Según Launder y Spalding (1974), el modelo $k-\varepsilon$ ofrece buenos resultados en flujos con alta turbulencia y geometrías simples, siendo ampliamente aplicado en canales abiertos, tuberías y estudios hidráulicos generales, aunque presenta limitaciones cerca de paredes y en flujos con separación fuerte.

Modelo RNG $k-\varepsilon$

El modelo RNG $k-\varepsilon$ (Renormalization Group) es una modificación del modelo $k-\varepsilon$ estándar que incorpora fundamentos estadísticos derivados del grupo de renormalización, lo que mejora la representación de la turbulencia en flujos con altos gradientes de velocidad. De acuerdo con Yakhot y Orszag (1986), este modelo introduce un término adicional en la ecuación de disipación ε , permitiendo una mejor predicción de flujos con recirculaciones, curvaturas pronunciadas y regímenes transitorios. Por esta razón, el modelo RNG $k-\varepsilon$ es más preciso que el modelo estándar en flujos hidráulicos complejos, como disipadores de energía y estructuras con cambios bruscos de geometría.

Modelo $k-\omega$

El modelo de turbulencia $k-\omega$ se fundamenta en la resolución de dos ecuaciones de transporte: una para la energía cinética turbulenta (k) y otra para la frecuencia específica de disipación (ω),

lo que permite una descripción más detallada del comportamiento del flujo cerca de las paredes. Según Wilcox (2006), este modelo presenta una mayor precisión en regiones próximas a superficies sólidas y en flujos con separación, siendo especialmente adecuado para el análisis de estructuras hidráulicas donde la interacción fluido–pared es significativa. No obstante, el modelo $k-\omega$ es más sensible a las condiciones de frontera en la región de entrada del flujo.

Aplicación de los modelos de turbulencia en CFD (FLOW-3D)

En FLOW-3D, el modelado de la turbulencia se realiza mediante modelos matemáticos que aproximan el efecto promedio en las fluctuaciones turbulentas en el flujo principal, esta sin la necesidad de resolver todas las escalas microscópicas del movimiento. Estos modelos permiten cerrar las ecuaciones de Navier-Stokes mediante hipótesis adicionales, lo que hace posible su resolución computacional dentro de tiempos razonables (Versteeg & Malalasekera, 2007).

En la dinámica de fluidos computacional (CFD), uno de los principales desafíos es representar el comportamiento turbulento del flujo sin la necesidad de resolver directamente todas las escalas de movimiento, lo cual sería computacionalmente muy costoso. Por ello, se utilizan modelos de turbulencia. En FLOW-3D, se dispone de varios modelos basados en la formulación RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) y otros, cada uno con características particulares que los hacen más adecuados según el tipo de problema hidráulico (Pope, 2000).

Las ecuaciones de Navier–Stokes constituyen la base para describir el comportamiento de fluidos incompresibles, como el agua, en condiciones de flujo con superficie libre. En esta investigación, su aplicación es pertinente debido a que las estructuras hidráulicas analizadas operan principalmente en regímenes subcríticos y turbulentos, los cuales pueden ser representados adecuadamente mediante modelamiento numérico en el software FLOW-3D, garantizando coherencia física entre el modelo y el fenómeno real.

Tabla 1*Descripción de modelos más comunes en FLOW-3D*

Modelo de turbulencia	Tipo	Aplicaciones recomendadas	Observaciones clave
Eddy Viscosity	Empírico	Flujos sencillos, baja turbulencia, pruebas preliminares	No resuelve la estructura turbulenta; útil solo en flujos con régimen casi laminar.
k-ϵ estándar	RANS (2 eq.)	Flujos plenamente turbulentos, disipación de energía, vertederos	Amplia aplicación, pero limitado en zonas con gradientes de presión altos.
RNG k-ϵ	RANS (2 eq.)	Flujos con separación, recirculación, cavitación, superficies libres	Mejora del k- ϵ estándar; más preciso en flujos con curvaturas o vórtices.
k-ω	RANS (2 eq.)	Cercanías a paredes, flujos internos, condiciones de borde ajustadas	Mejor resolución en capas límite; sensible a condiciones de entrada.
Shear Stress Transport (SST)	Híbrido (k- ϵ / k- ω)	Transiciones de flujo, estructuras hidráulicas complejas	Combina lo mejor de k- ϵ y k- ω ; robusto para geometrías con separación de flujo.
Large Eddy Simulation (LES)	Resolución directa parcial	Estudios detallados, investigación, geometría conocida con alta resolución	Alta precisión, pero requiere mucho poder computacional y malla fina.
Zero-equation model	Empírico	Flujos muy simples, rápidos, o donde no se dispone de datos completos	No resuelve ecuaciones adicionales; limitado a condiciones idealizadas.

Nota. Flow Science Inc

El modelo RNG k- ϵ es un enfoque de modelado de turbulencia que deriva de las teorías de renormalización. Este modelo se basa en la descomposición del campo de velocidad en partes medias y fluctuantes, asumiendo que las estadísticas de turbulencia son homogéneas cuando las tensiones medias no son demasiado grandes. El modelo se utiliza comúnmente para calcular flujos en capas delgadas y es similar al modelo de viscosidad anisotrópica. Los resultados computacionales del modelo se comparan favorablemente con los datos experimentales, mostrando una buena predicción (Yakhot et al., 1991).

El modelo RNG k- ϵ (Renormalization Group k- ϵ) es una mejora del modelo k- ϵ estándar y presenta ventajas:

Tabla 2

Ventajas del modelo RNG k- ϵ

Característica del flujo	Respuesta del modelo RNG k-ϵ
Geometrías irregulares (canales incas, zigzag, abruptas)	Captura mejor la curvatura y los efectos tridimensionales.
Presencia de disipadores de energía y cambios de régimen	Maneja bien zonas de alta disipación y transición de flujo.
Superficies libres, vertederos y cambios de velocidad bruscos	Mayor precisión en zonas con recirculaciones o separación.
Necesidad de un balance entre precisión y costo computacional	Menos exigente que LES y más preciso que k- ϵ estándar.

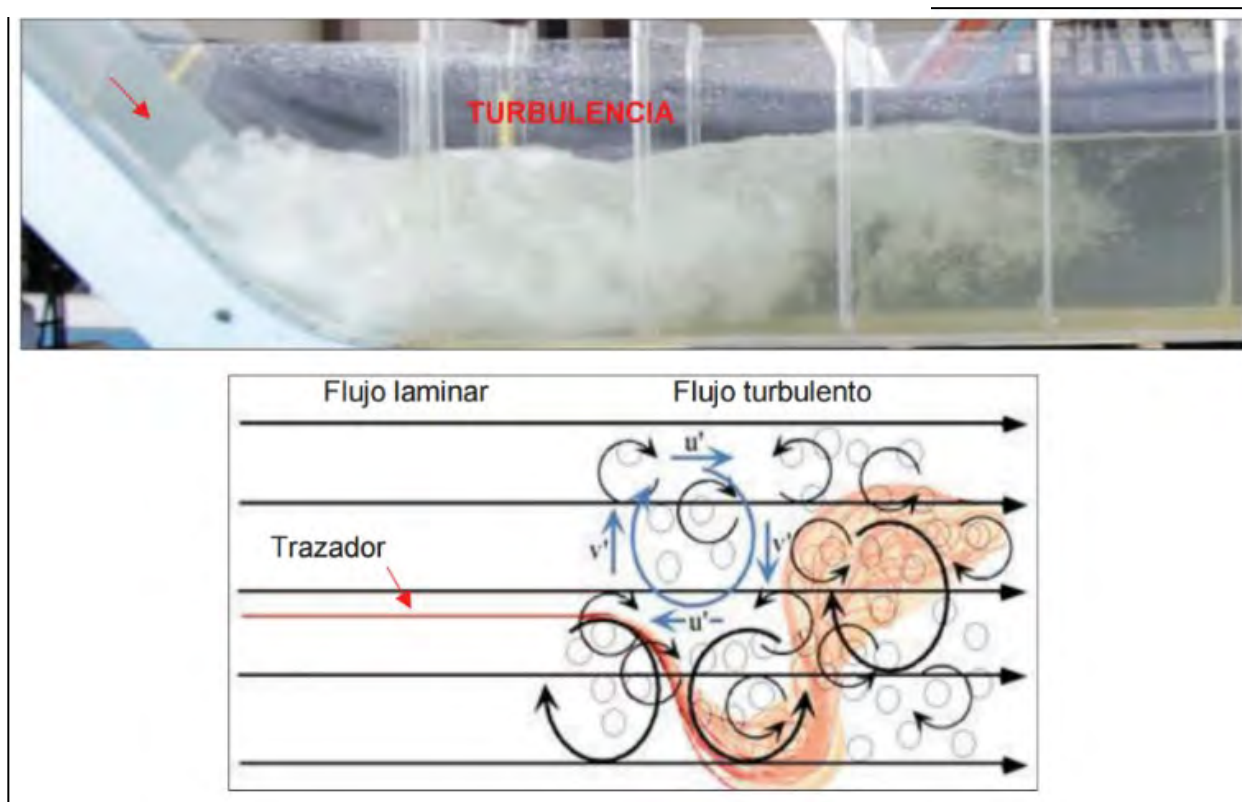
Nota. Flow Science Inc

Importancia del modelado de la turbulencia en flujos hidráulicos

La importancia del modelado de la turbulencia en flujos hidráulicos radica en que permite a los ingenieros y científicos comprender y predecir el comportamiento de los fluidos en diversas aplicaciones. El texto menciona que la turbulencia es un fenómeno común y que su modelado sistemático es fundamental para obtener ecuaciones constitutivas adecuadas para el cálculo de flujos turbulentos. Esto es crucial en situaciones prácticas donde la turbulencia puede afectar la eficiencia y la seguridad de los sistemas hidráulicos. Como se indica en la introducción del libro, el modelado de la turbulencia puede transformarse en un emocionante y desafiante proyecto de investigación, y proporciona las herramientas necesarias para modificar o desarrollar nuevos modelos que se adapten a necesidades específicas (Wilcox, 2010).

Figura 14

Tipos de Turbulencia



Nota. Edwin Casas.

2.2.1.11.8. Funcionamiento matemático y resolución numérica del FLOW-3D

El software FLOW-3D resuelve el comportamiento del fluido a través de la solución numérica de las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Estas ecuaciones se presentan en forma integral dentro de cada volumen de control, siguiendo el método de los volúmenes finitos.

El programa considera las definiciones de dominio y malla

- Geometría del dominio → importada desde CAD o generada en el preprocesador.
- Condiciones iniciales (u, v, w, p, T iniciales).
- Condiciones de frontera (entrada, salida, paredes, simetría, presión, caudal).
- Malla computacional (tamaño de celda $\Delta x, \Delta y, \Delta z$).

Ecuaciones fundamentales

Ecuación de continuidad

Para un fluido compresible:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (10)$$

Para un fluido incompresible (*variación de densidad* = 0):

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (11)$$

Para un fluido incompresible, la ecuación de continuidad en forma cartesiana:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

Esta ecuación asegura la conservación de masa, evitando que el fluido se cree o desaparezca dentro del dominio.

Ecuaciones de Navier-Stokes (conservación de cantidad de movimiento)

Forma vectorial compacta:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{otros} \quad (13)$$

La ecuación general para cada componente de velocidad se expresa como:

Eje X:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \quad (14)$$

Eje Y:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \quad (15)$$

Eje Z:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \quad (16)$$

Donde:

u_i : componente de la velocidad en la dirección i

p : presión

μ : viscosidad dinámica

f_i : fuerzas externas (gravedad, presión, turbulencia)

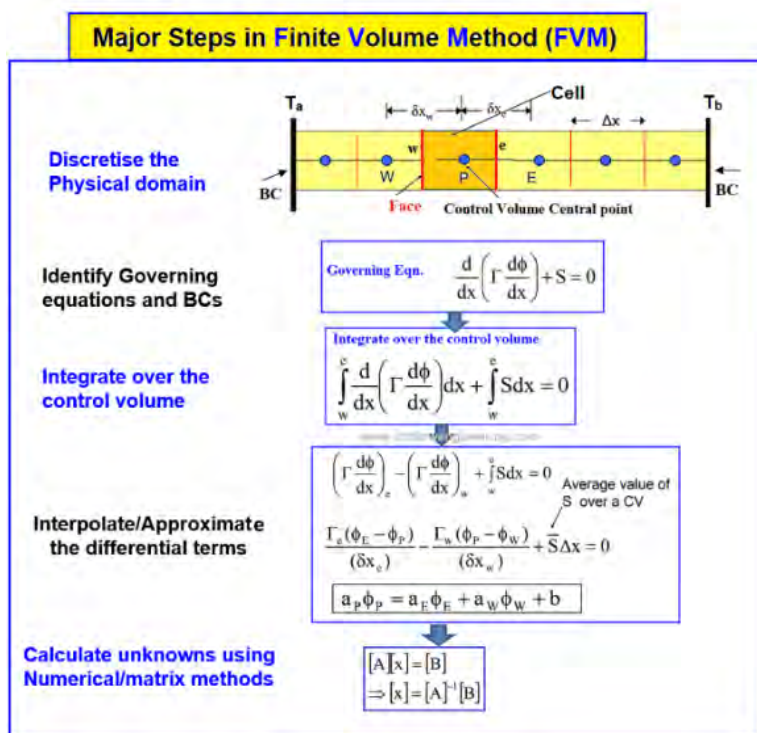
Método de resolución numérica

Las ecuaciones anteriores son resueltas mediante los siguientes métodos numéricos.

El método de volúmenes finitos (FVM): es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones diferenciales parciales que describen fenómenos físicos, como el flujo de fluidos. Su principio básico consiste en dividir el dominio de cálculo en pequeños volúmenes de control (celdas) y aplicar las leyes de conservación (masa, cantidad de movimiento y energía) a cada uno de ellos. Las ecuaciones se integran en forma discreta sobre cada volumen, transformando derivadas en flujos a través de las superficies de las celdas. Esto permite garantizar que, en la solución numérica, las cantidades conservadas se mantengan físicamente coherentes en todo el dominio, incluso para geometrías complejas y condiciones de contorno variadas.

Figura 15

Método de Volúmenes Finitos



Nota. CFD Suport

Discretización de fluidos

Discretización espacial

Se utiliza la ecuación:

$$\int_V \frac{\partial \phi}{\partial t} dV + \int_V \nabla \cdot (\mathbf{F}) dV = \int_V S dV \quad (17)$$

El parámetro ϕ representa una “*variable transportada*” que en el método de volúmenes finitos se aplica para las variables de conservación:

Donde:

V : es el volumen de control (celda del dominio),

\mathbf{F} : es el flujo total (convectivo + difusivo),

S : representa los términos fuente o sumidero.

Aplicación del teorema de la divergencia de Gauss

El segundo término se transforma mediante el teorema de Gauss, que convierte la integral de volumen en una integral de superficie sobre las caras del volumen de control:

$$\int_V \nabla \cdot (\mathbf{F}) dV = \oint_A \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} dA \quad (18)$$

Sustitución y obtención de la ecuación discreta

Al sustituir las aproximaciones anteriores en la ecuación integral general, se obtiene la forma discreta:

$$\frac{(\phi_P^{n+1} - \phi_P^n)}{\Delta t} \Delta V + \sum_f (\mathbf{F} \cdot \mathbf{n})_f A_f = S_P \Delta V \quad (19)$$

Esta expresión representa el balance local de la cantidad ϕ en la celda P , considerando la variación temporal, los flujos convectivos y difusivos entre celdas vecinas y las fuentes internas.

Ecuación algebraica final

Tras reorganizar los términos, se obtiene una ecuación algebraica lineal para cada volumen de control:

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_T \phi_T + a_B \phi_B + b_P \quad (20)$$

Donde:

a_P : es el coeficiente asociado a la celda principal,

$a_E, a_W, a_N, a_S, a_T, a_B$: son los coeficientes de las celdas adyacentes,

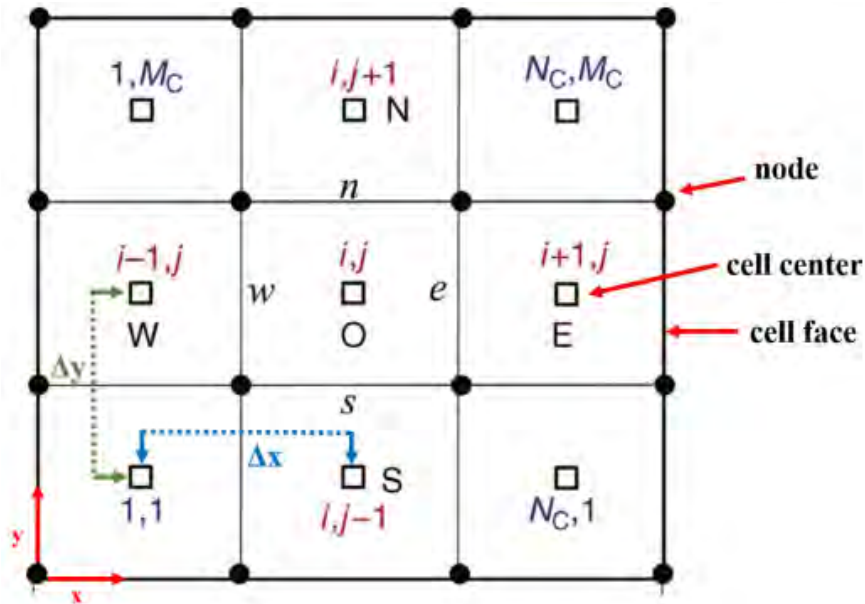
b_P : representa los términos fuente modificados.

Discretización temporal

La condición de estabilidad CFL (Courant–Friedrichs–Lewy):

$$CFL = \frac{u \Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (21)$$

Mediante el número de Courant (CFL) se controla la estabilidad numérica; valores ≤ 1 evitan que el fluido “salte” celdas en un paso.

Figura 16*Malla Ortogonal FVM**Nota. Elaboración Propia*

Para garantizar la estabilidad y precisión, se calculan usando esquemas de interpolación espacial como Upwind, QUICK o variantes de alto orden. Es necesario utilizar esquemas de interpolación pues cuando discretizamos, conocemos las variables (velocidad, presión, etc.) en los centros de las celdas, pero para resolver las ecuaciones, necesitamos saber esos valores en las caras de las celdas (los bordes entre celdas), porque por ahí fluye la masa, el momento o la energía.

Como no tenemos directamente esos valores en las caras, debemos interpolarlos a partir de los valores de las celdas vecinas.

Esquema Upwind (o a favor del flujo)

Toma el valor de la variable desde la celda situada aguas arriba respecto al flujo. Es muy estable y fácil de implementar, pero introduce difusión numérica que suaviza gradientes.

Matemáticamente para una cara entre celdas i y $i + 1$:

$$\phi_{cara} = \begin{cases} \phi_i & \text{si } u > 0 \\ \phi_{i+1} & \text{si } u < 0 \end{cases}$$

El símbolo ϕ representa la variable que estás transportando en la ecuación de advección–convección.

$$\phi_{cara} = \frac{1 + \text{sign}(u)}{2} \phi_i + \frac{1 - \text{sign}(u)}{2} \phi_{i+1} \quad (22)$$

Donde:

ϕ : Variable que estás transportando (puede ser velocidad, temperatura, concentración, etc.)

i : índice de la celda donde está la cara que se está calculando

$i + 1$: Celda aguas arriba si $u > 0$

u : Velocidad en la cara de la celda, define la dirección del flujo ($\text{sign}(u)$)

Esquema QUICK (Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinematics)

Interpola usando un polinomio cuadrático considerando dos celdas aguas arriba y unas aguas abajo. Es más preciso que Upwind, aunque puede generar oscilaciones si no se controla.

Más preciso que Upwind, pero puede generar oscilaciones si la malla o el flujo no están bien controlados.

Para $u > 0$:

$$\phi_{cara} = \frac{3\phi_i + 6\phi_{i-1} - \phi_{i-2}}{8} \quad (23)$$

Para $u < 0$:

$$\phi_{cara} = \frac{3\phi_{i+1} + 6\phi_{i+2} - \phi_{i+3}}{8} \quad (24)$$

Donde:

ϕ : Variable que estás transportando (puede ser velocidad, temperatura, etc.)

i : Índice de la celda donde está la cara que se está calculando

$i - 1, i - 2$: Celda aguas arriba si $u > 0$

$i + 1, i + 2$: Celda aguas arriba si $u < 0$

u : Velocidad en la cara de la celda, define la dirección del flujo

Esquemas de alto orden (MUSCL, WENO, TVD)

Mantienen alta precisión incluso en zonas con gradientes bruscos usando limitadores de pendiente para evitar oscilaciones no físicas. Son más costosos en cálculo, pero muy efectivos para flujos complejos.

Esquema MUSCL

Para $u > 0$:

$$\phi_{cara} = \phi_i \frac{1}{2} \psi(r_i)(\phi_i - \phi_{i+1}) \quad (25)$$

Donde:

$$\psi = \frac{\phi_{i+1} - \phi_i}{\phi_i - \phi_{i+1}} \quad (26)$$

ϕ : Variable que estás transportando (puede ser velocidad, temperatura, concentración)

ϕ_{cara} : Valor interpolado en la cara

r_i : Razón de gradientes (cómo cambia la variable entre celdas)

$\psi(r_i)$: Limitador de pendiente

$i, i + 1, i - 1$: índices de celdas

Esquema WENO

$$\phi_{cara} = \sum_{k=0}^{n-1} \omega_k \phi_{cara}^{(k)} \quad (27)$$

Donde:

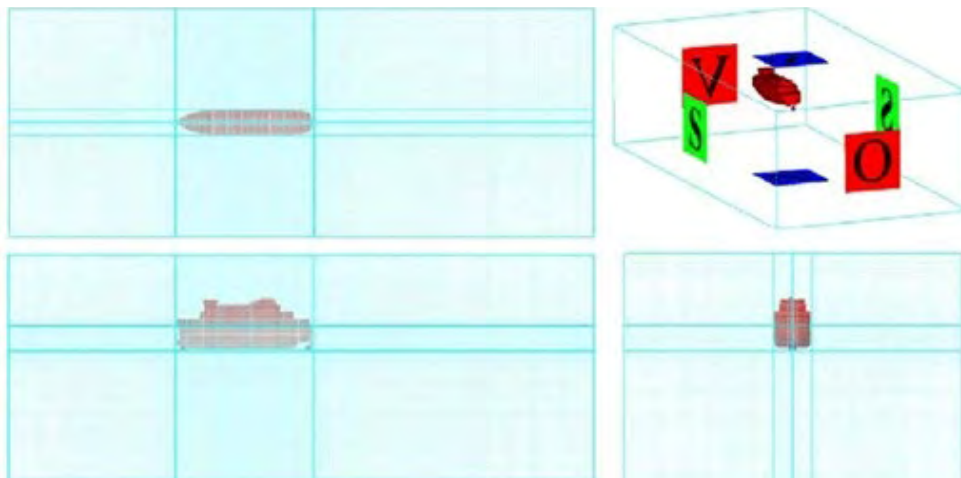
n : Número de polinomios considerados (en WENO clásico, $n=3$ para quinto orden)

$\phi_{cara}^{(k)}$: Valor estimado de la variable usando el polinomio k

ω_k : Peso adaptativo que depende de la suavidad del flujo local

Figura 17

Multimallado en Flow 3D



Nota. Elaboración Propia

Acoplamiento de velocidad con presión

En los modelos CFD como FLOW-3D, la presión y la velocidad están estrechamente ligadas por la ecuación de continuidad (que asegura conservación de masa) y la ecuación de momento (que determina cómo se mueven los fluidos).

El problema es que la presión no tiene su propia ecuación de evolución en el tiempo; hay que calcularla indirectamente para que el campo de velocidades cumpla continuidad.

Para el cálculo de la presión se resuelven las ecuaciones de momento sin incluir el gradiente de presión considerando una velocidad provisional (u^*), esto da una velocidad aproximada que aún no cumple estrictamente con la conservación de masa.

A partir de la velocidad provisional, se calcula cómo debería ajustarse la presión para que el flujo cumpla continuidad, por lo que se genera una ecuación de Poisson para la presión:

$$\nabla^2 p = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot u^* \quad (28)$$

Donde:

$\nabla^2 p$: laplaciano de la presión (distribución espacial)

ρ : densidad

Δt : paso de tiempo

$\nabla \cdot u^*$: divergencia de la velocidad provisional (mide si hay acumulación de masa)

Se ajusta la velocidad provisional restando el gradiente de presión calculado:

$$u^{n+1} = u^* - \frac{\Delta t}{\rho} \nabla p \rightarrow \text{se cumple: } \nabla \cdot u^{n+1} \approx 0 \quad (29)$$

Donde:

u^{n+1} : velocidad corregida y físicamente consistente

u^* : velocidad provisional

∇p : gradiente de presión corregido

Tabla 3

Método FAVOR y SIMPLE

Método FAVOR (Fractional Area/ Volume Ratios)	Algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)
Es el método de representación geométrica usado en FLOW-3D para introducir los sólidos y la superficie libre dentro de una malla cartesiana	Es un algoritmo de acoplamiento " presión-velocidad " introducido por Patankar & Spalding (1972), muy usado en códigos CFD como ANSYS Fluent, OpenFOAM, etc.
En vez de deformar la malla para que siga la geometría (como en un mallado no estructurado), FLOW-3D mantiene la malla ortogonal y calcula cuánto de cada celda está ocupado por fluido y cuánto por sólido.	Se utiliza para resolver las ecuaciones de Navier–Stokes en flujos incompresibles. Se predice un campo de velocidad resolviendo la ecuación de momento con un campo de presión supuesto
VF (Volume Fraction): fracción de volumen de la celda ocupada por fluido.	Para el acoplamiento presión-velocidad, FLOW-3D no usa el algoritmo SIMPLE clásico, sino un solver propio (basado en proyección y método de Poisson) optimizado para mallas cartesianas con FAVOR.
AF (Area Fraction): fracción de área abierta de una cara de la celda por donde puede pasar el flujo.	

Nota. Elaboración Propia

Modelos Físicos

FLOW-3D aplica modelos físicos adicionales que se acoplan al sistema hidrodinámico base obtenido en los pasos previos. Esto implica la incorporación de nuevas ecuaciones o términos fuente a las ecuaciones de Navier–Stokes y continuidad, lo que permite simular fenómenos como turbulencia, superficie libre, cavitación o transporte de sedimentos, incrementando el realismo de la simulación.

Modelos de turbulencia en CFD

Las ecuaciones de Navier–Stokes constituyen la base matemática exacta para describir el movimiento de los fluidos; sin embargo, en la práctica resulta inviable resolver de manera directa todas las escalas de remolinos presentes en un flujo turbulento, debido al elevado costo computacional que ello implicaría. Este procedimiento, denominado *Direct Numerical Simulation* (DNS), no es factible en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería. Por tal motivo, el software FLOW-3D emplea modelos de cierre de turbulencia (*closure models*), los cuales permiten aproximar los efectos medios que producen las estructuras turbulentas de pequeña escala sobre el flujo principal. Cuando se trabaja con el promedio de las velocidades en el tiempo, este enfoque se denomina *Reynolds Averaged Navier–Stokes* (RANS).

Se aplica el promedio de Reynolds:

$$u = \bar{u} + u' \quad (30)$$

\bar{u} : velocidad media

u' : fluctuaciones turbulentas

Al sustituir en Navier–Stokes, aparece un término nuevo:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j}$$

Este es el tensor de esfuerzos de Reynolds. Representa los efectos de la turbulencia, pero es desconocido, aquí entran los modelos de turbulencia.

Modelo RNG k-ε (Renormalization Group k-ε)

El modelo RNG k- ε es una variante mejorada del modelo estándar k- ε, desarrollada a partir de la teoría del grupo de renormalización (*Renormalization Group theory*), la cual permite derivar de manera más rigurosa las ecuaciones de transporte para la energía cinética turbulenta (k) y su tasa de disipación (ε).

Energía cinética turbulenta (k)

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \varepsilon \quad (31)$$

Donde:

k : energía cinética turbulenta.

u_j : velocidad media en la dirección j .

ν : viscosidad cinemática molecular.

ν_t : viscosidad turbulenta.

σ_k : número de Prandtl turbulento para k .

P_k : producción de energía cinética turbulenta.

ε : tasa de disipación de k .

Tasa de disipación turbulenta (ε)

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (32)$$

Donde:

ε : tasa de disipación de la energía cinética turbulenta.

σ_ε : número de Prandtl turbulento para ε .

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$: constantes empíricas.

R : término adicional de corrección derivado del método RNG, que mejora la predicción en flujos con alta curvatura o cizallamiento.

Viscosidad turbulenta efectiva (ν_t)

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \rightarrow \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (33)$$

ν_t : viscosidad turbulenta (que modela los efectos de los remolinos pequeños sobre el flujo medio)

C_μ : constante empírica ajustada con base en la teoría RNG.

Conociendo los valores se resuelve el tensor de esfuerzos de Reynolds

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (34)$$

Superficie libre (VOF, Volume of Fluid)

El método VOF (Volume of Fluid) es una técnica numérica para rastrear la superficie libre entre dos fluidos inmiscibles, típicamente agua y aire. En cada celda de la malla se define una fracción de volumen F :

$F = 1 \rightarrow$ la celda está llena de agua.

$F = 0 \rightarrow$ la celda está llena de aire.

$0 < F < 1 \rightarrow$ la celda contiene la superficie libre (mezcla agua + aire).

La evolución de la superficie libre se resuelve con la ecuación de advección:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla F = 0 \quad (35)$$

Donde:

F : fracción de volumen del fluido.

\mathbf{u} : campo de velocidades en la celda.

∇F : gradiente espacial de F .

Actualización a través del tiempo

Una vez corregidas las velocidades, presiones y demás variables de interés mediante el acoplamiento presión–velocidad y la inclusión de modelos físicos adicionales (turbulencia, VOF, etc.), el siguiente paso consiste en avanzar la solución en el tiempo. Este procedimiento garantiza que las magnitudes hidrodinámicas evolucionen conforme a la dinámica real del flujo.

De manera general, la actualización temporal de una variable escalar genérica ϕ (que puede representar velocidad, presión, fracción volumétrica, energía cinética de turbulencia, etc.) se expresa como:

$$\phi^{n+1} = \phi^n + \Delta t \cdot (T(\phi) + D(\phi) + S(\phi)) \quad (36)$$

Donde:

ϕ^n : valor de la variable en el instante actual t^n .

ϕ^{n+1} : valor de la variable en el siguiente paso de tiempo $t^{n+1} = t^n + \Delta t$.

Δt : incremento temporal, determinado por condiciones de estabilidad numérica (criterio CFL).

$T(\phi)$: términos de transporte o convección, asociados al movimiento de la variable con el flujo.

$D(\phi)$: términos de difusión, relacionados con los efectos viscosos o disipativos.

$S(\phi)$: términos de fuente, que incluyen fuerzas externas (gravedad, presión hidrostática), interacciones de turbulencia, transferencia de masa o energía, entre otros.

Este esquema de avance temporal se fundamenta en los métodos de integración explícitos e implícitos aplicados en la discretización numérica de las ecuaciones de Navier–Stokes y continuidad. El programa FLOW-3D utiliza técnicas de integración temporal estables que permiten actualizar, en cada celda del dominio, los valores corregidos de las variables principales.

Convergencia y error

La convergencia en FLOW-3D asegura que las ecuaciones discretizadas se resuelvan de manera estable y que la solución numérica represente correctamente el fenómeno físico. Para ello se aplican distintos mecanismos de control:

Iteraciones internas

Se define el residuo (R):

$$R = |LHS - RHS| \quad (37)$$

Convergencia interna cuando:

$$R < 10^{-5} \text{ o } 10^{-6}$$

Criterios de convergencia

- Reducción de residuos

Los residuos deben disminuir de manera continua hasta el umbral de tolerancia.

- Balance global de masa y energía

No deben existir pérdidas o creaciones ficticias de masa/energía.

$$\Delta m_{total} < tolerancia$$

- Estabilidad numérica (criterio CFL)

El paso de tiempo debe cumplir con:

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (38)$$

Convergencia temporal

Además de las iteraciones internas realizadas en cada paso de tiempo, es necesario controlar el avance global de la simulación en el dominio temporal. Este control depende de la naturaleza del flujo analizado.

- Flujos permanentes (estacionarios)

La condición de convergencia se alcanza cuando las variables de interés dejan de presentar variaciones significativas entre pasos de tiempo sucesivos, es decir:

$$\phi^{n+1} - \phi^n \approx 0 \quad (39)$$

Las variables no presentan cambios significativos entre pasos de tiempo.

- Flujos transitorios (no estacionarios)

En este caso, la simulación debe prolongarse hasta llegar al tiempo físico final definido por el usuario, garantizando que toda la evolución dinámica del fenómeno haya sido correctamente capturada. En los flujos transitorios, la convergencia no se evalúa mediante la estabilización de las variables, sino a través de la adecuada representación temporal del proceso.

Una vez finalizado el proceso iterativo de resolución de las ecuaciones gobernantes y de los modelos físicos seleccionados, FLOW-3D genera diversos archivos de salida que almacenan tanto la geometría como los resultados numéricos de la simulación. Estos archivos son indispensables para el posprocesamiento y análisis de datos.

Los principales archivos son:

FLSGRF: archivo binario que contiene los campos de variables dependientes (velocidad, presión, fracción de volumen, turbulencia, etc.) junto con la malla computacional. Este archivo es el insumo principal para la visualización en FlowSight u otros programas compatibles.

STL: archivo en formato estéreo litográfico que guarda la geometría utilizada en la simulación (dominio computacional y obstáculos). Permite comprobar que la discretización de la geometría fue interpretada correctamente por el solver.

DAT/LOG: archivos de texto que recopilan la información de entrada y salida. Incluyen las condiciones iniciales y de frontera, los parámetros de convergencia, el balance de masa y energía, así como estadísticas de estabilidad numérica.

2.2.1.11.9. Validación y calibración del modelamiento hidrodinámico computacional (CFD)

Se presentan diversos métodos de validación y calibración para los resultados obtenidos en las simulaciones de fluidos. Los métodos de validación incluyen la comparación de los resultados con las soluciones analíticas y experimentales. También se discuten los métodos de incertidumbre y sensibilidad, y cómo se utilizan para cuantificar el grado de confianza en los resultados obtenidos (Anderson, 1995).

Además el autor indica que los pasos para la calibración de los resultados, que se enfoca en ajustar algunos parámetros del modelo para que los resultados simulados coincidan con algunos valores medidos en condiciones específicas. Los métodos de calibración incluyen el uso de pruebas y ensayos de validación, así como la selección de los parámetros más importantes para ajustar el modelo, en algunos casos mediante la validación experimental (Anderson, 1995).

2.2.1.12. Descripción del complejo arqueológico de Tipón

Tipón es un sitio que se encuentra en una zona geográfica con relieve montañoso y se encuentra situado a unos 12 km al este del Cusco. El sitio de Tipón es conocido por los andenes y sistemas de riego Inca construidos en Terrazas (ARANGOITIA VALDIVIA, 2022).

Tipón en la región andina peruana. Se menciona que Tipón se encuentra a una altitud de 3,400 metros sobre el nivel del mar y está ubicado en una zona geográfica con relieve montañoso. Además, se puede acceder a él a través de una carretera asfaltada (ARANGOITIA VALDIVIA, 2022).

2.2.1.12.1. Características del complejo arqueológico de Tipón

Sistema hidráulico

El autor parece considerar que el sistema hidráulico es una de las características más importantes del sitio arqueológico de Tipón. En la página 3, se menciona que el sistema de irrigación y las fuentes de agua eran elementos clave para el cultivo de plantas en el sitio y para la realización de ceremonias relacionadas con el agua. En la página 4 y en la página 9 se dan detalles específicos sobre la fuente y el acueducto de Tipón. Además, en la página 16 se describe que ha habido estudios detallados sobre la tecnología de agua en Tipón y que se ha determinado que las fuentes de agua utilizadas en este sitio eran tanto naturales como artificiales, lo que sugiere la presencia de un avanzado sistema hidráulico en Tipón (Carreño Collatupa & Hostnig, 2023).

Terrazas agrícolas

El autor describe las terrazas agrícolas como otro elemento importante del sitio arqueológico de Tipón. En la página 3 se menciona que el sitio era utilizado para cultivos y que las terrazas y canales de irrigación permitían que se sistematicen los cultivos y se aprovechara el agua de manera eficiente. Además, en la página 4 se describe que el sitio tiene terrazas agrícolas en niveles ascendentes que se elevan alrededor de la montaña y se extienden en terrazas y andenes. En general, las terrazas agrícolas de Tipón parecen ser un ejemplo de agricultura tecnológica y eficiente en una región montañosa (Carreño Collatupa & Hostnig, 2023).

Patrimonio cultural

El autor considera que el sitio arqueológico de Tipón es un importante patrimonio cultural del Perú. En la página 3 se describe que el sitio es un complejo arqueológico importante, que ha sido tomado en cuenta como parte del circuito turístico de la región de Cusco. En la página 12 se señala que la casa-hacienda Quispicanchi, que perteneció a los marqueses de Valleumbroso y que

se encuentra cerca del sitio arqueológico de Tipón, también es un patrimonio cultural importante. Además, el hecho de que se hayan realizado investigaciones y restauraciones en el sitio sugiere que se considera como un lugar importante de valor histórico y cultural (Carreño Collatupa & Hostnig, 2023).

Investigación y conservación

El autor parece valorar positivamente la investigación y la conservación del sitio arqueológico de Tipón. En la página 13 se describe que las excavaciones arqueológicas y la restauración de los andenes de Tipón comenzaron en 1970 y continúan hasta la actualidad, y se menciona que el Ministerio de Cultura del Perú ha estado a cargo de la dirección de los trabajos de restauración desde 2010. En la página 14 se menciona que, a pesar del daño causado por los "huaqueros" (saqueadores), los trabajos de prospección y las excavaciones realizados en los últimos cincuenta años han ayudado a descubrir más información sobre la historia y la tecnología del sitio. En general, el autor parece considerar que la investigación y la conservación son esenciales para comprender y preservar el patrimonio cultural de Tipón (Carreño Collatupa & Hostnig, 2023).

2.2.2. Definición Operacional

2.2.2.1. Eficiencia de disipación de energía cinética

La eficiencia de disipación de energía cinética se refiere a cuánto logra una estructura hidráulica reducir la energía que lleva el agua cuando se mueve a través de ella. Esta reducción es importante para evitar que el agua cause daños erosivos o un mal funcionamiento de sistema hidráulico. (Chanson, 2004; Novak et al., 2007).

2.2.2.1.1. Medición de la eficiencia

Velocidad del agua:

Para saber cuánta energía tiene el agua, primero medimos su velocidad usando una técnica llamada **Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)**. Esta técnica permite observar cómo el agua se mueve antes y después de pasar por la estructura, y ha demostrado ser muy efectiva en diferentes estudios (Fujita, Muste, & Kruger, 1998; Muste et al., 2011).

Al considerarse un método de obtención de datos no intrusiva es muy efectiva en el caso de construcciones hidráulicas históricas de Tipón pues su uso no modifica ni perjudica su funcionamiento.

Modelos 3D:

Con los datos obtenidos de escaneos láser (LiDAR), crearemos modelos en 3D de las estructuras. Esto nos permitirá simular cómo fluye el agua y calcular cuánto se reduce su energía (Schneider et al., 2018; Vaaja et al., 2011).

La elección de tecnología LIDAR permite que los planes de vuelo utilizados en el parque arqueológico no interrumpan con las actividades turísticas del parque, además de considerar que la precisión de un sensor de estas características es considerablemente más preciso que una medición fotogramétrica o de una medición tradicional.

Cálculo de energía:

Para calcular la energía que tiene el agua en movimiento, usamos la fórmula:

$$E_t = z + y + \frac{v^2}{2 * g} \quad (40)$$

Aquí, z es la altura, y es el tirante hidráulico v es la velocidad y g es la gravedad. Vamos a medir esta energía antes y después de que el agua pase por la estructura (Chow, 1959).

Para calcular la energía cinética netamente que tiene el agua en movimiento, usamos la fórmula:

$$E_c = \frac{v^2}{2 * g} \quad (41)$$

En el análisis hidráulico de canales y estructuras de disipación, se usa la ecuación anterior porque representa la energía cinética específica del flujo, es decir, la energía por unidad de peso del agua. Este enfoque permite comparar directamente los niveles de energía entre distintas secciones del canal y evaluar pérdidas o disipaciones sin necesidad de conocer la masa total del fluido, lo que simplifica el uso de la ecuación de Bernoulli y de los balances energéticos. Por ello, en hidráulica de canales la energía se expresa siempre en metros de columna de agua

Cálculo de la eficiencia:

La eficiencia se calcula comparando la energía del agua antes y después de que pase por la estructura, usando esta fórmula:

$$Eficiencia (\%) = \left(\frac{Energia\ inicial - Energia\ final}{Energia\ inicial} \right) \times 100 \quad (42)$$

Este método ha sido utilizado en estudios anteriores para analizar cómo de bien funcionan las estructuras hidráulicas (Hager, 2005; Novak et al., 2007).

2.3. Hipótesis

2.3.1. *Hipótesis General*

Las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón presentan una eficiencia de disipación significativa de energía cinética.

2.3.2. *Hipótesis Específicas*

La geometría de las estructuras hidráulicas incas en el Complejo Arqueológico de Tipón está diseñada de manera óptima para maximizar la disipación de energía cinética del flujo de agua.

El fluido en las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón presenta propiedades propias del agua en régimen natural, caracterizadas por densidad, viscosidad y temperatura.

Las características del flujo en las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón presentan características que facilitan una eficiente disipación de energía cinética.

La eficiencia de disipación de energía cinética varía significativamente entre los diferentes tipos de estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón, siendo algunas más efectivas debido a sus características geométricas y de diseño.

2.4. Variables

2.4.1. *Identificación de Variables*

2.4.1.1. Variable Independiente

Estructuras hidráulicas incas

2.4.1.2. Variable Dependiente

Eficiencia de disipación de energía cinética

2.4.2. Operacionalización de Variables

Tabla 4

Operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSION	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
V.I: ESTRUCTURAS HIDRAULICAS INCA	Obras de ingeniería diseñadas para disminuir la energía cinética del agua en movimiento.	Evaluación de las características geométricas y funcionales de las estructuras en el complejo arqueológico de Tipón.	Características del Flujo	Velocidad Caudal Tirante Hidráulico	m/s m ³ /s m
			Propiedades del Fluido	Temperatura, Viscosidad cinemática Densidad	K m ² /s kg/m ³
			Geometría	Dimensión Rugosidad	Ancho (m), Largo (m), Profundidad (m) Razón (m)
V.D: EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINETICA	Capacidad de una estructura hidráulica para reducir la energía del flujo de agua.	Medición de la reducción de la energía del flujo de agua antes y después de pasar por la estructura de disipación en Tipón, Cusco.	Eficiencia energética del flujo	Energía cinética inicial (Ei) Energía cinética final (Ef) Energía disipada (ΔE) Eficiencia de disipación (η)	m m m %

Nota. Elaboración propia

2.5. Definición de Términos Básicos

Características de flujo: Se refiere al conjunto de propiedades físicas y dinámicas que describen el movimiento del agua dentro de un canal o estructura hidráulica. Incluye parámetros como la velocidad, el caudal y el tirante, los cuales determinan el régimen de flujo, la energía del sistema y su comportamiento hidráulico general.

Velocidad: Es la distancia recorrida por una partícula de fluido por unidad de tiempo. En hidráulica, la velocidad del flujo es un parámetro fundamental que influye directamente en la energía cinética y en la capacidad erosiva del agua. Se expresa en m/s..

Caudal: Es el volumen de fluido que pasa a través de una sección transversal del canal por unidad de tiempo. Se expresa en m^3/s y depende de la velocidad media y el área de flujo.

Tirante hidráulico: Corresponde a la profundidad del flujo medida desde el fondo del canal hasta la superficie libre. Determina la energía específica y el tipo de régimen de flujo.

Propiedades de fluido: Son las características físicas intrínsecas del agua que influyen en su comportamiento al desplazarse por un medio. La densidad, viscosidad y temperatura determinan la capacidad del fluido para resistir deformaciones y transmitir energía.

Temperatura: Magnitud física que indica el grado térmico del fluido. Influye en la viscosidad y densidad, modificando el comportamiento del flujo.

Viscosidad cinemática: Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido. Representa la resistencia interna al movimiento y se expresa en m^2/s .

Densidad: Masa por unidad de volumen del fluido, expresada en kg/m^3 . Determina la magnitud de la energía cinética y potencial del flujo.

Geometría: Hace referencia a la configuración espacial y morfológica de la estructura hidráulica o del canal. Incluye dimensiones, forma y rugosidad, factores que controlan la distribución del flujo, las pérdidas de energía y la eficiencia del sistema hidráulico.

Dimensión: Hace referencia a las características espaciales de la estructura hidráulica (longitud, ancho, pendiente y forma), las cuales condicionan el comportamiento del flujo y la disipación de energía.

Rugosidad: Propiedad de la superficie del canal o estructura que afecta la resistencia al flujo. Una mayor rugosidad incrementa la fricción y favorece la disipación de energía.

Funcionamiento hidráulico: Representa el desempeño general de una estructura hidráulica en relación con su capacidad para modificar o controlar el flujo. En esta investigación, se evalúa principalmente mediante la capacidad de disipación de energía cinética, la cual refleja la eficiencia con que la estructura transforma la energía del flujo.

Capacidad de disipación: Es la eficiencia con la que una estructura hidráulica reduce la energía cinética del flujo mediante turbulencia, fricción o cambios de dirección. Se expresa como el porcentaje de energía disipada respecto a la energía inicial

CAPITULO III

MÉTODO

3.1. Alcance del Estudio

3.1.1. Nivel de la Investigación

El alcance la investigación es “**Descriptivo - Correlacional**” ya que busco identificar y analizar las relaciones entre diferentes variables, como el diseño estructural, características de flujo y la eficiencia en la disipación de energía.

La correlacional, se debe a que analiza la relación funcional entre las características físicas de las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón y la eficiencia de disipación de energía cinética del flujo, establecida a partir de principios de la hidráulica y del análisis energético del flujo, mediante la evaluación comparativa y funcional de los parámetros hidráulicos obtenidos a partir del modelamiento computacional tridimensional.

3.1.2. Tipo de la Investigación

La investigación empleó un enfoque “**Cuantitativo**”, orientado a la medición y análisis de variables hidráulicas tales como el caudal de entrada y salida, la velocidad del flujo y la pérdida de energía cinética en las estructuras estudiadas. Este enfoque permitió obtener datos numéricos que fueron analizados mediante procedimientos fisicomatemáticos de la ingeniería hidráulica, con el fin de evaluar la capacidad de disipación de energía de las estructuras hidráulicas incas.

El enfoque cuantitativo se basa en recopilar y analizar datos de manera sistemática con el fin de responder a preguntas específicas de investigación y verificar hipótesis previamente establecidas. Este método se caracteriza por el uso de instrumentos que permiten medir variables de forma objetiva, apoyándose en técnicas estadísticas tanto descriptivas como inferenciales. (Moreno, 2019).

3.2. Diseño de la Investigación

De acuerdo con el diseño de esta tesis investigación para la tesis se clasifico de tipo “**No Experimental**” esto se debe a que dado que el análisis del comportamiento hidráulico de las estructuras se basa en la medición y cálculo de variables físicas como velocidad, caudal y energía cinética. Asimismo, el diseño no experimental se justifica porque las estructuras hidráulicas incas constituyen patrimonio cultural, lo que impide cualquier tipo de manipulación directa, limitando el estudio a la observación, medición y simulación de las condiciones existentes., donde no tendremos la capacidad de alterar o intervenir directamente en las variables de estudio, como la geometría de las estructuras, las propiedades del fluido, o la rugosidad de los materiales; ya que estas son fijas no variaran nunca.

Según (Hernández Sampieri, 2014)., “El diseño no experimental es aquel que se realiza sin manipular deliberadamente la variable, es observar fenómenos tal como se dan en su contexto natural para después ser analizado.

En lugar de manipular las variables, el enfoque no experimental permite observar, analizar y modelar las características y comportamientos de las estructuras hidráulicas tal como existen en su estado actual. A través de este diseño, se busca interpretar y entender cómo las estructuras incas lograban disipar energía cinética del agua, utilizando métodos de análisis descriptivo y modelado teórico, sin alterar la configuración original de estas estructuras incas de disipación.

Este tipo de diseño no experimental es particularmente adecuado cuando se trata de estudios de campo, históricos, o de patrimonio cultural, como en nuestro caso donde la intervención directa podría ser impracticable o inadecuada ya que son parte de nuestra historia. En resumen, el enfoque no experimental es idóneo para esta tesis de investigación porque nos permite explorar y entender el fenómeno en su contexto natural, sin modificar el objeto de estudio.

3.3. Población

Según (Ñaupas, Valdivia, Palacios, & Romero, 2018), la población se define como el conjunto total de unidades de estudio que reúnen las características necesarias para ser incluidas en una investigación. Estas unidades pueden estar conformadas por individuos, elementos, grupos, eventos o fenómenos que comparten cualidades específicas relevantes para el objetivo del estudio (pág. 334).

En este sentido, la población está constituida por todas las estructuras hidráulicas incas de disipación presentes en el Complejo Arqueológico de Tipón.

Figura 18

Mapa de Tipón



Nota. Dicho mapa representa la población de estudio sacado de Boleto Machu Picchu, sacada de Boleto Machu Picchu

3.3.1. Unidad de Estudio

Según (Ñaupas, Valdivia, Palacios, & Romero, 2018), las unidades de estudio en una investigación son aquellos elementos que comparten características comunes dentro de un contexto específico. Viéndolo desde un enfoque empírico, se relacionan con los atributos o características de personas, objetos, hechos o fenómenos a los cuales se aplican instrumentos de medición para observar y cuantificar las variables del estudio (pág. 326).

En nuestro caso, la unidad de análisis en esta tesis de investigación se consideró cada estructura hidráulica inca de disipación de energía cinética (canal o disipador) analizada individualmente en el Complejo Arqueológico de Tipón.

3.4. Muestra

Según (Ñaupas, Valdivia, Palacios, & Romero, 2018), una muestra es un subgrupo o subconjunto de una población o universo (un grupo más grande de individuos, eventos o cosas) del cual se recolectan datos, y su objetivo principal es representar a esa población más amplia para poder hacer inferencias válidas sobre ella, siendo una parte accesible y limitada para el estudio científico

En nuestro caso, la muestra en esta tesis de investigación se consideró las siete estructuras hidráulicas inca de disipación: canal en forma de S, canal en forma de T, canal en forma de Zigzag, canal con caída con salida doble, canal con caída con entrada recta y salida lateral, canal con entrada lateral y salida recta, y canal con pendiente invertida.

3.4.1. Tipo de muestreo

Nuestra tesis de investigación es de ámbito “**No Probabilístico**” ya que al tratarse del análisis de la eficiencia de disipación de energía cinética en las estructuras hidráulicas incas del

Complejo Arqueológico de Tipón, donde se verá casos concretos donde las características son únicas. Este tipo de muestreo es adecuado cuando no se busca generalizar los resultados a una población más amplia, sino más bien profundizar en un contexto específico como nuestro caso.

Según (Hernández Sampieri, 2014) en las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador

Además, en investigaciones de este ámbito que se trata de ingeniería y arqueología, la accesibilidad a los datos suele estar limitada a las áreas conocidas y disponibles. Así, el muestreo no probabilístico nos permite enfocarnos en los elementos más relevantes y representativos del caso en cuestión.

3.4.2. *Técnicas de selección de muestra*

Las técnicas de selección de muestra para nuestra tesis se aplicó el muestreo por criterios, en el que se eligen muestras basadas en la relevancia histórica y la condición estructural de las estructuras; y el muestreo por conveniencia, en el que se seleccionan las muestras más efectivas. Estas técnicas permiten obtener una muestra representativa y bien redactada para el análisis detallado de la eficiencia de disipación de energía en las estructuras hidráulicas estudiadas.

Según (Hernández Sampieri, 2014) el muestreo por conveniencia es definido como aquel en el que los sujetos o unidades de análisis se seleccionan por su fácil acceso, disponibilidad y cercanía al investigador.

Según (Hernández Sampieri, 2014) la elección de los elementos depende del criterio del investigador, quien selecciona aquellos casos que cumplen con ciertas características relevantes para los propósitos de la investigación

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Es importante señalar que las técnicas de recolección de información vienen a ser los procedimientos y actividades que le permiten al investigador obtener la información necesaria y específica para dar respuesta a su pregunta de investigación. (Hurtado, 2012)

Entonces, en el desarrollo de esta tesis se aplicó las siguientes técnicas e instrumentos:

3.5.1. *Técnicas de recolección de datos*

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon las siguientes técnicas de recolección de datos:

3.5.1.1. Observación directa:

Consistió en la inspección visual in situ de las estructuras hidráulicas incas de disipación de energía cinética, permitiendo identificar su estado físico, geometría, condiciones hidráulicas y comportamiento general del flujo.

3.5.1.2. Medición en campo:

Se realizaron mediciones directas de variables hidráulicas como caudal, niveles de agua y dimensiones geométricas de las estructuras, necesarias para el análisis hidráulico y la validación de los resultados obtenidos.

3.5.1.3. Levantamiento topográfico:

Se ejecutó el levantamiento topográfico del área de estudio con el fin de obtener información precisa de la geometría y pendientes de los canales y disipadores, insumo fundamental para el modelamiento y análisis hidráulico.

3.5.1.4. Simulación numérica:

Se utilizó la simulación numérica para modelar el flujo en las estructuras hidráulicas, permitiendo analizar la distribución de velocidades, niveles de energía y eficiencia de disipación mediante un enfoque computacional.

3.5.2. *Instrumentos de recolección de datos*

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos fueron los siguientes:

3.5.2.1. Ficha de recolección de datos:

Documento diseñado para registrar de manera ordenada y sistemática la información obtenida durante las observaciones y mediciones en campo.

3.5.2.2. Equipos de medición hidráulica:

Incluyen vertedero, equipos de aforo, regla y cronómetro, utilizados para la determinación del caudal y otras variables hidráulicas relevantes.

3.5.2.3. Equipos topográficos:

Se empleó un dron con sensor LiDAR y un Rover GPS para el levantamiento topográfico, obteniendo modelos digitales del terreno y datos geoespaciales de alta precisión.

3.5.2.4. Software Flow-3D:

Herramienta computacional empleada para la simulación numérica del flujo, análisis hidráulico y evaluación de la eficiencia de disipación de energía cinética en las estructuras estudiadas.

3.6. Validez y confiabilidad de instrumentos.

3.6.1. Validación de instrumentos

La validación de los instrumentos empleados en la presente investigación se realizó con el propósito de garantizar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos en cada etapa del estudio. En el levantamiento de la malla de los disipadores mediante tecnología LiDAR, la validación se efectuó mediante la verificación de la densidad y uniformidad de la nube de puntos, así como del ajuste geométrico entre superficies adyacentes, asegurando una representación precisa de las estructuras hidráulicas incas. En el caso del método LSPIV, la validación se llevó a cabo mediante contrastes con mediciones directas de velocidad superficial. La calibración del vertedero experimental se efectuó aplicando fórmulas hidráulicas reconocidas para determinar el caudal real descargado, garantizando la correspondencia entre las condiciones teóricas y experimentales. Finalmente, el modelo numérico desarrollado en FLOW-3D fue validado a través de la comparación de los resultados simulados con los datos experimentales y de campo, comprobando su capacidad para representar óptimamente el comportamiento hidráulico y la disipación de energía en las estructuras analizadas del complejo arqueológico de Tipón.

3.6.2. Confiabilidad de instrumentos

La confiabilidad de los instrumentos utilizados en la investigación se garantizó mediante la verificación de la consistencia de los datos obtenidos en diferentes mediciones y condiciones. En el caso del levantamiento de malla con tecnología LiDAR, se evaluó la repetibilidad de los registros al generar nubes de puntos con mínima variación en sucesivos escaneos, confirmando la estabilidad del equipo y la calidad de la información espacial obtenida. Respecto al método LSPIV, su confiabilidad se determinó a partir de la repetición de los análisis de video y la comparación de los patrones de flujo obtenidos en distintas secuencias, evidenciando una variación mínima en las

velocidades calculadas. Asimismo, los resultados de velocidad, caudal medido mediante el vertedero y comportamiento hidráulico obtenidos mediante estos métodos fueron contrastados con las simulaciones hidrodinámicas desarrolladas en el software FLOW-3D, encontrándose una alta concordancia entre los valores modelados y los datos experimentales, lo que refuerza la fiabilidad de los instrumentos y métodos empleados en la investigación.

3.7. Plan de análisis de datos

Para comprobar la veracidad o cumplimiento de las hipótesis planteadas, se realizaron simulaciones computacionales que describen el comportamiento hidrodinámico de las estructuras hidráulicas incas, empleando principios de la dinámica de fluidos y la mecánica de sólidos. Estas ecuaciones fueron integradas en un modelo hidrodinámico tridimensional, permitiendo simular el comportamiento del flujo bajo diversas condiciones hidráulicas representativas del sitio de estudio.

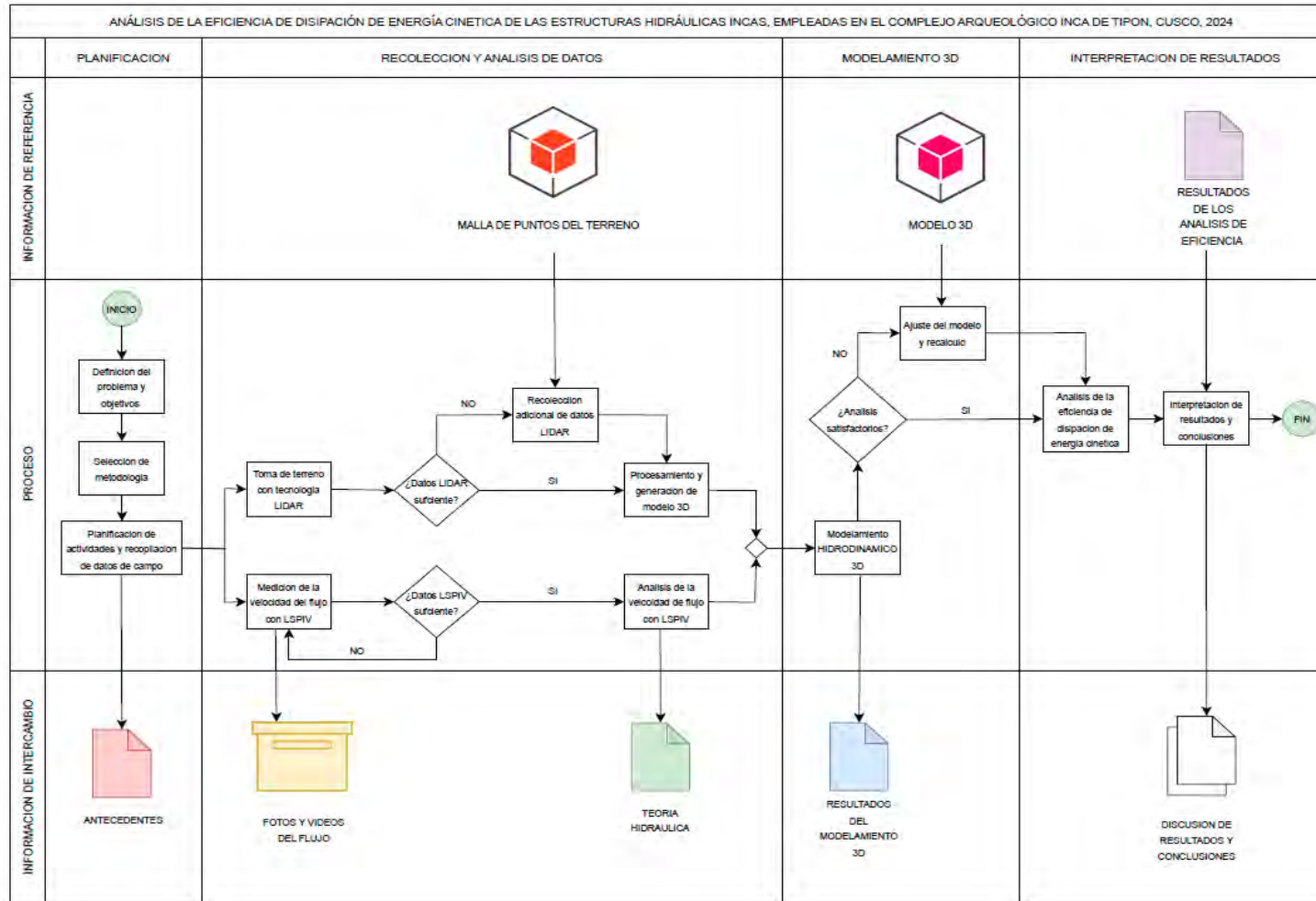
Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones fueron comparados con las expectativas establecidas en las hipótesis de la investigación y con los datos obtenidos mediante mediciones de campo, así como con antecedentes históricos y arqueológicos disponibles. El contraste de resultados se realizó a partir del análisis físico matemático de variables hidráulicas como velocidad, caudal y energía cinética, evaluando su coherencia con los principios fundamentales de la hidráulica.

Asimismo, la validación de los resultados se efectuó mediante la comparación entre los valores obtenidos experimentalmente y aquellos provenientes del modelamiento numérico, lo que permitió verificar la consistencia del modelo y sustentar las conclusiones de la investigación sin recurrir a métodos estadísticos inferenciales, dado el carácter determinístico y no experimental del estudio.

3.8. Procedimientos para la Recolección y Análisis de Datos

Figura 19

Flujograma general del procedimiento metodológico



Nota. Elaboración Propia

3.8.1. Escaneo LiDAR de los disipadores hidráulicos incas

3.8.1.1. Descripción metodológica y entorno de aplicación

El área seleccionada para esta investigación corresponde al sistema hidráulico principal del complejo arqueológico de Tipón, ubicado en el distrito de Oropesa, provincia de Quispicanchi, región de Cusco, Perú. Este complejo, reconocido a nivel internacional por su avanzada ingeniería hidráulica, se caracteriza por una red de canales, fuentes y terrazas agrícolas, diseñados para regular y optimizar el flujo del agua.

El área estudiada del complejo arqueológico abarca aproximadamente **500 m²**, dentro del cual se encuentran los canales principales y las estructuras escalonadas que facilitan la disipación de energía cinética del flujo. Estas estructuras presentan características distintivas de la ingeniería hidráulica inca, como pendientes pronunciadas y rugosidades superficiales, que permiten un análisis detallado de los mecanismos hidráulicos utilizados durante su construcción.

La importancia de las áreas estudiadas a continuación radica en su capacidad para demostrar la eficiencia y sostenibilidad de las técnicas hidráulicas ancestrales, considerándolas un ejemplo de la interacción entre ingeniería, funcionalidad y adaptación al entorno natural de zonas complejas. Estas estructuras hidráulicas incas fueron seleccionadas debido a su representatividad en cuanto a las soluciones hidráulicas implementadas dentro de todo el complejo, lo que las convierte en un caso de estudio ideal para evaluar la disipación de energía en sistemas históricos.

Se realiza durante 2 visitas la toma de datos topográficos del complejo Turístico a través de un levantamiento LiDAR con diferentes planes de vuelo a diferentes alturas buscando una correcta interpretación del terreno y de las estructuras del sistema hidráulico principal.

3.8.1.2. Método de recolección de datos

Planificación del levantamiento LiDAR

Para llevar a cabo la recolección de datos en el complejo arqueológico de Tipón, fue indispensable realizar gestiones administrativas específicas en conjunto con nuestros asesores y la Dirección Desconcentrada de Cultura y los arqueólogos encargados que garantizaran el desarrollo adecuado de las actividades en campo. Uno de los requerimientos principales para la investigación fue el secado temporal de los canales y estructuras hidráulicas del complejo, ya que la ausencia de flujo de agua era indispensable para capturar con precisión las características geométricas y estructurales mediante las tecnologías LiDAR. Este procedimiento implicó solicitar un permiso especial mediante mesa de partes a la Dirección Desconcentrada de Cultura de Cusco, institución responsable de la administración y conservación del patrimonio arqueológico en la región.

Adicionalmente, debido al uso de un dron especializado equipado con tecnología LiDAR para el levantamiento topográfico aéreo, se gestionó una autorización para el vuelo en la zona, cumpliendo con la normativa vigente y asegurando que las operaciones se realizaran de manera segura y respetuosa con el patrimonio.

Plan de vuelo para el levantamiento con LiDAR

Para la obtención de la topografía detallada del sistema hidráulico incaico en el complejo arqueológico de Tipón, se utilizó un escaneo LiDAR terrestre asistido por tecnologías GNSS de alta precisión. Se aplicaron dos métodos diferenciados para el georreferenciamiento de los datos, seleccionados según las condiciones de accesibilidad y conectividad de cada sector: RTK (Real-Time Kinematic) y PPK (Post-Processed Kinematic).

El método RTK fue utilizado en las zonas donde se contó con buena cobertura para la transmisión en tiempo real de correcciones diferenciales desde una estación base o una red de

referencia. Esta técnica permitió obtener posiciones con precisión centimétrica en el momento de la captura de los datos, facilitando un procesamiento ágil y fiable, especialmente útil en sectores accesibles y cercanos al punto base.

En cambio, para las áreas de difícil acceso o con limitaciones de conectividad (por ejemplo, zonas alejadas o con obstrucción del cielo por vegetación o relieve), se implementó el método PPK. En este enfoque, los datos GNSS se almacenaron localmente en el equipo y las correcciones diferenciales se aplicaron posteriormente en gabinete, mediante la comparación con los registros de una estación base. Aunque el procesamiento es más laborioso, el método PPK ofrece igual o incluso mayor precisión que el RTK, con la ventaja de no depender de una conexión en tiempo real.

La combinación de ambas técnicas permitió cubrir con alta precisión la totalidad del sistema de canales, garantizando un modelo tridimensional confiable para el análisis hidrodinámico posterior, sin comprometer la integridad del patrimonio arqueológico.

Complemento en la adquisición de datos

Además de emplear un dron equipado con tecnología LiDAR para realizar el levantamiento aéreo de las estructuras hidráulicas del complejo arqueológico de Tipón, se consideró ideal la utilización de un escáner LiDAR manual de alta precisión. Este dispositivo, con una resolución milimétrica (3-5mm), fue especialmente útil en áreas donde la geometría compleja, las pendientes abruptas o la proximidad de elementos arquitectónicos dificultaban la captura de detalles mediante el levantamiento aéreo considerando además que la capade agua presenta a pesar del secado dificultaba la toma de datos con el sensor del dron.

Una nube de puntos con mayor densidad y resolución permite modelar de forma más realista las características físicas de las estructuras y los flujos asociados, asegurando que los análisis de disipación de energía cinética reflejen fielmente las condiciones reales.

Adicionalmente, como parte del enfoque tecnológico complementario, se utilizó el sensor LiDAR integrado en un iPhone 15 Pro para capturar detalles en espacios reducidos y superficies de acceso limitado. Este sensor, aunque menos preciso que los dispositivos profesionales, demostró ser una herramienta eficaz para aumentar la densidad de la nube de puntos en áreas donde el uso del escáner manual o el dron no era viable. La combinación de ambos sensores LiDAR permitió maximizar la calidad y resolución de los datos recolectados, asegurando que los modelos tridimensionales y las simulaciones hidrodinámicas reflejaran fielmente las condiciones estructurales y dinámicas del sistema hidráulico incaico.

3.8.1.3. Procesamiento y análisis de la información obtenida

Posprocesamiento del levantamiento LiDAR de los disipadores hidráulicos

Una vez finalizada la recolección de datos en campo, se inició la etapa de posprocesamiento, fundamental para transformar los datos capturados en representaciones tridimensionales precisas que pudieran ser utilizadas en simulaciones hidrodinámicas. Los datos obtenidos mediante las tecnologías LiDAR fueron transferidos a la computadora utilizando el software DJI Terra, el cual generó un archivo en formato LAS, que contenía la nube de puntos recolectada. Este archivo fue posteriormente importado al programa Spatix, donde se llevó a cabo la limpieza de datos, eliminando puntos redundantes, ruido y artefactos no deseados, asegurando así la calidad del modelo.

Generación del modelo 3D de los disipadores hidráulicos

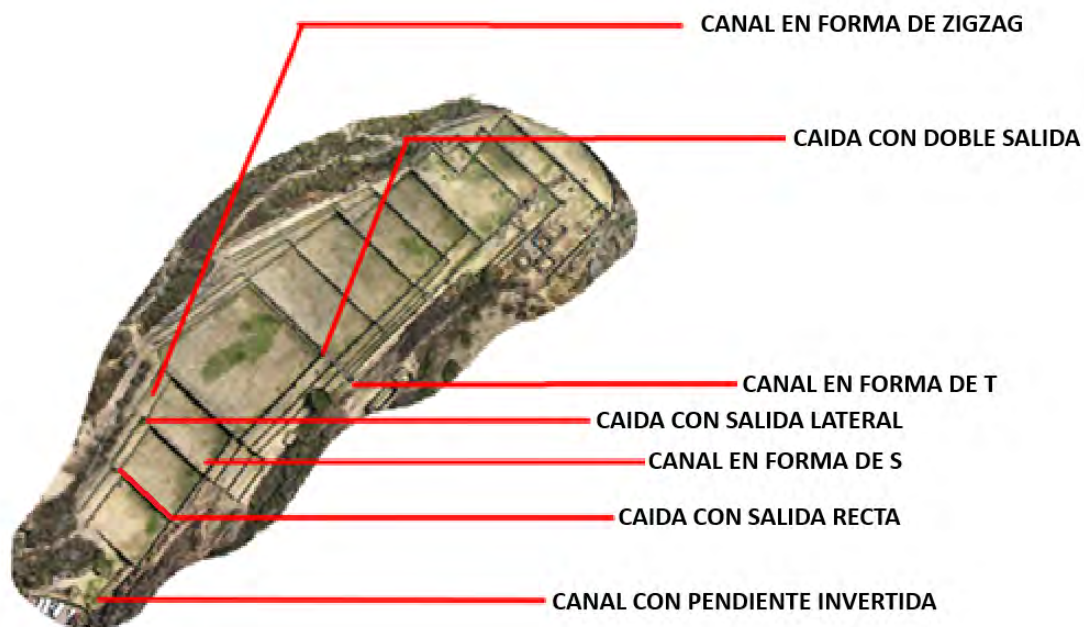
A continuación, los datos depurados se procesaron en el software Fusion, donde se generó una malla de puntos más estructurada. Este paso incluyó la edición de la malla para corregir inconsistencias, cerrar vacíos y garantizar que la representación del terreno y las estructuras fuera lo más precisa posible. Finalmente, se exportó el modelo como un sólido en formato STL, el cual cumple con los estándares necesarios para ser integrado en el simulador hidrodinámico. Durante todo este proceso, se priorizó la máxima precisión para garantizar que los análisis posteriores reflejaran fielmente las características geométricas y funcionales del sistema hidráulico incaico.

En el presente estudio se ha seleccionado un conjunto representativo de estructuras hidráulicas incas ubicadas en el complejo arqueológico de Tipón, con el propósito de analizar su eficiencia en la disipación de energía cinética mediante modelamiento hidrodinámico tridimensional. La selección responde a criterios de funcionalidad hidráulica, diversidad morfológica y relevancia arqueológica, con el fin de abordar distintos mecanismos constructivos utilizados por los ingenieros hidráulicos incas. Las estructuras consideradas son las siguientes:

- Canal en forma de S
- Canal en forma de T
- Canal en forma de Zigzag
- Canal con caída con doble salida
- Canal con caída con entrada recta y salida lateral
- Canal con caída con entrada lateral y salida recta
- Canal con pendiente invertida

Figura 20

Ubicación de los disipadores a estudiar



Nota. Elaboración Propia

3.8.1.4. Alcance de la información

El escaneo mediante LiDAR permitió obtener datos detallados de la geometría de todos los disipadores hidráulicos del sitio, incluyendo su forma, altura y contornos. La información abarca la totalidad de los disipadores, ofreciendo una representación precisa de la superficie, lo que facilita el análisis de rugosidad, pendientes y características topográficas relevantes para la disipación de energía.

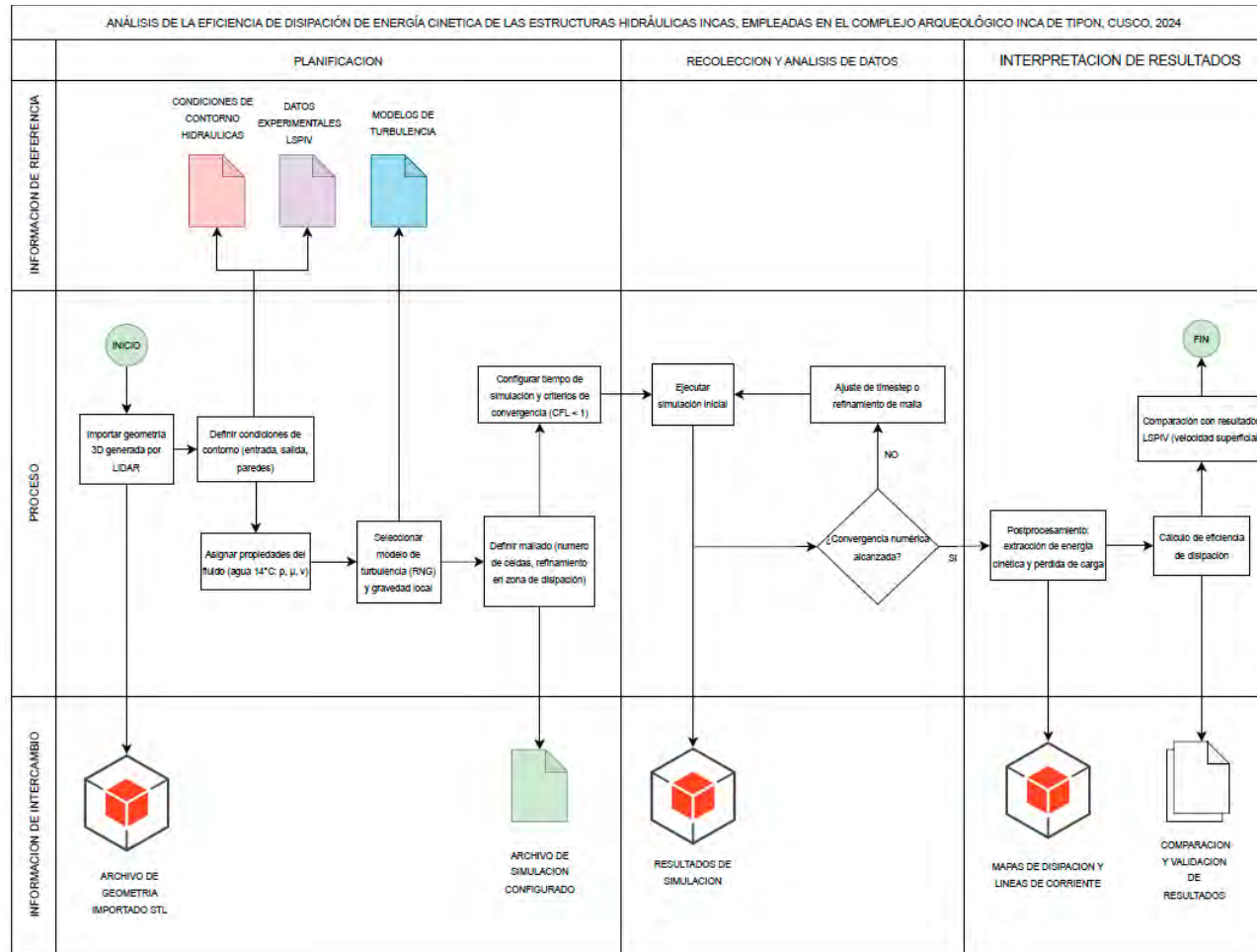
3.8.1.5. Limitaciones de la información

Entre las limitaciones consideradas se incluyen zonas con sombras, material orgánico que se encuentra en las pozas y la presencia de agua en ciertos puntos de los disipadores, la cual pudo afectar la densidad de la nube de puntos y generar vacíos parciales en los datos, aunque no comprometió la cobertura general del levantamiento.

3.8.1.6. Flujograma del flujo de la información

Figura 21

Flujograma del procedimiento metodológico para el levantamiento y procesamiento de datos mediante escaneo LiDAR



Nota. Elaboración Propia

3.8.2. *Adquisición y análisis de imágenes del flujo mediante el método LSPIV*

3.8.2.1. Descripción metodológica y entorno de aplicación

El método de Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) se aplicó para obtener un registro detallado de la velocidad superficial del flujo en los disipadores hidráulicos estudiados. Este método consiste en la captura de secuencias de imágenes de alta resolución y frecuencia de cuadros por segundo (fps), permitiendo rastrear el movimiento de partículas presentes en la superficie del flujo, ya sea naturales o introducidas artificialmente como trazadores visuales. Para la recolección de los datos, se realizaron tres visitas de campo en diferentes días para optimizar las condiciones de iluminación y minimizar reflejos del sol en el agua, que afectan la calidad del registro.

El entorno de aplicación correspondió a los disipadores hidráulicos del Complejo Arqueológico de Tipón, evaluando tanto las secciones de entrada como de salida del flujo. Se establecieron referencias fijas en cada estructura para asegurar la consistencia espacial en la captura de imágenes y permitir un análisis comparativo entre distintos puntos de observación. La cámara utilizada fue profesional, con capacidad de grabación en 4K a 120 fps, lo que permitió un registro muy preciso de las partículas en movimiento, esencial para el cálculo de velocidades mediante correlación cruzada.

3.8.2.2. Método de recolección de datos

La recolección de imágenes se realizó seleccionando áreas convenientes dentro de cada disipador, tanto en los puntos de entrada como de salida. Esto permitió obtener registros representativos y comparables del comportamiento del flujo en cada punto tanto de entrada como de salida. La toma de datos debió ser correctamente, asegurando una visión recta al flujo. La alta frecuencia de grabación permitió detectar desplazamientos mínimos de las partículas entre

fotogramas consecutivos, necesarios para el cálculo preciso de la velocidad mediante correlación cruzada. Se priorizó que las condiciones de iluminación fueran óptimas: evitar reflejos directos del sol, mantener sombras suaves y asegurar que la superficie del flujo estuviera suficientemente iluminada y clara. Además, se verificó la presencia de partículas o trazadores visibles que permitieran al software LSPIV detectar el movimiento del flujo de manera confiable. La grabación se realizó en cada disipador, tanto en la sección de entrada como en la de salida, garantizando que los datos fueran comparables y consistentes para el análisis posterior.

3.8.2.3. Procesamiento y análisis de la información obtenida

El procesamiento de la velocidad superficial tanto de entrada como de salida de cada disipador el cual analizamos en esta investigación, fueron procesadas en el software de MATLAB específicamente en la extensión “RIVeR”. El procesamiento LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) en el software RIVeR se basa en un análisis óptico de imágenes de la superficie de un flujo para estimar el campo de velocidades.

Primeramente, el LSPIV utiliza la correlación cruzada para identificar el desplazamiento promedio de patrones (partículas o trazadores visuales) entre dos imágenes consecutivas. La fórmula general para la correlación cruzada es:

$$R(\Delta x, \Delta y) = \sum_{i,j} I_1(i,j) \cdot I_2(i + \Delta x, j + \Delta y) \quad (43)$$

Donde:

$I_1(i, j)$: Intesidad de pixeles en la primera imagen.

$I_2(i + \Delta x, j + \Delta y)$: Intesidad de pixeles en la segunda imagen $(\Delta x, \Delta y)$.

$R(\Delta x, \Delta y)$: Correlacion cruzada como funcion del desplazamiento $(\Delta x, \Delta y)$.

La posición del pico máximo de $R(\Delta x, \Delta y)$: indica el desplazamiento promedio del patrón entre las imágenes.

Por segundo paso se hace el cálculo de la velocidad a partir del desplazamiento obtenido en cada par de imágenes, se calcula la velocidad superficial mediante la relación:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (44)$$

Donde:

$$\Delta s = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} : \text{Magnitud del desplazamiento}$$

$$\Delta t : \text{Tiempo entre capturas consecutivas.}$$

Por tercer paso se hace el escalado espacial El software convierte las unidades de píxeles a unidades físicas (por ejemplo, metros) utilizando un factor de escala derivado de una referencia en el video o imagen (como un objeto con dimensiones conocidas).

$$v_{físico} = v_{píxeles} * S \quad (45)$$

Donde:

S: Factor de escala (longitud física por píxel).

Por cuarto paso se hace la corrección de la velocidad superficial el LSPIV estima inicialmente velocidades superficiales. Para obtener velocidades promedio en el flujo, se aplica una corrección empírica:

$$v_{promedio} = v_{superficial} * \alpha \quad (46)$$

Donde:

α : Factor de corrección (generalmente entre 0.7 y 0.9), dependiendo de la rugosidad y el perfil de velocidades del flujo.

Por último, paso se realiza el filtrado y suavizado ya que el software implementa técnicas de filtrado (por ejemplo, filtros de mediana o suavizado gaussiano) para eliminar ruido y obtener un campo de velocidades más coherente.

3.8.2.4. Alcance de la información

El alcance de la información obtenida mediante el método LSPIV incluye la caracterización detallada de la velocidad superficial del flujo en todos los disipadores hidráulicos estudiados, tanto en las zonas de entrada como de salida. Esto permite identificar patrones de flujo, comparando cómo se comporta el agua en diferentes puntos de cada una de las estructuras dentro del complejo. Gracias a la alta resolución y frecuencia de las imágenes, se logró un nivel de detalle suficiente para detectar variaciones espaciales y temporales en la velocidad superficial que no serían captadas con métodos tradicionales de medición puntual. La información obtenida también sirve como base para la validación de modelos computacionales de flujo y para el análisis de la eficiencia hidráulica de los disipadores, contribuyendo a comprender mejor la dinámica del flujo en estas estructuras.

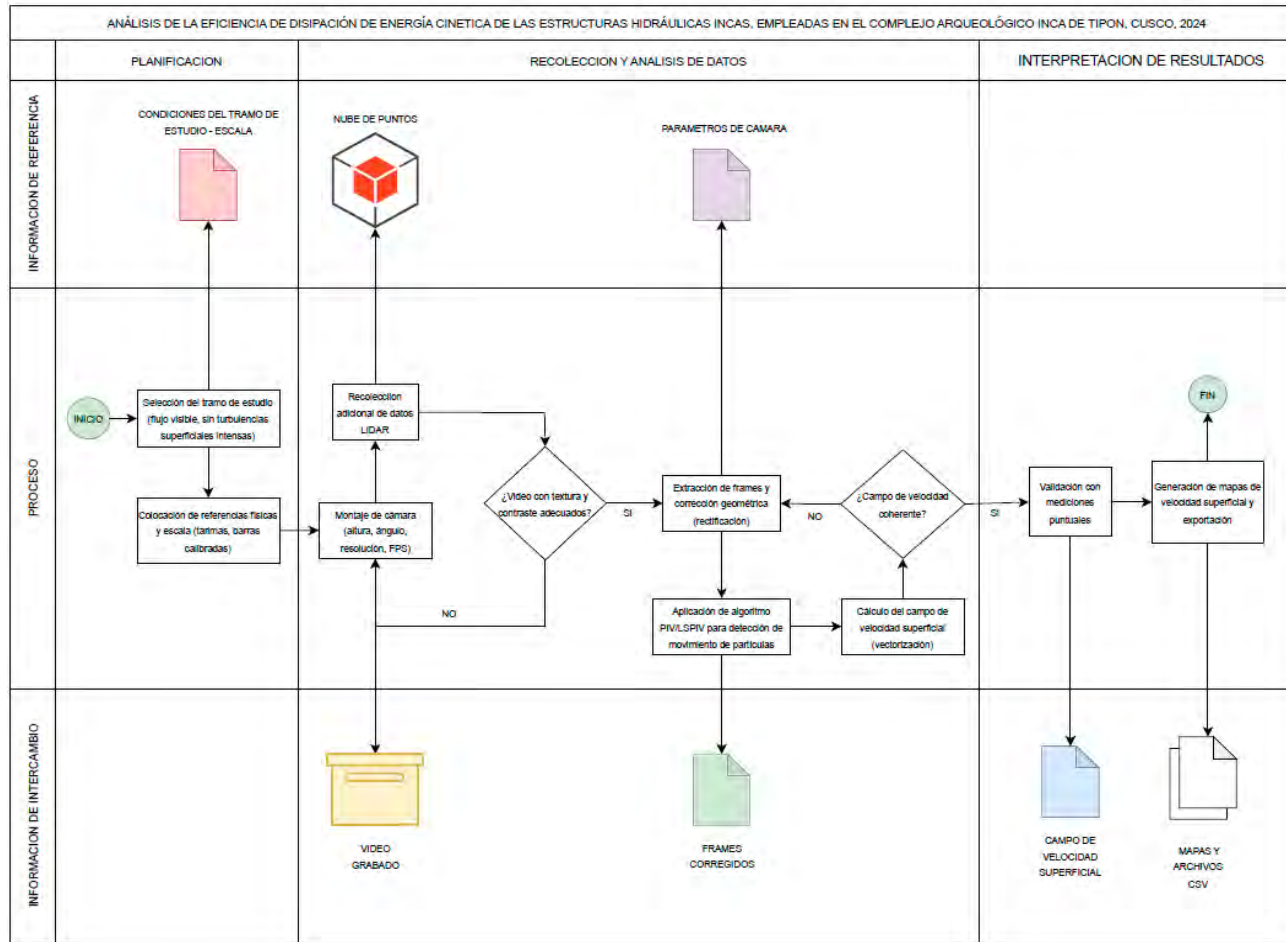
3.8.2.5. Limitaciones de la información

A pesar de las ventajas del LSPIV, se presentaron limitaciones significativas durante la recolección y análisis de los datos. La presencia de reflejos del sol en el agua impidió capturar algunas zonas, y fue necesario esperar condiciones de iluminación adecuadas o generar sombras sin comprometer la claridad de la superficie. Además, algunas áreas presentaban escasez de partículas visibles, lo que hizo que tengamos que usar aserrín para que capture mejor dichas partículas.

3.8.2.6. Flujograma del flujo de la información

Figura 22

Flujograma del procedimiento metodológico para la adquisición y análisis de imágenes del flujo mediante el método LSPIV



Nota. Elaboración Propia

3.8.3. *Determinación del caudal mediante el método del vertedero*

3.8.3.1. Descripción metodológica y entorno de aplicación

Para el cálculo del caudal, usamos el método del vertedero, el cual consiste en medir la altura del agua sobre la cresta de un vertedero y relacionarla con la geometría de la estructura para determinar el caudal que circula por un canal. Se instalaron dos vertederos de diferentes dimensiones, adaptados a los canales del Complejo Arqueológico de Tipón, debido a que las secciones no son uniformes. Cada vertedero se colocó en puntos donde el flujo era constante tanto en la entrada como en la salida de los disipadores estos puntos son los mismos puntos tomados de cada disipador en el LSPIV, asegurando que las mediciones fueran representativas. Durante las visitas de campo se registró cuidadosamente la altura del agua sobre la cresta de cada vertedero usando escalas graduadas previamente instaladas. Para compensar la irregularidad de los canales y evitar fugas, se emplearon láminas de plástico para cubrir huecos y asegurar que todo el flujo pasara por la sección del vertedero. Las observaciones se realizaron bajo condiciones de flujo estable, garantizando que los datos obtenidos fueran confiables y comparables entre los diferentes canales y vertederos.

3.8.3.2. Método de recolección de datos

En cada vertedero se midió cuidadosamente la altura del agua sobre la cresta varias veces, para garantizar consistencia en las lecturas. Las mediciones se realizaron en secciones donde el flujo se mantenía constante, evitando áreas con turbulencias o remolinos que pudieran afectar los resultados. Todos los registros se documentaron junto con observaciones de las condiciones ambientales y del flujo, lo que permitió contextualizar las mediciones y facilitar el análisis posterior. Las mediciones se realizaron de forma repetida para asegurar la confiabilidad de los datos y su comparabilidad entre los dos vertederos empleados.

3.8.3.3. Procesamiento y análisis de la información obtenida

En la presente investigación, el caudal en los disipadores hidráulicos del Complejo Arqueológico de Tipón se determinó mediante la formulación general de vertedero rectangular, incorporando el coeficiente de gasto μ , el cual permite corregir los efectos de contracción, rugosidad y condiciones reales del flujo sobre la cresta. La adopción de este enfoque resulta adecuada debido a la geometría robusta y rígida de las estructuras incaicas, cuyo espesor y acabado superficial influyen en el comportamiento hidráulico del flujo. De este modo, el empleo del coeficiente de gasto μ , determinado a partir de la expresión de Hégly, permite obtener estimaciones de caudal representativas del funcionamiento real de los disipadores, manteniendo coherencia con las condiciones geométricas y operativas observadas en campo.

$$Q = \mu \times \frac{2}{3} \times L \times \sqrt{2 \times g} \times H^{\frac{3}{2}} \quad (47)$$

Donde:

Q: Caudal (m^3/s)

μ : coeficiente de gasto del vertedero

g: Aceleración de la gravedad (m/s^2)

L: Longitud de la cresta del vertedero (m)

H: Altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero (m)

Para este estudio, el valor del parámetro μ se determinó utilizando la fórmula de Hégly, ampliamente empleada en vertedores de cresta ancha por su capacidad para representar la relación entre la carga hidráulica y la longitud efectiva de la cresta.

$$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \times \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right] \quad (48)$$

Donde:

B: Ancho del canal

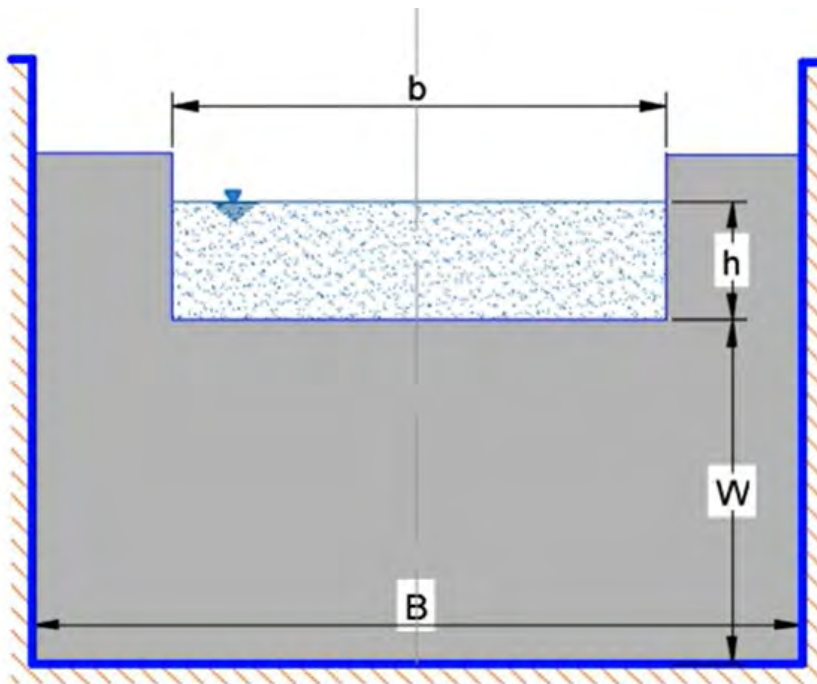
b: Ancho del vertedero

W: Altura del fondo al vertedero

h: Carga sobre el vertedero

Figura 23

Vertedero



Nota. Elaboración Propia

3.8.3.4. Alcance de la información

La información obtenida proporciona una determinación precisa del caudal en los canales donde se instalaron los vertederos, permitiendo caracterizar el flujo en las secciones de entrada y salida de los disipadores. Los datos obtenidos permiten comparar el comportamiento del flujo entre canales de distintas dimensiones y sirven como base para la validación de modelos computacionales de flujo.

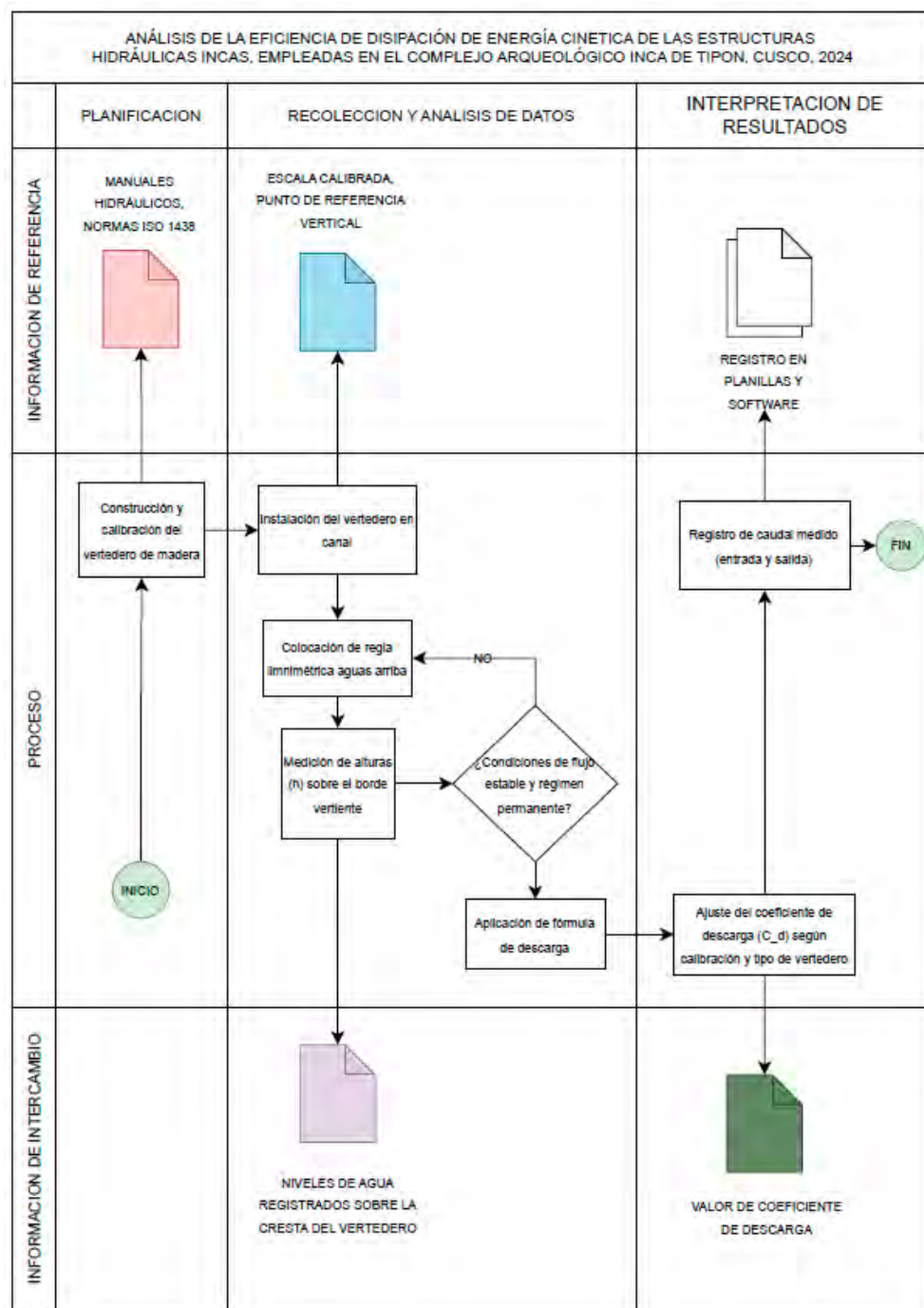
3.8.3.5. Limitaciones de la información

El principal factor limitante fue la irregularidad de los canales, que obligó a utilizar láminas de plástico para tapar huecos y asegurar que todo el flujo pasara por los vertederos, lo que podría introducir pequeñas variaciones en el caudal calculado. Además, la precisión del método depende de que el flujo se mantenga estable durante la medición; cualquier fluctuación temporal puede afectar los resultados.

3.8.3.1. Flujograma del flujo de la información

Figura 24

Flujograma del procedimiento metodológico para la determinación del caudal mediante el método del vertedero



Nota. Elaboración Propia

3.8.4. Modelamiento computacional del comportamiento hidráulico en FLOW-3D

3.8.4.1. Descripción metodológica y entorno de aplicación

Para evaluar el comportamiento hidráulico de los disipadores del Complejo Arqueológico de Tipón, se realizó un modelamiento computacional en FLOW-3D, software especializado en simulación hidrodinámica. Se construyeron modelos tridimensionales de cada disipador, integrando las geometrías obtenidas mediante escaneo LIDAR y las mediciones de caudal obtenidas con los vertederos, así como las velocidades superficiales del flujo registradas con LSPIV. Los modelos reprodujeron las condiciones reales de los canales, incluyendo la sección de entrada y salida, la topografía del lecho, y las dimensiones específicas de cada disipador. El flujo se simuló bajo condiciones no permanentes y turbulentas, utilizando las ecuaciones de Navier-Stokes resolubles por FLOW-3D para fluidos incomprensibles y considerando la viscosidad, densidad y gravedad. Se definieron condiciones de entrada y salida, y se establecieron mallas de tamaño 0.001 de cálculo adaptativas para asegurar precisión en zonas de alta gradiente de velocidad.

3.8.4.2. Método de recolección de datos

Para el modelamiento computacional en FLOW-3D se recopilaron todos los datos necesarios durante las visitas de campo, con el objetivo de representar de manera precisa el comportamiento hidráulico de los disipadores. Se obtuvo la geometría tridimensional de los disipadores mediante escaneo LIDAR, la cual fue procesada para eliminar errores y generar modelos exportables al software. Paralelamente, se midió el caudal en los canales utilizando vertederos, estableciendo los valores de flujo de entrada que servirían como condiciones de frontera en la simulación. Además, se registraron las propiedades físicas del agua, incluyendo viscosidad, densidad y temperatura, en cada punto de medición, asegurando que las características

del fluido en el modelo fueran representativas de las condiciones reales del campo. Todos estos datos se organizaron, verificaron y cargaron en FLOW-3D, definiendo las condiciones de frontera, los parámetros del fluido y la geometría de cada dissipador. Este procedimiento permitió que el modelo recreara de manera fiel la interacción entre el flujo y la estructura hidráulica, proporcionando una base sólida para el análisis de velocidad, presión y comportamiento general del flujo dentro de cada dissipador.

3.8.4.3. Procesamiento y análisis de la información obtenida

El procesamiento y análisis de la información se realizó a partir de los resultados generados por el modelamiento computacional tridimensional del comportamiento hidráulico de las estructuras de disipación de energía cinética del Complejo Arqueológico de Tipón, empleando el software FLOW-3D. Los datos geométricos obtenidos mediante levantamiento LiDAR fueron integrados al modelo numérico, verificando la correcta representación de las dimensiones, pendientes y características hidráulicas de cada estructura.

Las simulaciones se desarrollaron bajo condiciones de frontera previamente definidas, considerando caudales, niveles hidráulicos y propiedades del fluido representativas del sistema real. FLOW-3D resolvió las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento mediante métodos numéricos, generando:

- Distribución de velocidades en el flujo
- Comportamiento del flujo en entradas y salidas, incluyendo zonas de recirculación
- Trayectorias de partículas
- Presiones y fuerzas ejercidas sobre las paredes de los canales

El análisis de la información obtenida se efectuó a través de la interpretación de resultados gráficos y numéricos, tales como contornos de velocidad, líneas de corriente, perfiles de presión y zonas de turbulencia, permitiendo identificar los mecanismos de disipación de energía asociados a la geometría y rugosidad de las estructuras. Asimismo, se extrajeron valores de variables hidráulicas en secciones de control para cuantificar la reducción de energía cinética entre la entrada y salida de cada estructura.

Finalmente, los resultados fueron organizados en tablas y gráficos comparativos, facilitando el análisis de la relación entre la geometría, rugosidad y propiedades del flujo con la eficiencia de disipación de energía cinética, lo cual permitió sustentar el cumplimiento de los objetivos y la contrastación de las hipótesis planteadas en la investigación.

3.8.4.4. Alcance de la información

La simulación en FLOW-3D permitió obtener una representación tridimensional completa del comportamiento hidráulico de los disipadores, incluyendo zonas que no pueden ser medidas directamente en campo, como velocidades en capas profundas o flujos internos en turbulencias complejas.

La información obtenida permite:

- Evaluar la eficiencia de disipación de energía cinética en diferentes zonas del disipador,
- Comparar el comportamiento hidráulico entre estructuras de distintas geometrías,
- Servir como base para el diseño o mejora de disipadores hidráulicos similares en estudios futuros.

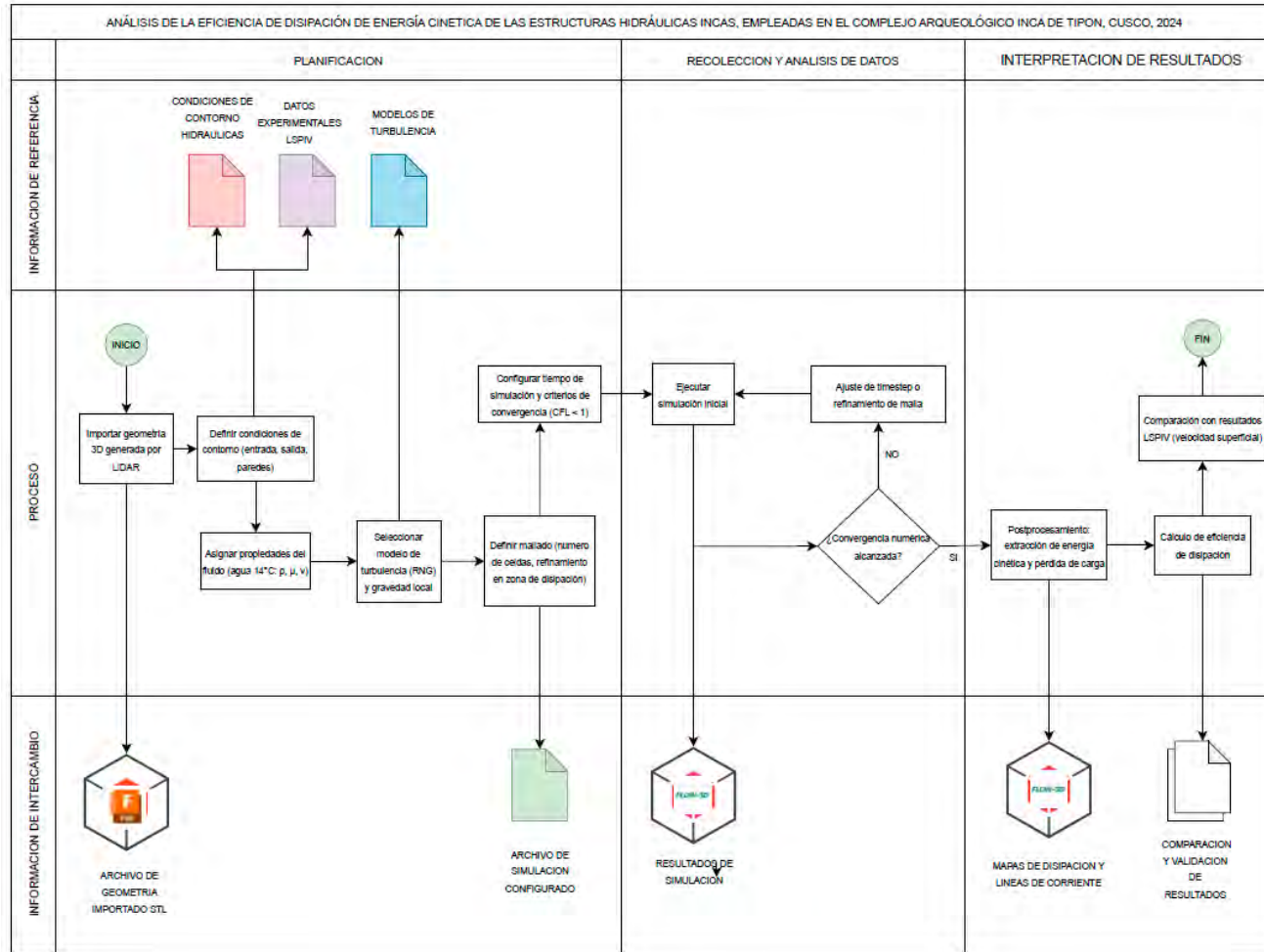
3.8.4.5. Limitaciones de la información

A pesar de la precisión del modelamiento en FLOW-3D, existen limitaciones inherentes tanto a la obtención de los datos de campo como a la simulación numérica. Una de las principales restricciones radica en que la exactitud del modelo depende directamente de la calidad de los datos de entrada; cualquier desviación en la geometría obtenida por el escaneo LIDAR o en el caudal medido con los vertederos puede influir en los resultados simulados. Asimismo, el modelo asume que el flujo es incompresible y homogéneo, por lo que no considera la presencia de aire, material particulado o variaciones en la densidad del agua. También se debe mencionar que la resolución de la malla computacional fue limitada por la capacidad de procesamiento del equipo utilizado, lo que puede generar pequeñas diferencias en zonas de alta turbulencia o geometrías complejas. Finalmente, las simulaciones representan condiciones específicas del momento en que se realizó el levantamiento, por lo que variaciones futuras en el caudal o en las condiciones ambientales podrían modificar el comportamiento hidráulico real respecto a lo modelado.

3.8.4.6. Flujograma del flujo de la información

Figura 25

Flujograma del procedimiento metodológico para el modelamiento computacional del comportamiento hidráulico



Nota. Elaboración Propia

CAPITULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a partir del análisis hidrodinámico de En este capítulo se presentan los resultados del análisis hidráulico de las estructuras del complejo arqueológico de Tipón, Cusco, obtenidos a partir del procesamiento de datos de campo y del modelamiento hidrodinámico tridimensional realizado. Los resultados permiten evaluar el comportamiento del flujo de agua en las distintas estructuras, considerando la distribución de velocidades, los patrones de flujo y la eficiencia de disipación de energía cinética, así como la influencia de la geometría en el desempeño hidráulico del sistema.

El análisis del modelamiento hidrodinámico evidenció diferencias significativas en el comportamiento del flujo entre las diversas tipologías hidráulicas estudiadas. En algunas estructuras se identificaron zonas de alta turbulencia y recirculación, asociadas a una mayor reducción de energía cinética, mientras que en otras se observó un flujo más uniforme, orientado principalmente a la conducción y distribución del caudal. Estos resultados reflejan un diseño hidráulico intencional que responde a criterios funcionales y de control del flujo.

La comparación entre las condiciones hidráulicas de entrada y salida permitió cuantificar la eficiencia de disipación de energía de cada estructura, lo que facilita la comprensión del funcionamiento integral del sistema hidráulico incaico de Tipón. En conjunto, los resultados obtenidos ponen en evidencia el conocimiento empírico avanzado de la ingeniería hidráulica inca, demostrando que el diseño de estas estructuras no solo cumplía una función operativa, sino que también incorporaba soluciones técnicas eficientes, cuya vigencia resulta relevante tanto para la interpretación histórica del sitio como para la conservación y estudio de sistemas hidráulicos patrimoniales.

4.1. Resultados respecto a los objetivos específicos.

4.1.1. Evaluación de la influencia de la geometría en la eficiencia de disipación de energía cinética

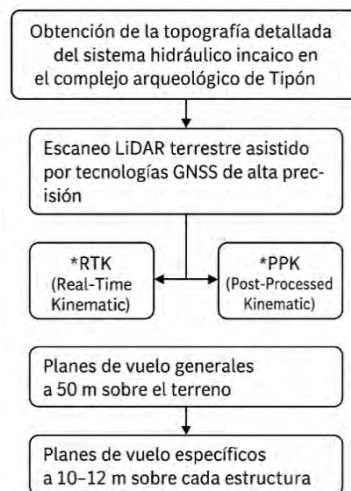
La evaluación de la influencia de la geometría en la eficiencia de disipación de energía cinética se realizará mediante el método LiDAR (Light Detection and Ranging), que permitirá obtener un levantamiento topográfico detallado del Complejo Arqueológico de Tipón y de cada disipador de energía. A partir de los datos en formato .las, se generarán modelos tridimensionales en .stl, los cuales serán convertidos a sólidos para analizar con precisión la forma, dimensiones, pendientes y curvaturas de cada estructura. Este proceso facilitará identificar la relación entre las características geométricas y el comportamiento hidráulico del flujo, determinando cómo la configuración estructural de los disipadores incas influye en la eficiencia de disipación de energía cinética.

4.1.1.1. Caracterización geométrica del Complejo Arqueológico de Tipón mediante tecnología LiDAR

Se realizó los planes de vuelo específicos para cada una de las estructuras hidráulicas seleccionadas para el modelamiento 3D detallado, estos resultados obtenidos del LIDAR se realizó a una altura reducida de entre 10 y 12 metros, durante los planes de vuelo específicos se permitió incrementar considerablemente la resolución espacial y la densidad de puntos que fue un total de 150 pts/m². Esta estrategia mixta aseguró un balance entre cobertura amplia y detalle local, garantizando la calidad de los modelos digitales generados sin comprometer la integridad de las estructuras patrimoniales. El resultado de los puntos obtenidos por el LIDAR fueron los siguientes:

Figura 26

Nube de Puntos Obtenido del Vuelo del LIDAR



Nota. Elaboración Propia

Figura 27

Escaneo LIDAR de todo el Complejo Arqueológico de Tipón



Nota. Elaboración Propia en el programa DJI TERRA

4.1.1.2. Postprocesamiento y Generación del Modelo 3D de los Disipadores

Hidráulicos

Los datos depurados se procesaron en el software Fusion, donde se generó una malla de puntos más estructurada. Este paso incluyó la edición de la malla para corregir inconsistencias, cerrar vacíos y garantizar que la representación del terreno y las estructuras fuera lo más precisa posible. Finalmente, se exportó el modelo como un sólido en formato STL, el cual cumple con los estándares necesarios para ser integrado en el simulador hidrodinámico. Durante todo este proceso, se priorizó la máxima precisión para garantizar que los análisis posteriores reflejaran fielmente las características geométricas y funcionales del sistema hidráulico incaico.

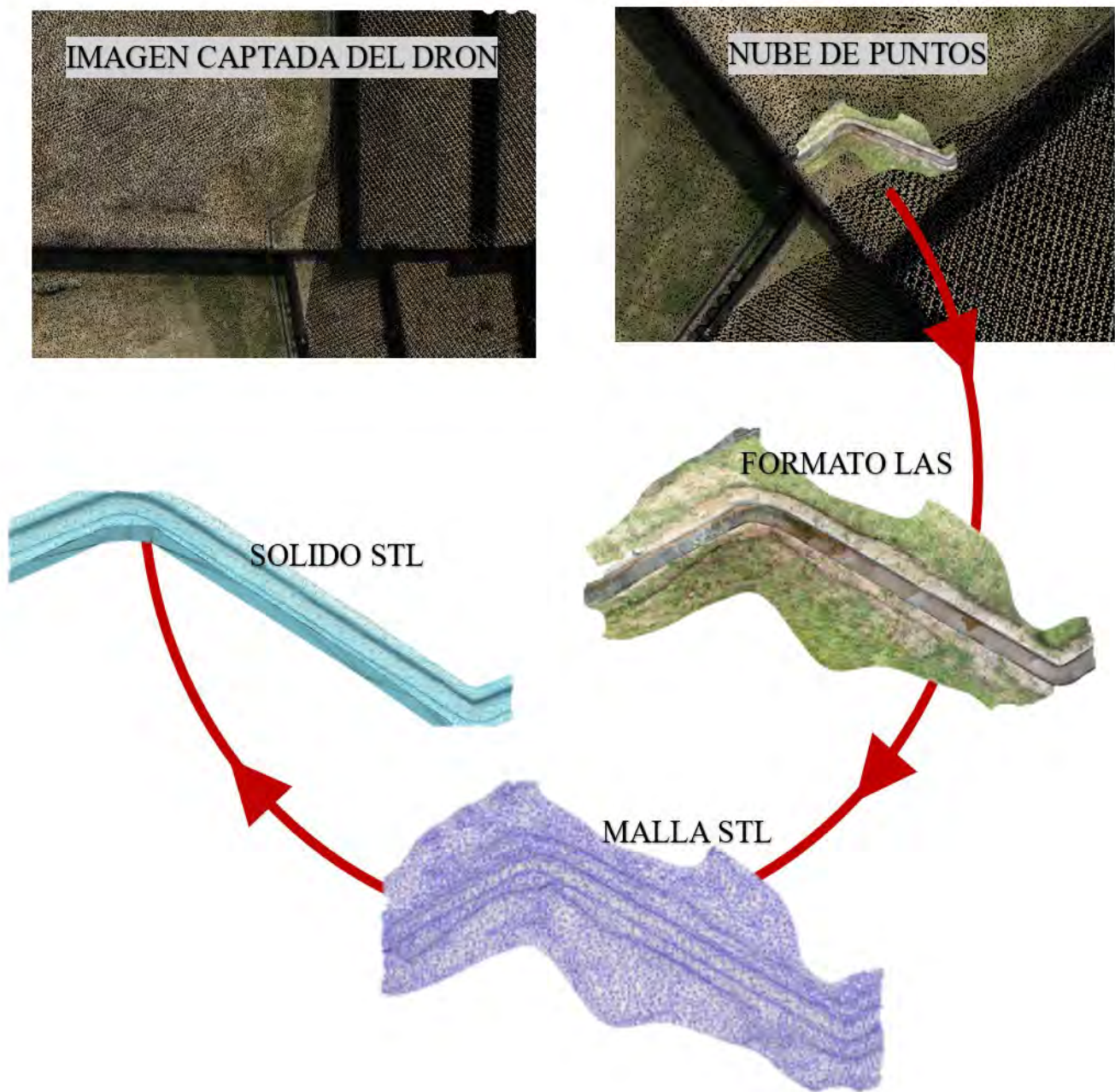
En el presente estudio se ha seleccionado un conjunto representativo de estructuras hidráulicas incas ubicadas en el complejo arqueológico de Tipón, con el propósito de analizar su eficiencia en la disipación de energía cinética mediante modelamiento hidrodinámico tridimensional. Los resultados del procesamiento de los disipadores fueron los siguientes:

4.1.1.2.1. Procesamiento del disipador en forma de S

Canal que presenta un trazado curvilíneo doble (en forma de “S”), diseñado para inducir cambios sucesivos en la dirección del flujo, disminuyendo su velocidad progresivamente.

Figura 28

Procesamiento del dissipador en forma de S



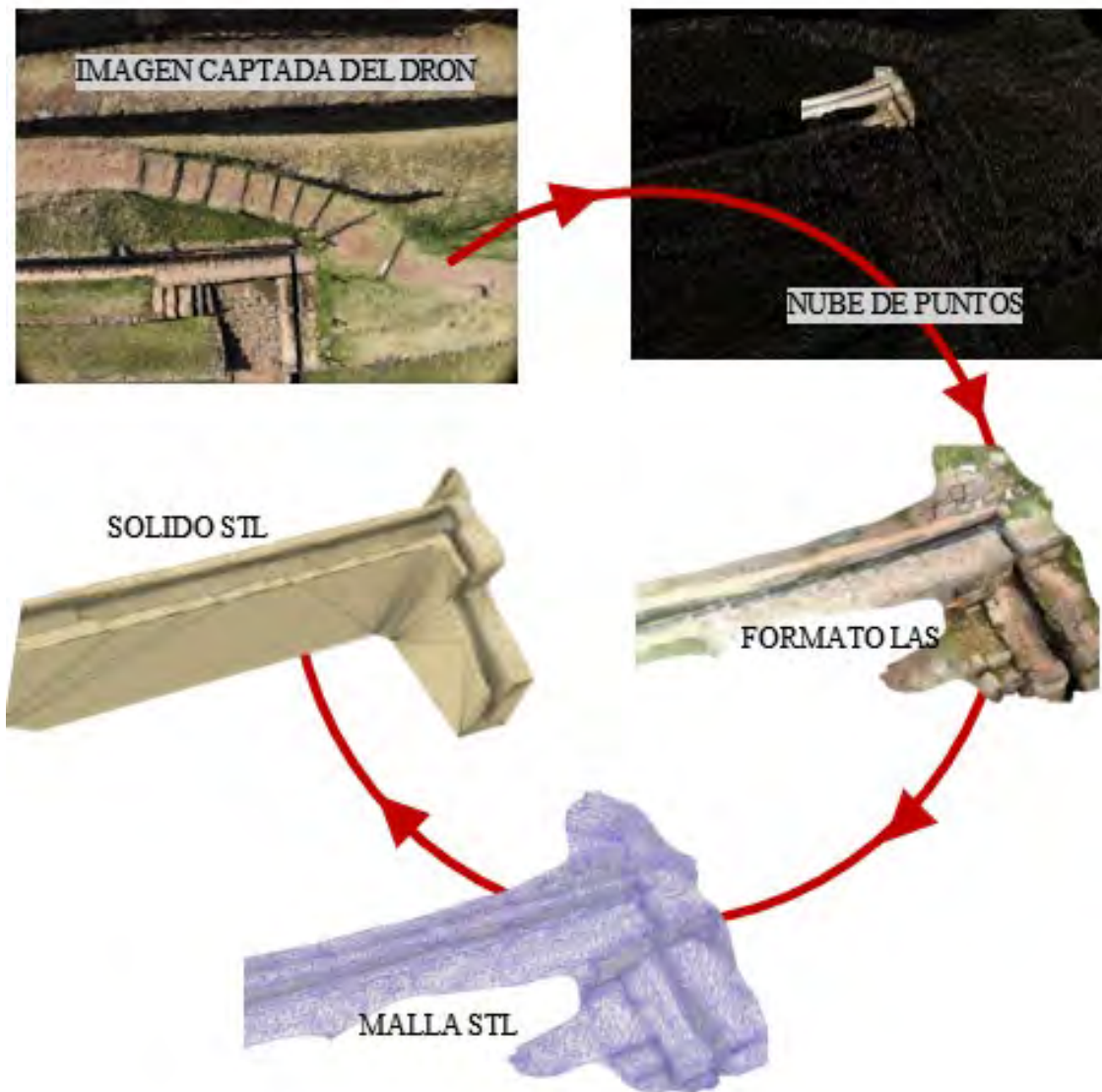
Nota. Elaboración Propia

4.1.1.2.2. *Procesamiento del dissipador en forma de T*

Canal que presenta una bifurcación simétrica del flujo que forma una estructura en forma de “T”, empleada para dividir el caudal hacia dos direcciones perpendiculares e influyendo positivamente en la disipación de energía cinética.

Figura 29

Procesamiento del dissipador en forma de T



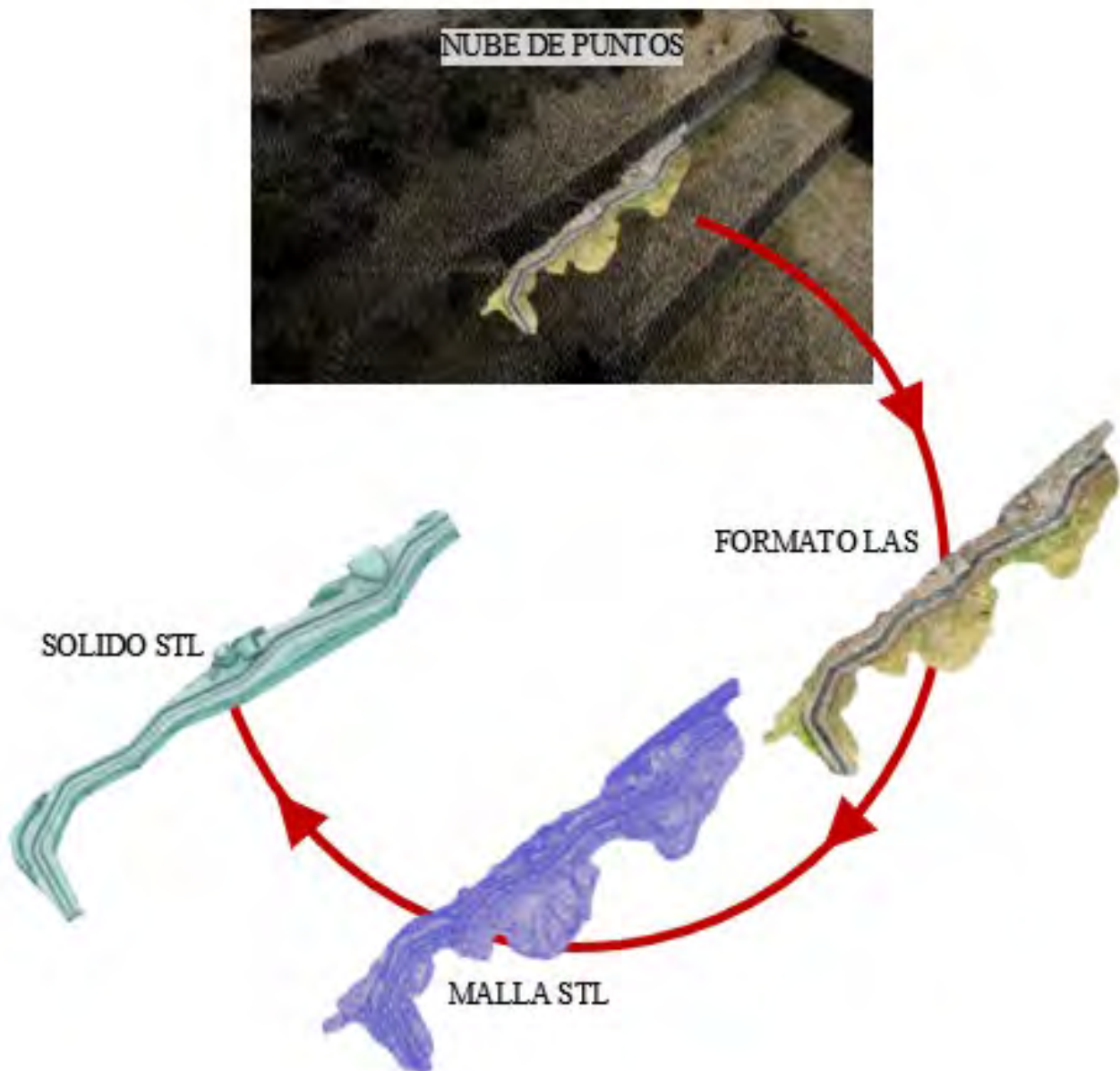
Nota. Elaboración Propia

4.1.1.2.3. Procesamiento del dissipador en forma de Zigzag

Estructura que presenta un trazado angular y sucesivos cambios de dirección, diseñado para reducir la energía del flujo a través del aumento del recorrido hidráulico y la fricción lateral.

Figura 30

Procesamiento del dissipador en forma de Zigzag



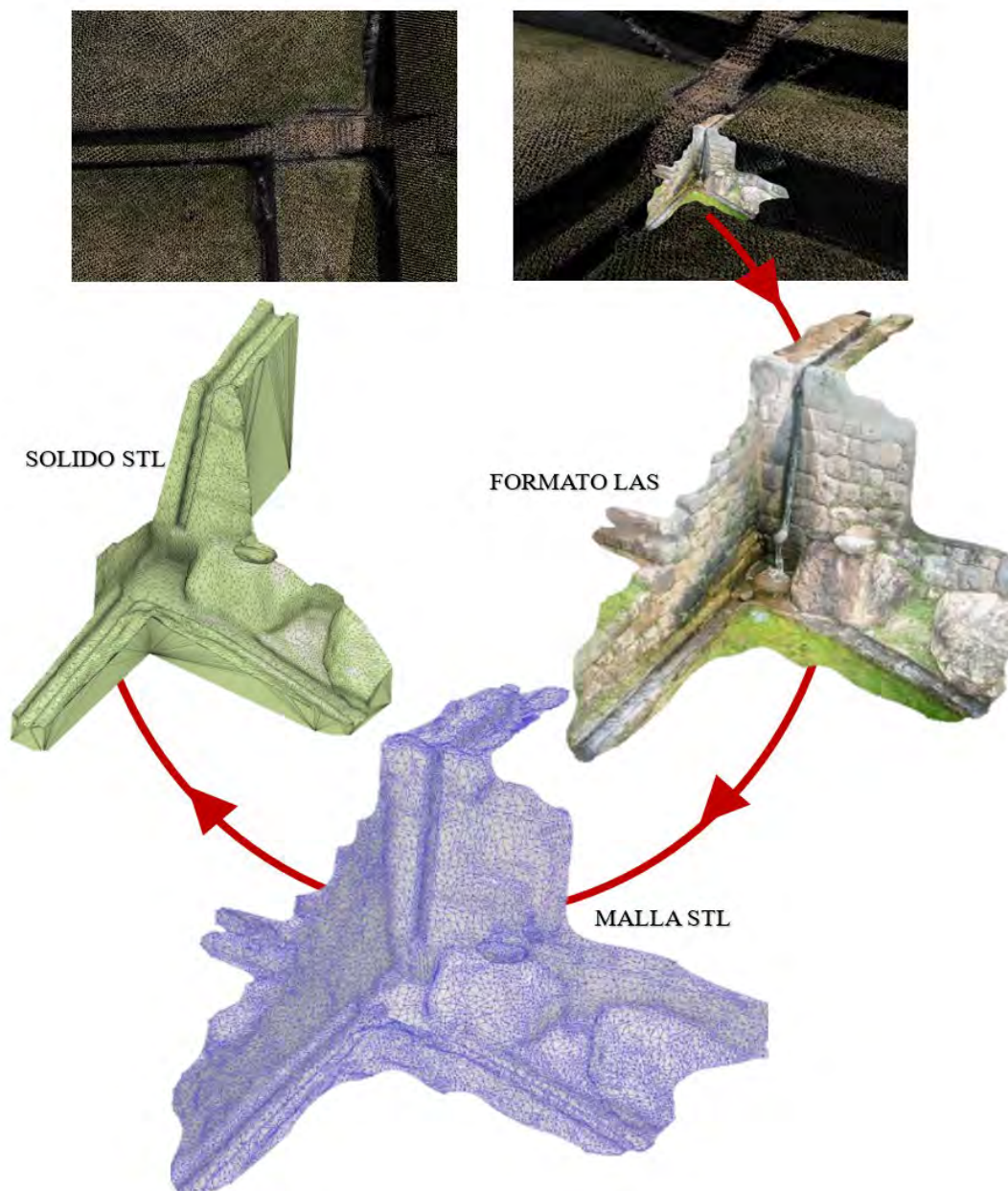
Nota. Elaboración Propia

4.1.1.2.4. *Procesamiento del dissipador caída con doble salida*

Estructura de caída vertical que divide el caudal en dos flujos descendentes, para distribuir el agua y reducir la concentración de energía en un solo punto.

Figura 31

Procesamiento del dissipador caída con doble salida



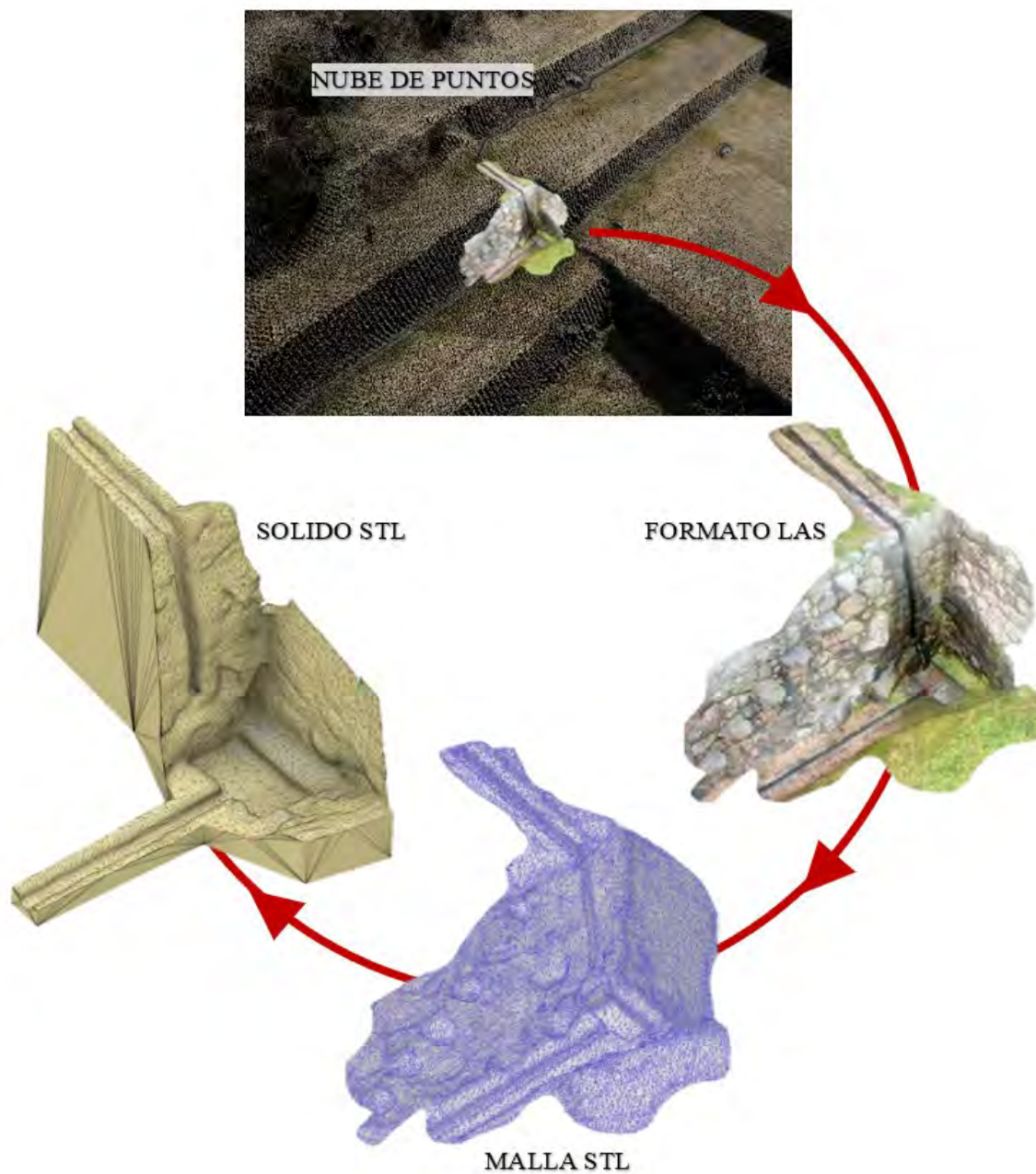
Nota. Elaboración Propia

4.1.1.2.5. *Procesamiento del dissipador caída con entrada recta y salida lateral*

Estructura de descenso hidráulico en la cual el flujo es derivado lateralmente, generando un cambio de dirección que influye en el comportamiento turbulento del agua.

Figura 32

Procesamiento del dissipador caída con entrada recta y salida lateral



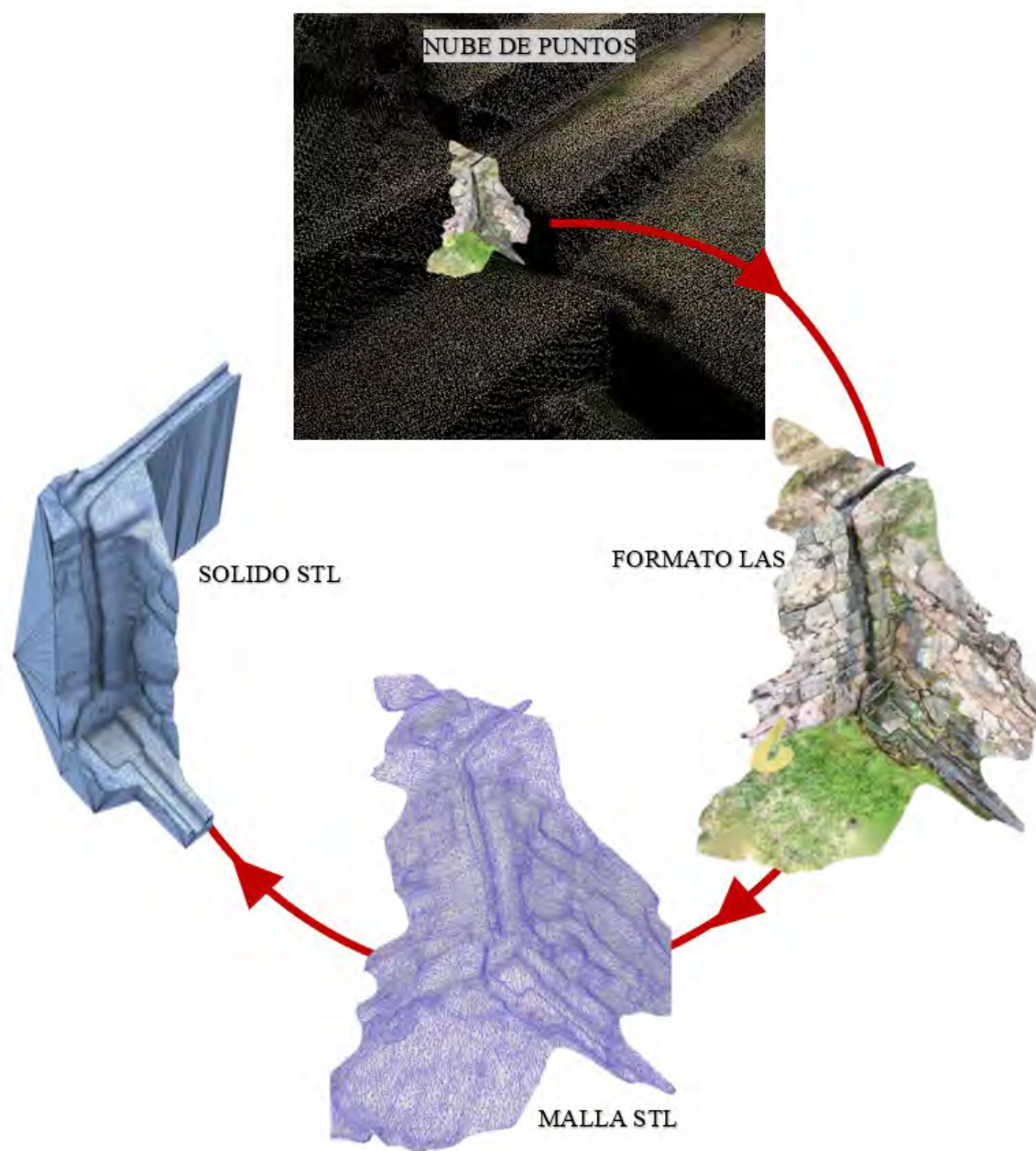
Nota. Elaboración Propia

4.1.1.2.6. *Procesamiento del dissipador caída con entrada lateral y salida recta*

Estructura vertical que descarga el flujo en una cavidad inferior, diseñada para absorber la energía del agua mediante la formación de un cuerpo turbulento estacionario y derivación recta.

Figura 33

Procesamiento del dissipador caída con entrada lateral y salida recta



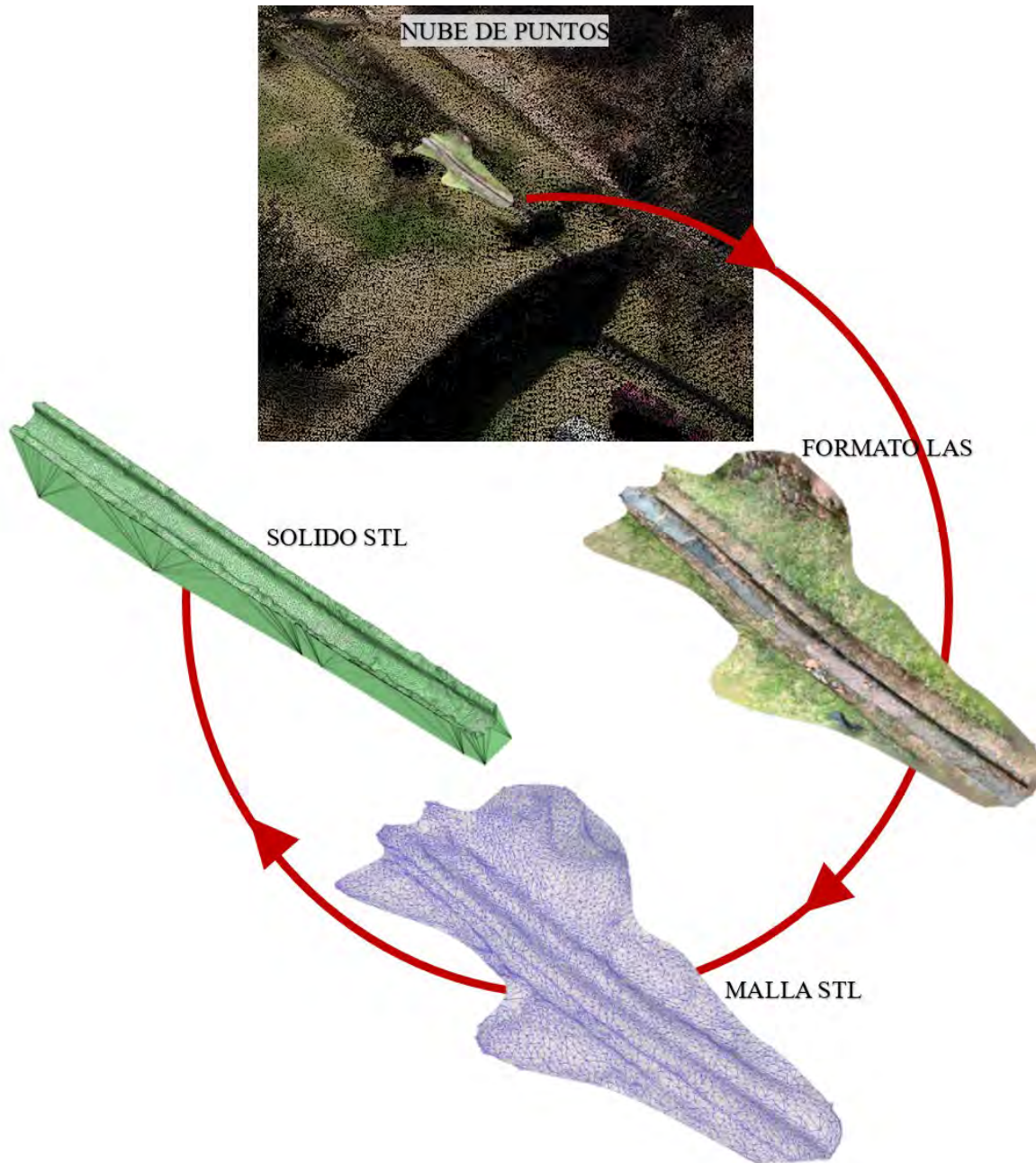
Nota. Elaboración Propia

4.1.1.2.7. Procesamiento del Disipador en pendiente invertida

Estructura cuyo perfil longitudinal presenta una pendiente negativa (ascendente), provocando una disminución de velocidad y una óptima disipación de energía cinética.

Figura 34

Procesamiento del disipador en pendiente invertida



Nota. Elaboración Propia

4.1.2. Determinación de las propiedades del fluido en las estructuras hidráulicas incas de disipación de energía cinética




La determinación de las propiedades del fluido en las estructuras hidráulicas incas de disipación de energía cinética consiste en identificar las características físicas del agua como la densidad, viscosidad y temperatura que influyen en su comportamiento dentro de los canales y disipadores, que será usados como los datos de entrada para la simulación de cada disipador de energía cinética en el software Flow 3D.

4.1.2.1. Determinación de la temperatura del fluido

En todos los disipadores analizados, la temperatura del fluido se mantuvo en un valor promedio de 14 °C, lo que indica un flujo con condiciones térmicas estables y propias de aguas de origen natural en zonas altoandinas. Esta temperatura relativamente baja contribuye a conservar una viscosidad moderada y, por ende, un flujo menos turbulento que en aguas más cálidas. Este resultado evidencia que las estructuras de Tipón permiten una circulación eficiente del agua sin alteraciones térmicas considerables, favoreciendo así un régimen de disipación de energía cinética estable y controlado.

Tabla 5

Cálculo de la temperatura de los disipadores

N	DISIPADOR	TEMPERATURA	FOTOGRAFIA
1	DISIPADOR EN FORMA DE S	14.1°C	
2	DISIPADOR EN FORMA DE T	14.0°C	
3	DISIPADOR EN FORMA DE ZIGZAG	13.9°C	

4 DISIPADOR CON CAIDA CON
DOBLE CAIDA 14.0°C



5 DISIPADOR CON CAIDA CON
ENTRADA RECTA Y SALIDA
LATERAL 14.1°C



6 DISIPADOR CON CAIDA CON
ENTRADA LATERAL Y
SALIDA RECTA 14.0°C



7 DISIPADOR CON PENDIENTE
INVERTIDA 14.1°C



4.1.2.2. Determinación de la densidad del fluido

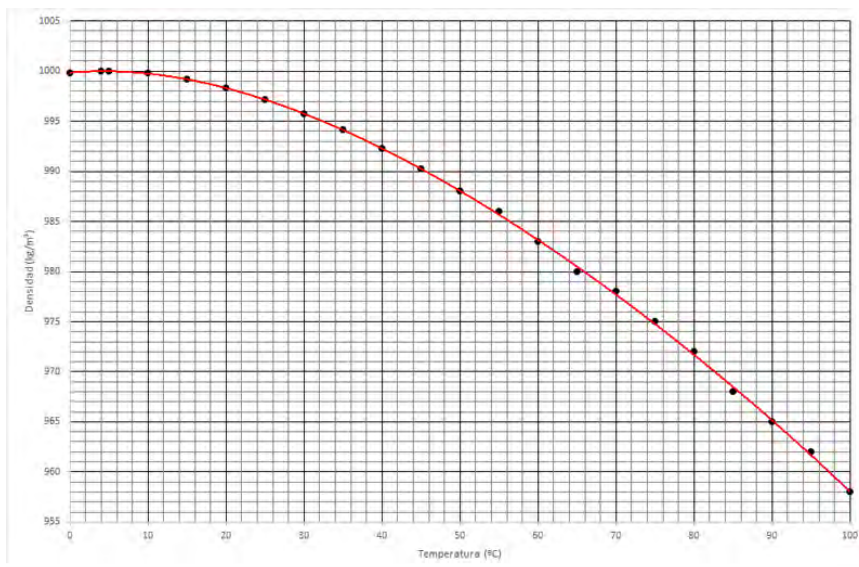
La densidad del fluido representa la masa por unidad de volumen del agua que circula en las estructuras hidráulicas, y es una de las propiedades más importantes para el análisis hidráulico, ya que influye directamente en la energía cinética y en el comportamiento del flujo dentro de los disipadores. A una temperatura promedio de 14 °C, la densidad del agua es aproximadamente usando la fórmula de NIST es de 999,2 kg/m³, valor que será utilizado como dato de entrada en el modelamiento hidráulico con Flow 3D, permitiendo una simulación más realista del comportamiento del fluido bajo las condiciones ambientales del sitio.

Ecuación de densidad del agua en función de la temperatura (formulación NIST 1980–1995).

$$\begin{aligned} \rho(t) = & 999.842594 + (6.793952 \times 10^{-2})t - (9.095290 \times 10^{-3})t^2 \\ & + (1.001685 \times 10^{-4})t^3 - (1.120083 \times 10^{-6})t^4 \\ & + (6.536336 \times 10^{-9})t^5 \end{aligned} \quad (49)$$

Figura 35

Gráfico temperatura vs densidad



Nota. Departamento de física aplicada III, Universidad de Sevilla

4.1.2.3. Determinación de la viscosidad del fluido

En los disipadores analizados, la viscosidad dinámica del fluido alcanzó un valor de 0.00116918 kg/(m·s) a una temperatura de 14 °C, determinado mediante la ecuación empírica de Korson et al. (1969), ampliamente reconocida por su precisión en la estimación de la viscosidad del agua en función de la temperatura. Este valor indica que el fluido presenta una resistencia moderada al esfuerzo cortante, característica de aguas frías que mantienen una cohesión molecular elevada. En consecuencia, el flujo dentro de las estructuras hidráulicas incas se comporta de manera más laminar y estable, reduciendo la pérdida de energía por fricción interna y permitiendo que la disipación de energía cinética dependa principalmente de las condiciones geométricas y rugosas de los canales y disipadores.

Asimismo, este nivel de viscosidad favorece una representación más precisa en la simulación numérica en Flow 3D, ya que influye directamente en los cálculos de turbulencia, en la formación de vórtices y en el comportamiento del flujo sobre superficies irregulares. En conjunto, el valor obtenido constituye un parámetro fundamental de entrada para modelar correctamente el comportamiento hidráulico real de las estructuras incas de Tipón, contribuyendo a un análisis más completo de su eficiencia en la disipación de energía.

Ecuación de Korson

$$\mu = 2.414 \times 10^{-5} \times 10^{\left(\frac{247.8}{T+133.15}\right)} \quad (50)$$

$$\mu = 2.414 \times 10^{-5} \times 10^{\left(\frac{247.8}{14+133.15}\right)}$$

$$\mu = 0.00116918 \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$$

$$\mu = 1.16918 \text{ mPa} \cdot \text{s}$$

4.1.3. Análisis de las características del flujo y su influencia en la eficiencia de disipación de energía cinética

Las características del flujo en la eficiencia de disipación de energía cinética de los disipadores del Complejo Arqueológico de Tipón como el caudal fue determinado mediante el uso de un vertedero, lo que permitió establecer con precisión el volumen de agua que atraviesa cada estructura. La velocidad del flujo se obtuvo utilizando el método LSPIV, registrando el comportamiento superficial del agua en los disipadores, mientras que el tirante fue medido manualmente en distintos puntos representativos de cada estructura. Con estos datos se analizó la variación de la energía antes y después del proceso de disipación, evidenciando que los disipadores presentan un comportamiento eficiente en la reducción de la energía cinética del flujo. Se observó que las diferencias en la velocidad y el tirante están directamente relacionadas con la geometría y rugosidad de cada disipador, demostrando la efectividad del diseño inca para controlar la energía del agua y evitar procesos erosivos aguas abajo.

4.1.3.1. Resultados del caudal con el método del vertedero

Con el fin de caracterizar hidráulicamente el comportamiento del flujo en las estructuras seleccionadas, se realizó una medición de los caudales mediante la instalación temporal de un vertedero de pared gruesa, utilizando la fórmula correspondiente según el tipo de vertedero empleado, lo cual permitió una estimación confiable del caudal en condiciones de régimen permanente, se consideraron dos vertederos con un ancho diferente para casos de canales delgados y gruesos respectivamente.

4.1.3.1.1. Resultados del vertedero en el dissipador en forma de S

Tabla 6

Resultados del análisis del vertedero del dissipador en forma de S

ENTRADA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.32	0.0881	0.63044	0.00487	4.87
SALIDA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.31	0.0873	0.63174	0.00481	4.81

Nota. Elaboración Propia

Figura 36

Realización del método del vertedero en el dissipador en forma de S



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1.2. Resultados del vertedero en el dissipador en forma de T

Tabla 7

Resultados del análisis del vertedero del dissipador en forma de T

ENTRADA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.31	0.135	0.61886	0.00906	9.06
SALIDA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.14	0.1264	0.68193	0.00905	9.05

Nota. Elaboración Propia

Figura 37

Realización del método del vertedero en el dissipador en forma de T



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1.3. Resultados del vertedero en el dissipador en forma de Zigzag

Tabla 8

Resultados del análisis del vertedero del dissipador en forma de Zigzag

ENTRADA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.24	0.0802	0.64433	0.00432	4.32
SALIDA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.255	0.08	0.64195	0.00429	4.29

Nota. Elaboración Propia

Figura 38

Realización del método del vertedero en el dissipador en forma de Zigzag



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1.4. Resultados del vertedero en el dissipador de caída con doble salida

Tabla 9

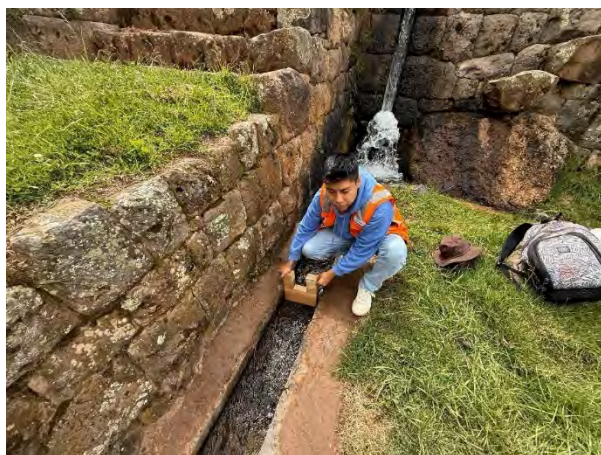
Resultados del análisis del vertedero del dissipador de caída con doble salida

ENTRADA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m ³ /s	l/s
0.10	0.10	0.23	0.1492	0.63226	0.01076	10.76
SALIDA 1						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m ³ /s	l/s
0.10	0.10	0.28	0.077	0.64021	0.00404	4.04
SALIDA 2						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m ³ /s	l/s
0.10	0.10	0.27	0.108	0.62968	0.00660	6.60

Nota. Elaboración Propia

Figura 39

Realización del método del vertedero en el dissipador de caída con doble salida



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1.5. Resultados del vertedero en el dissipador con caída con entrada recta y salida lateral

Tabla 10

Resultados del análisis del vertedero del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral

ENTRADA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.23	0.078	0.64730	0.00416	4.16
SALIDA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.21	0.077	0.65221	0.00411	4.11

Nota. Elaboración Propia

Figura 40

Realización del método del vertedero en el dissipador con caída con entrada recta y salida lateral



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1.6. Resultados del vertedero en el dissipador con caída con entrada lateral y salida recta

Tabla 11

Resultados del análisis del vertedero del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta

ENTRADA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.19	0.0815	0.65604	0.00451	4.51
SALIDA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.185	0.0814	0.65781	0.00451	4.51

Nota. Elaboración Propia

Figura 41

Realización del método del vertedero del canal con caída con entrada lateral y salida recta



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1.7. Resultados del vertedero en el dissipador con pendiente invertida

Tabla 12

Resultados del análisis del vertedero del dissipador con pendiente invertida

ENTRADA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.28	0.1399	0.62238	0.00962	9.62
SALIDA						
Ancho del vertedero(b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	μ	Q	
					m3/s	l/s
0.10	0.10	0.285	0.1393	0.62167	0.00954	9.54

Nota. Elaboración Propia

Figura 42

Realización del método del vertedero del canal con pendiente invertida



Nota. Elaboración Propia

4.1.3.1.8. Validación del Caudal Obtenido por Vertedero mediante Aforo Directo

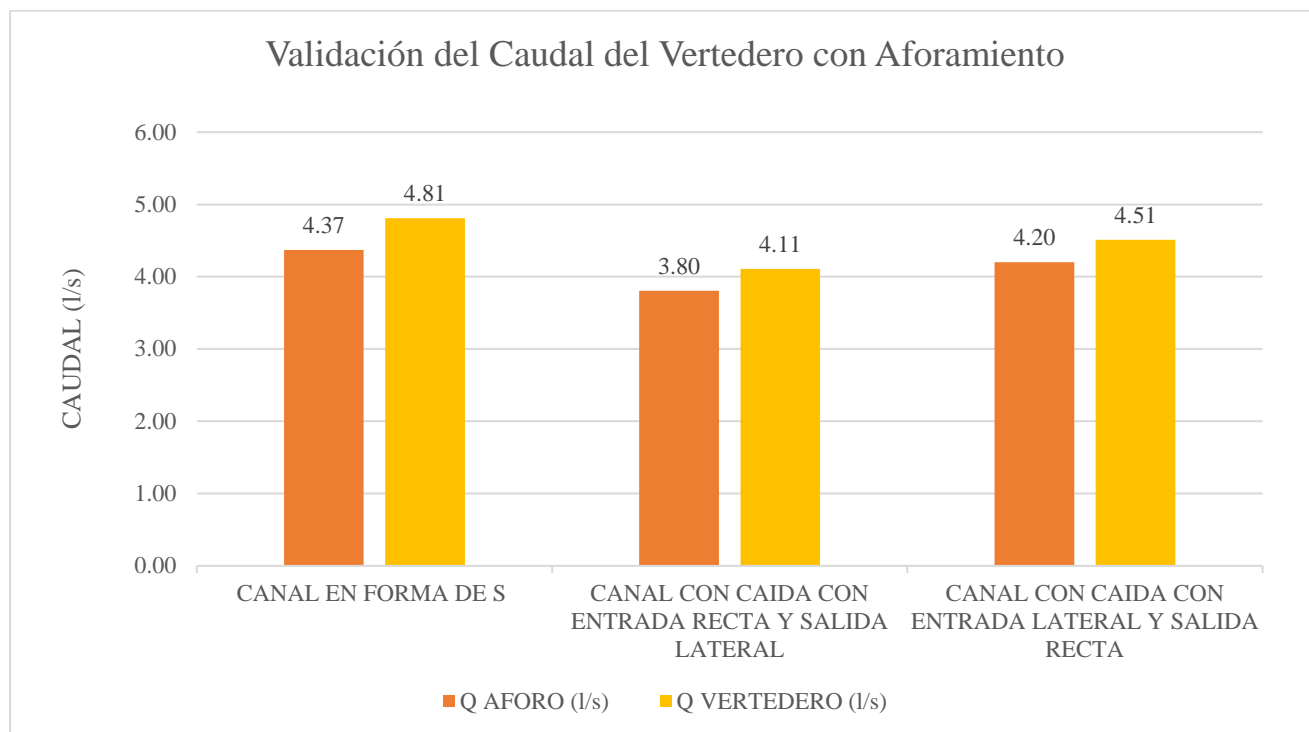
Con el fin de verificar la confiabilidad de los caudales obtenidos mediante el vertedero, se realizará una validación complementaria mediante aforos directos. Para ello se empleará el método volumétrico, midiendo el tiempo de llenado de un recipiente de volumen conocido y calculando el caudal real a partir de la relación volumen sobre tiempo. La comparación entre ambos métodos permitirá identificar la diferencia entre el caudal teórico del vertedero y el caudal medido en campo, garantizando que los valores utilizados en el análisis hidráulico sean consistentes y representativos de las condiciones reales del sistema.

Tabla 13

Validación del Caudal

DISIPADORES AFORADOS (SALIDAS)	VOL RECIPIENTE (l)	TIEMPO (s)			T prom	Q Aforo (l/s)	Q vertedero (l/s)	ERROR
		T1	T2	T3				
CANAL EN FORMA DE S	15.14	3.21	3.43	3.75	3.46	4.37	4.81	9.11%
CANAL CON CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	15.14	3.87	4.12	3.95	3.98	3.80	4.11	7.43%
CANAL CON CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	15.14	3.71	3.68	3.42	3.60	4.20	4.51	6.83%

Nota. Elaboración Propia

Figura 43*Validación del Caudal del Vertedero con Aforamiento**Nota.* Elaboración Propia

La validación del caudal obtenido mediante el método del vertedero se realizó mediante aforos volumétricos en campo, obteniendo discrepancias entre ambos procedimientos dentro de un rango de 6.83% a 9.11%. Estos valores se encuentran por debajo del 10%, considerado aceptable para contrastes experimentales en condiciones reales de flujo en canales abiertos, por lo que se confirma la confiabilidad del método empleado para la estimación del caudal. Cabe señalar que el aforo directo pudo aplicarse únicamente en tres disipadores debido a las limitaciones de accesibilidad para la recolección del agua en balde; sin embargo, los resultados obtenidos en estos puntos fueron consistentes y permiten validar adecuadamente el procedimiento de cálculo adoptado.

4.1.3.2. Resultados de velocidad con el procesamiento de imágenes de superficie (LSPIV) en los disipadores

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante el uso del método LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry), aplicado al análisis del flujo superficial en las estructuras hidráulicas del complejo arqueológico. A partir del procesamiento de las secuencias de video capturadas en campo, se determinaron los campos de velocidad superficial del agua, lo que permitió identificar los patrones de movimiento del flujo en función de la geometría de los canales y disipadores. Estos resultados constituyen una base fundamental para evaluar el comportamiento hidráulico de las estructuras y contrastar los valores experimentales con los obtenidos en el modelamiento computacional.

4.1.3.2.1. Resultados LSPIV del disipador en forma de S – Entrada

Tabla 14

Información del video del LSPIV del disipador en forma de S - Entrada

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR EN FORMA DE S - ENTRADA	3840:2160	0	6.1029	6.1029	1	8.3373

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 16

Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador en forma de S -

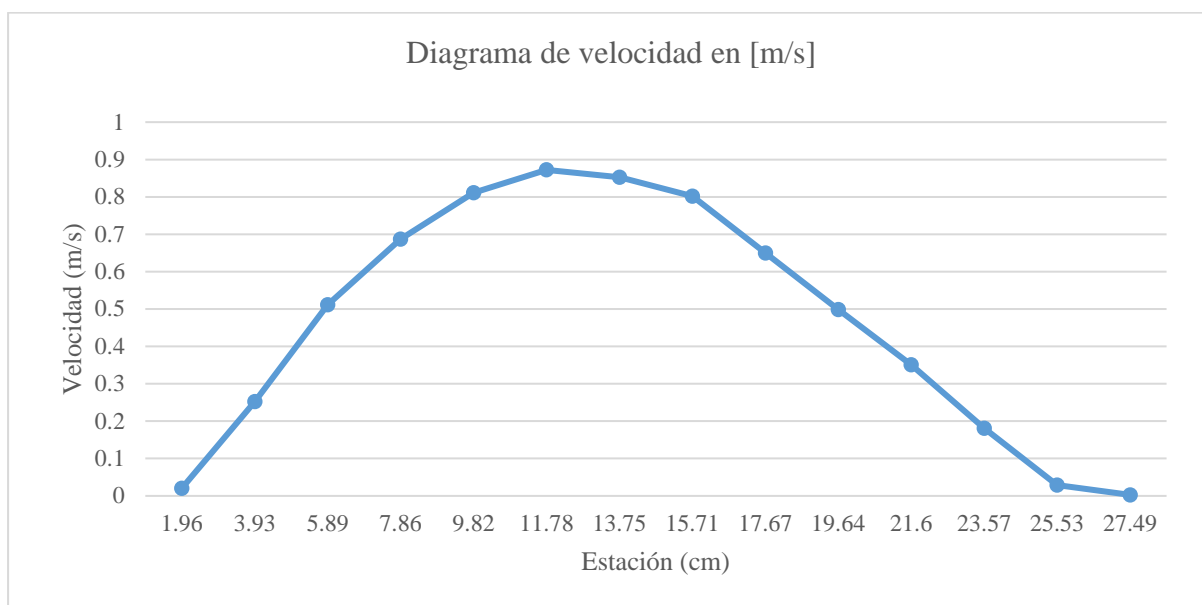
Entrada

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.96	0.0196	0.035	0.000686	0.0203	0.0000139	0.014
3.93	0.0196	0.035	0.000686	0.2525	0.0001732	0.173
5.89	0.0196	0.035	0.000686	0.5116	0.0003510	0.351
7.86	0.0196	0.035	0.000686	0.68668	0.0004711	0.471
9.82	0.0196	0.035	0.000686	0.8115	0.0005567	0.557
11.78	0.0196	0.035	0.000686	0.8722	0.0005983	0.598
13.75	0.0196	0.035	0.000686	0.8525	0.0005848	0.585
15.71	0.0196	0.035	0.000686	0.8018	0.0005500	0.550
17.67	0.0196	0.035	0.000686	0.6498	0.0004458	0.446
19.64	0.0196	0.035	0.000686	0.4983	0.0003418	0.342
21.6	0.0196	0.035	0.000686	0.351	0.0002408	0.241
23.57	0.0196	0.035	0.000686	0.1811	0.0001242	0.124
25.53	0.0196	0.035	0.000686	0.0289	0.0000198	0.020
27.49	0.0196	0.035	0.000686	0.0028	0.0000019	0.002
						4.4734

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 45

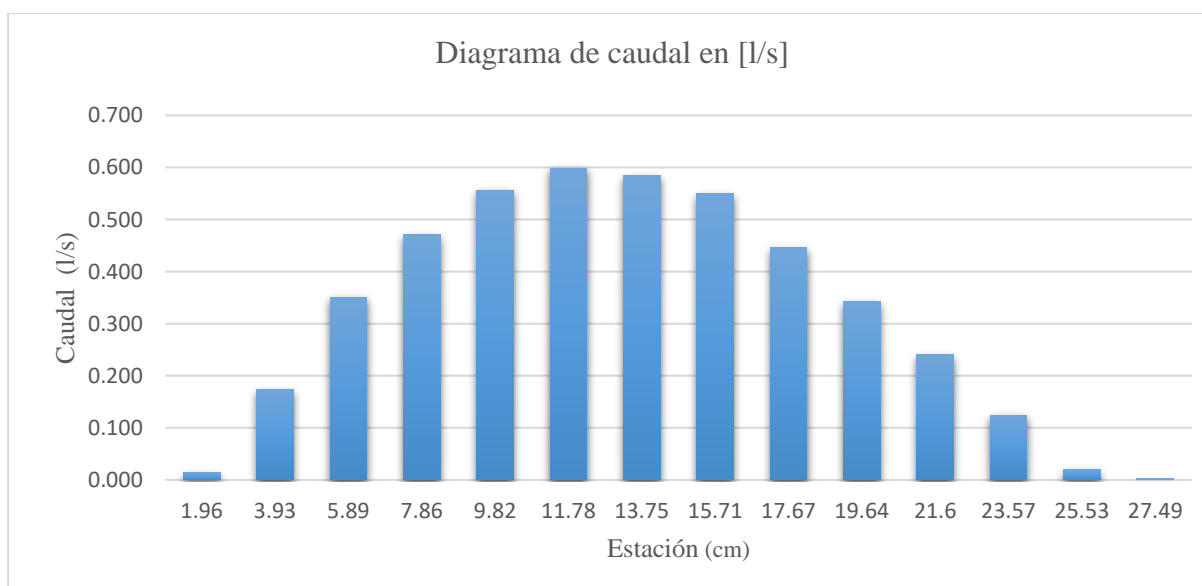
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de S - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 46

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de S - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.2. Resultados LSPIV del dissipador en forma de S - Salida

Tabla 17

Información del video del LSPIV del dissipador en forma de S - Salida

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR EN FORMA DE S - SALIDA	3840:2160	0	11.197	11.197	1	8.3371

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 18

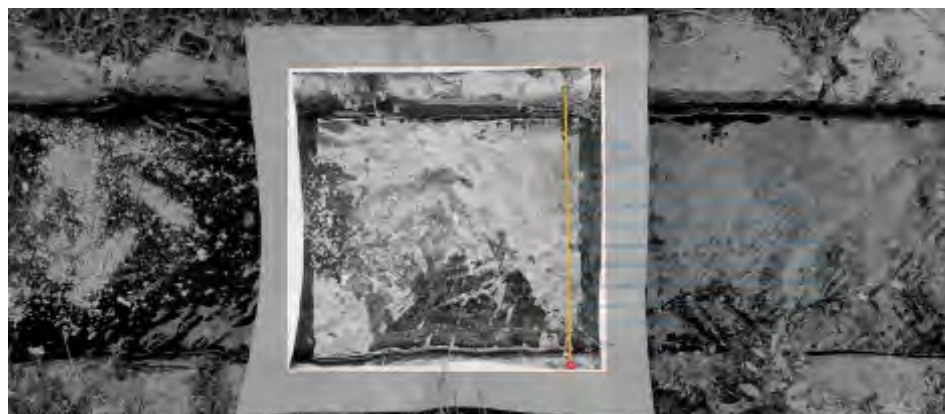
Detalles de medición del LSPIV del dissipador en forma de S - Salida

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR EN FORMA DE S - SALIDA	31	29.41	4369.15

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 47

Sección Transversal del dissipador en forma de S - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 19

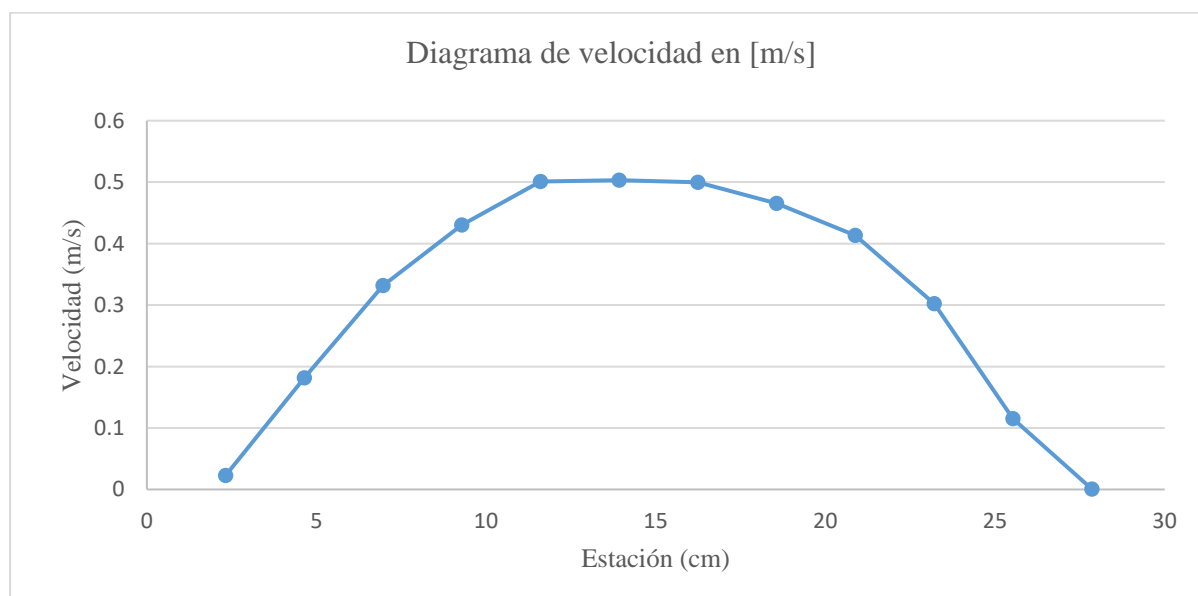
Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador en forma de S - Salida

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Caudal [L/s]
2.32	0.0232	0.05	0.00116	0.022642	0.0000263	0.03
4.64	0.0232	0.05	0.00116	0.181384	0.0002104	0.21
6.96	0.0232	0.05	0.00116	0.331892	0.0003850	0.38
9.28	0.0232	0.05	0.00116	0.430254	0.0004991	0.50
11.6	0.0232	0.05	0.00116	0.500958	0.0005811	0.58
13.92	0.0232	0.05	0.00116	0.503154	0.0005837	0.58
16.24	0.0232	0.05	0.00116	0.499518	0.0005794	0.58
18.56	0.0232	0.05	0.00116	0.465246	0.0005397	0.54
20.88	0.0232	0.05	0.00116	0.413358	0.0004795	0.48
23.21	0.0232	0.05	0.00116	0.30227	0.0003506	0.35
25.53	0.0232	0.05	0.00116	0.11502	0.0001334	0.13
27.85	0.0232	0.05	0.00116	0.00081	0.0000009	0.00
						4.37

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 48

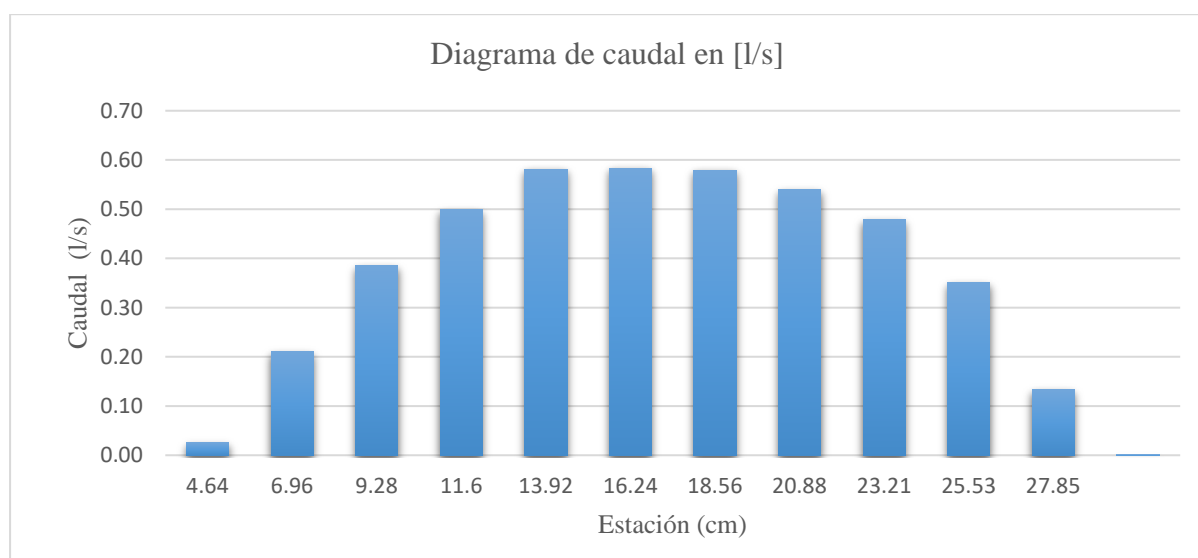
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de S - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 49

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de S - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.3. Resultados LSPIV del disipador en forma de T - Entrada

Tabla 20

Información del video del LSPIV del disipador en forma de T - Entrada

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR EN FORMA DE T - ENTRADA	3840:2160	0	6	6	1	8.3369

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 21

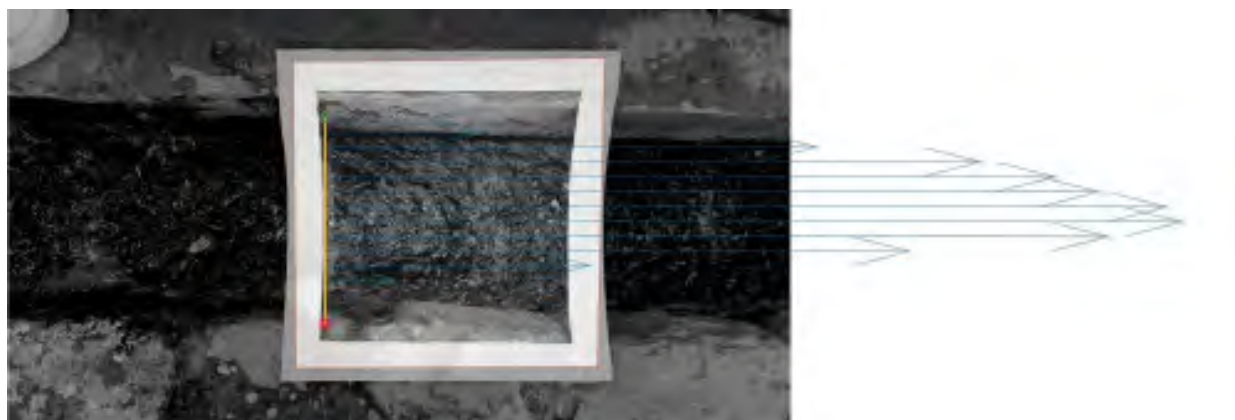
Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de T - Entrada

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR EN FORMA DE T - ENTRADA	31	92.34	8999.48

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 50

Sección Transversal del disipador en forma de T - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 22

Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador en forma de T -

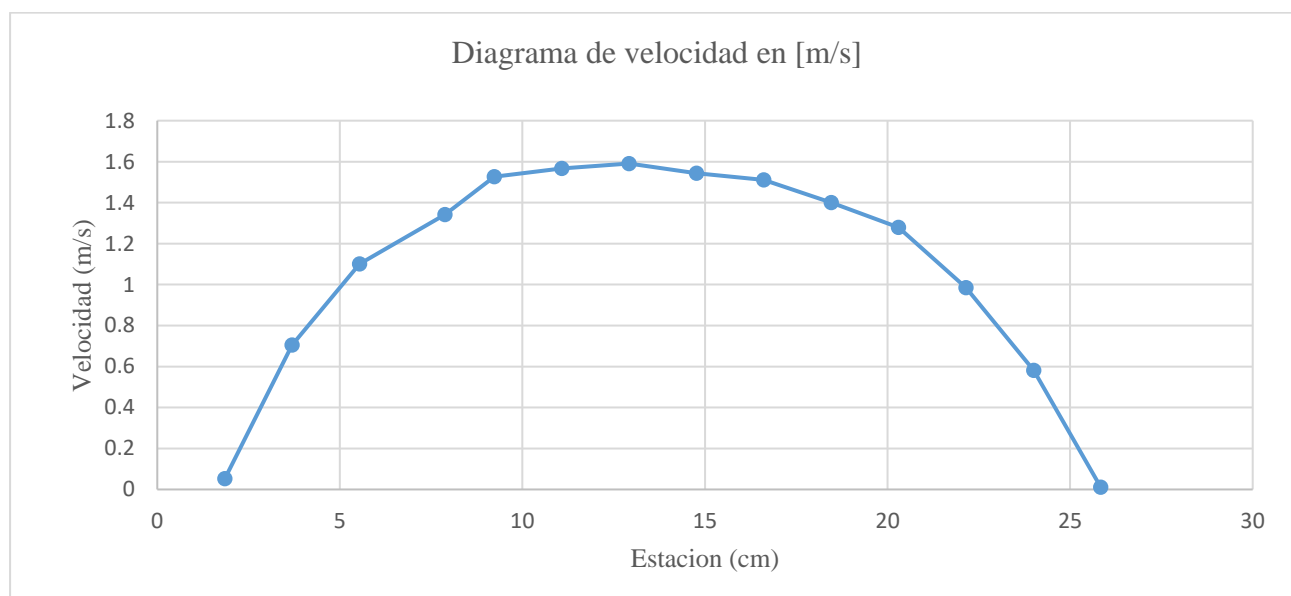
Entrada

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m 2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.85	0.0185	0.032	0.000592	0.05239	0.0000310	0.03
3.69	0.0185	0.032	0.000592	0.70504	0.0004174	0.42
5.54	0.0185	0.032	0.000592	1.10033	0.0006514	0.65
7.88	0.0185	0.032	0.000592	1.34134	0.0007941	0.79
9.23	0.0185	0.032	0.000592	1.52658	0.0009037	0.90
11.08	0.0185	0.032	0.000592	1.5665	0.0009274	0.93
12_92	0.0185	0.032	0.000592	1.5908	0.0009418	0.94
14.77	0.0185	0.032	0.000592	1.54297	0.0009134	0.91
16.61	0.0185	0.032	0.000592	1.51059	0.0008943	0.89
18.46	0.0185	0.032	0.000592	1.40078	0.0008293	0.83
20.3	0.0185	0.032	0.000592	1.27903	0.0007572	0.76
22.15	0.0185	0.032	0.000592	0.98498	0.0005831	0.58
24	0.0185	0.032	0.000592	0.58058	0.0003437	0.34
25.84	0.035	0.032	0.00112	0.01053	0.0000118	0.01
						9.00

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 51

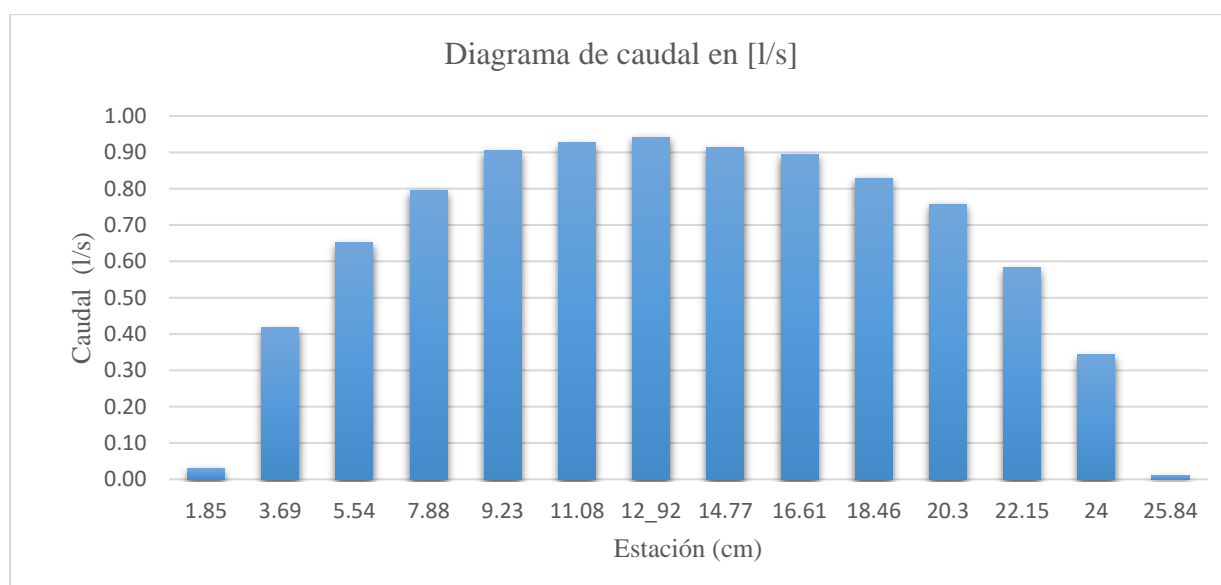
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de T - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 52

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de T - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.4. Resultados LSPIV del disipador en forma de T - Salida

Tabla 23

Información del video del LSPIV del disipador en forma de T - Salida

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR EN FORMA DE T - SALIDA	3840:2160	0	10.438	10.438	1	8.3373

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 24

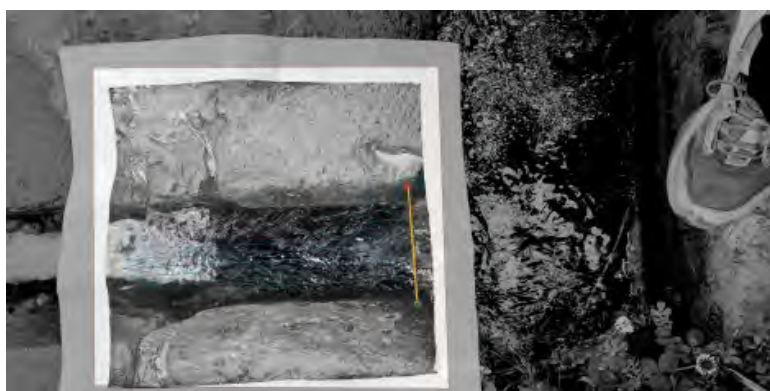
Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de T - Salida

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR EN FORMA DE T - SALIDA	14	27.19	5449.98

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 53

Sección Transversal del disipador en forma de T - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

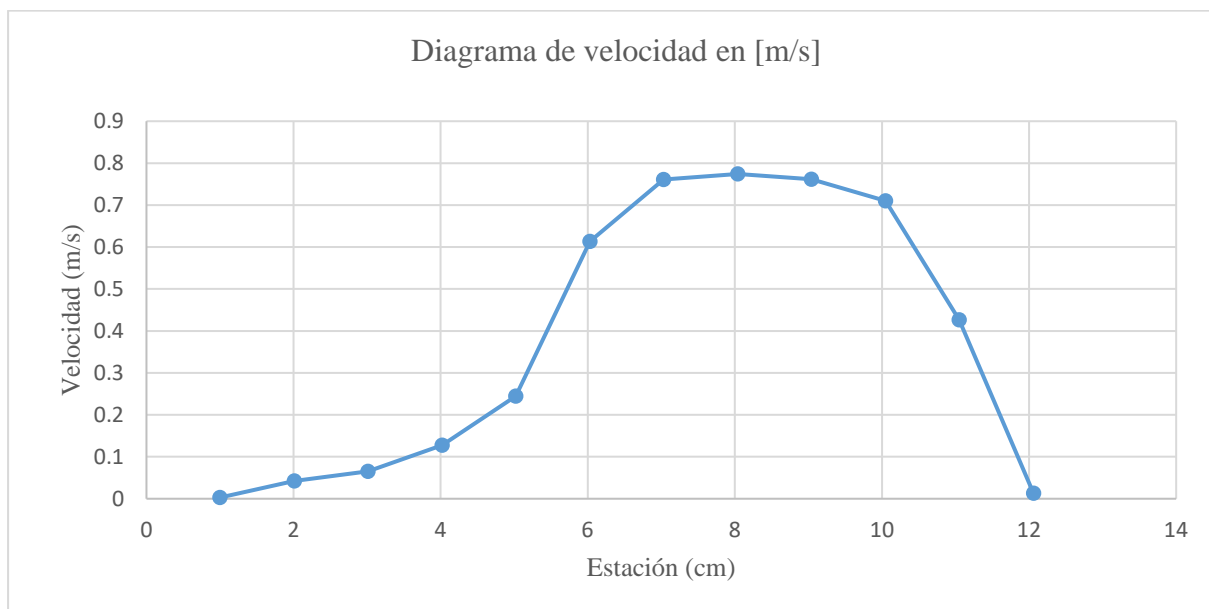
Tabla 25*Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador en forma de T - Salida*

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Caudal [l/s]
1	0.01	0.12	0.0012	0.00288	0.000003	0.00
2.01	0.01	0.12	0.0012	0.04224	0.000051	0.05
3.01	0.01	0.12	0.0012	0.06528	0.000078	0.08
4.02	0.01	0.12	0.0012	0.12744	0.000153	0.15
5.02	0.01	0.12	0.0012	0.2448	0.000294	0.29
6.03	0.01	0.12	0.0012	0.6132	0.000736	0.74
7.03	0.01	0.12	0.0012	0.76104	0.000913	0.91
8.04	0.01	0.12	0.0012	0.77424	0.000929	0.93
9.04	0.01	0.12	0.0012	0.76152	0.000914	0.91
10.05	0.01	0.12	0.0012	0.7102	0.000852	0.85
11.05	0.01	0.12	0.0012	0.42624	0.000511	0.51
12.06	0.0097	0.12	0.001164	0.01296	0.000015	0.02
						5.45

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 54

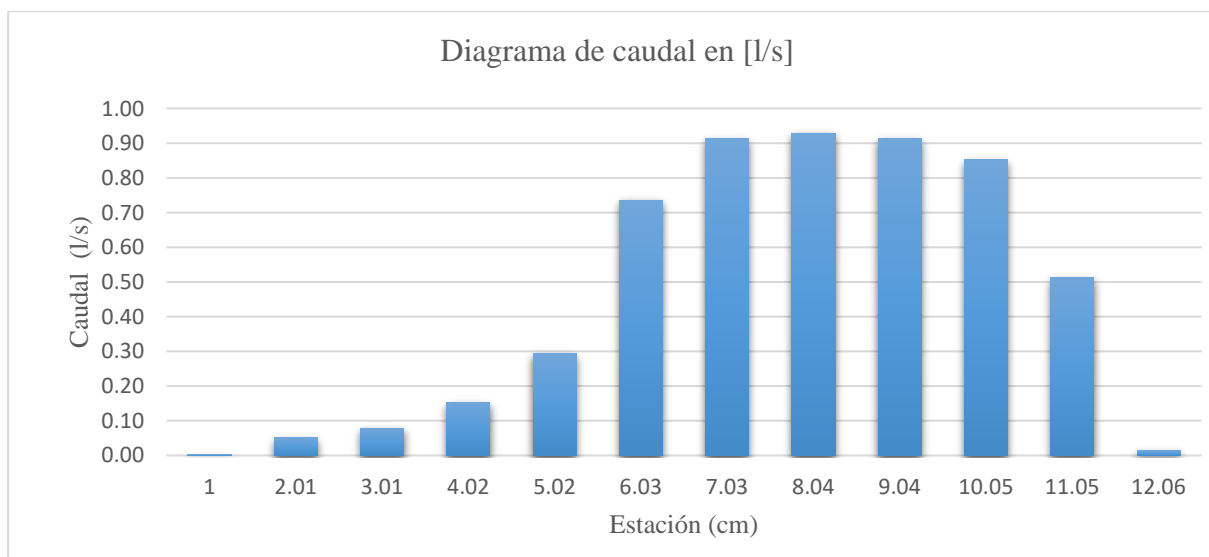
Diagrama de velocidad del LSPIV del disipador en forma de T - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 55

Diagrama de caudal del LSPIV del disipador en forma de T - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.5. Resultados LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Entrada

Tabla 26

Información del video del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Entrada

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR EN FORMA DE ZIGZAG - ENTRADA	3840:2160	1	6	5	1	8.3373

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 27

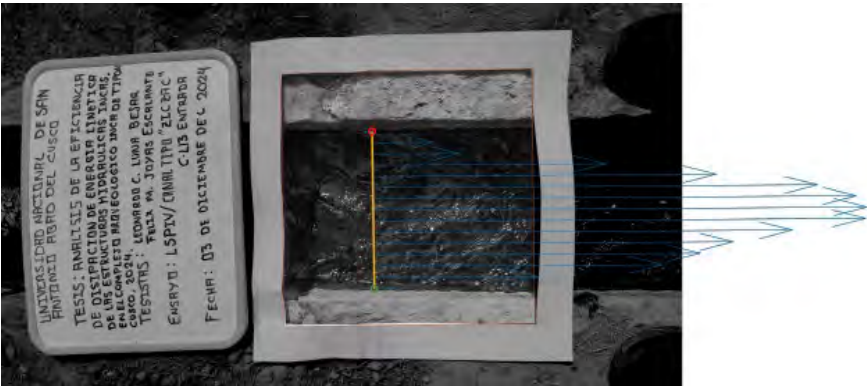
Detalles de medición del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Entrada

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm3/s)
DISIPADOR EN FORMA DE ZIGZAG - ENTRADA	24	41.35	2892.93

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 56

Sección Transversal del dissipador en forma de Zigzag - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 28

Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag -

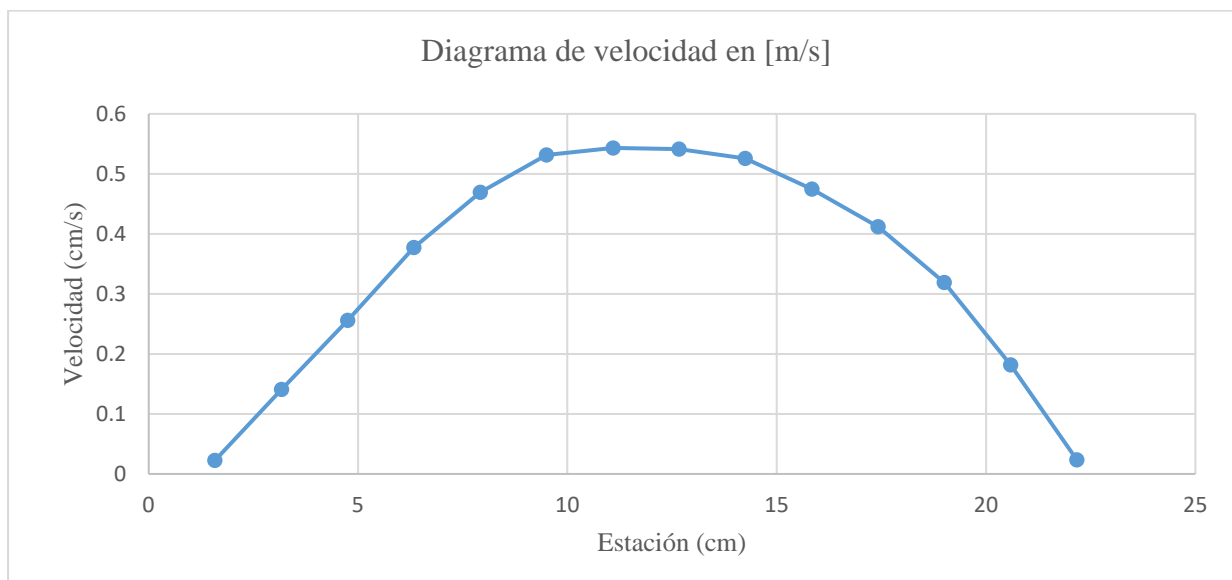
Entrada

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Caudal [l/s]
1.58	0.0158	0.038	0.0006004	0.022438	0.0000135	0.01
3.17	0.0158	0.038	0.0006004	0.140816	0.0000845	0.08
4.75	0.0158	0.038	0.0006004	0.25597	0.0001537	0.15
6.33	0.0158	0.038	0.0006004	0.377182	0.0002265	0.23
7.92	0.0158	0.038	0.0006004	0.469138	0.0002817	0.28
9.5	0.0158	0.038	0.0006004	0.531414	0.0003191	0.32
11.09	0.0158	0.038	0.0006004	0.54327	0.0003262	0.33
12.67	0.0158	0.038	0.0006004	0.541398	0.0003251	0.33
14.25	0.0158	0.038	0.0006004	0.525798	0.0003157	0.32
15.84	0.0158	0.038	0.0006004	0.474474	0.0002849	0.28
17.42	0.0158	0.038	0.0006004	0.412126	0.0002474	0.25
19	0.0158	0.038	0.0006004	0.31902	0.0001915	0.19
20.59	0.0158	0.038	0.0006004	0.181896	0.0001092	0.11
22.17	0.0158	0.038	0.0006004	0.0234	0.0000140	0.01
						2.89

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 57

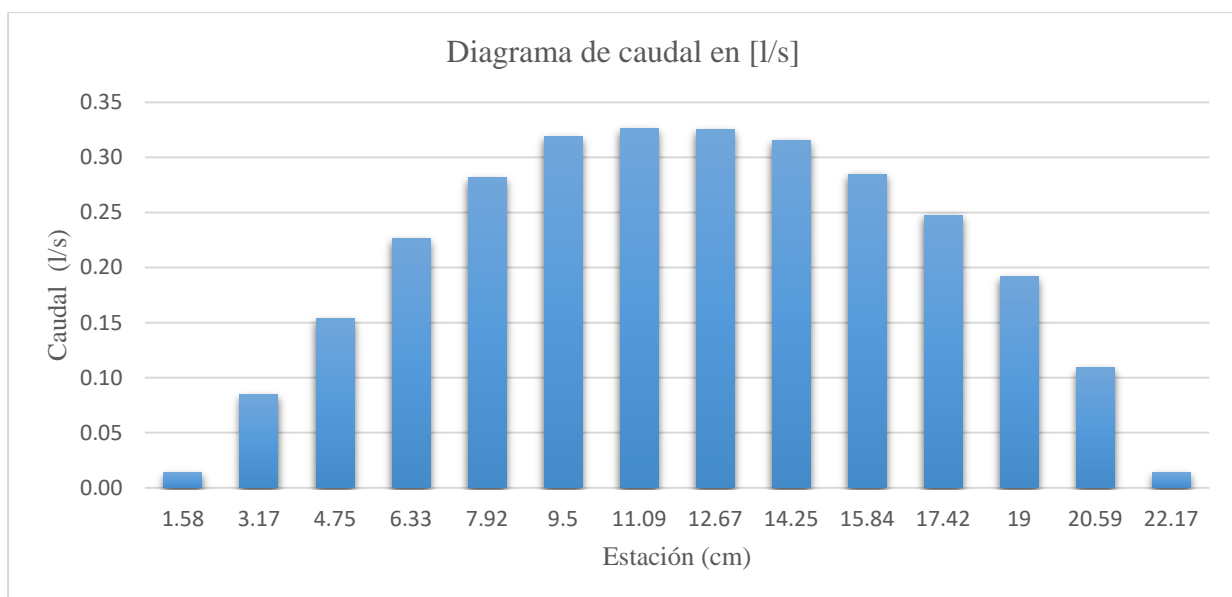
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 58

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.6. Resultados LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida

Tabla 29

Información del video del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR EN FORMA DE ZIGZAG - SALIDA	3840:2160	0	6	6	1	8.3373

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 30

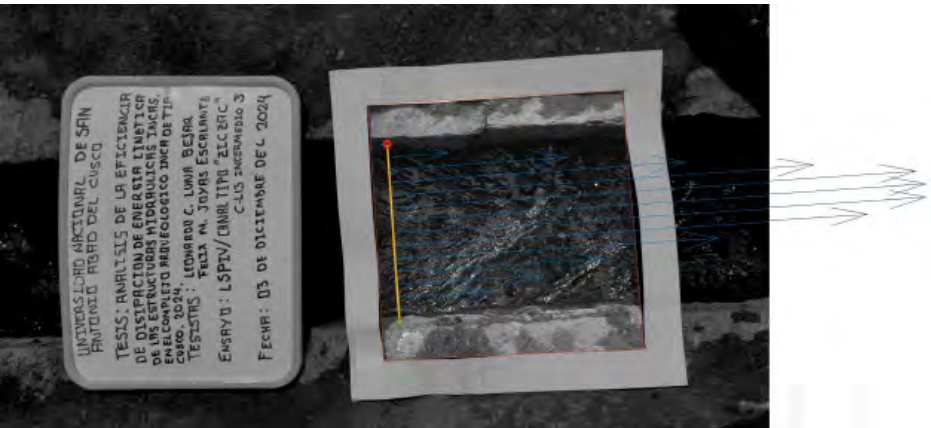
Detalles de medición del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm3/s)
DISIPADOR EN FORMA DE ZIGZAG - SALIDA	25	37.42	2646.14

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 59

Sección Transversal del disipador en forma de Zigzag - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 31

Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador en forma de Zigzag -

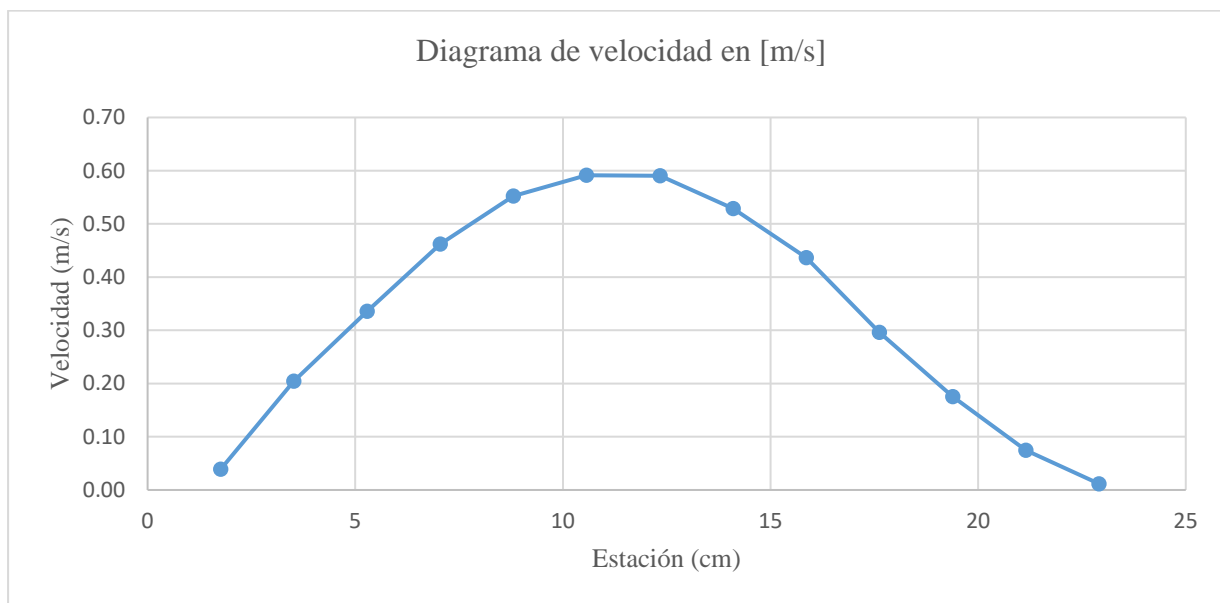
Salida

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.76	0.0176	0.035	0.000616	0.03896	0.0000240	0.02
3.52	0.0176	0.035	0.000616	0.20420	0.0001258	0.13
5.29	0.0176	0.035	0.000616	0.33588	0.0002069	0.21
7.05	0.0176	0.035	0.000616	0.46211	0.0002847	0.28
8.81	0.0176	0.035	0.000616	0.55212	0.0003401	0.34
10.57	0.0176	0.035	0.000616	0.59136	0.0003643	0.36
12.34	0.0176	0.035	0.000616	0.59034	0.0003636	0.36
14.1	0.0176	0.035	0.000616	0.52874	0.0003257	0.33
15.86	0.0176	0.035	0.000616	0.43673	0.0002690	0.27
17.62	0.0176	0.035	0.000616	0.29596	0.0001823	0.18
19.39	0.0176	0.035	0.000616	0.17513	0.0001079	0.11
21.15	0.0176	0.035	0.000616	0.07466	0.0000460	0.05
22.91	0.0143	0.035	0.0005005	0.01168	0.0000058	0.01
						2.65

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 60

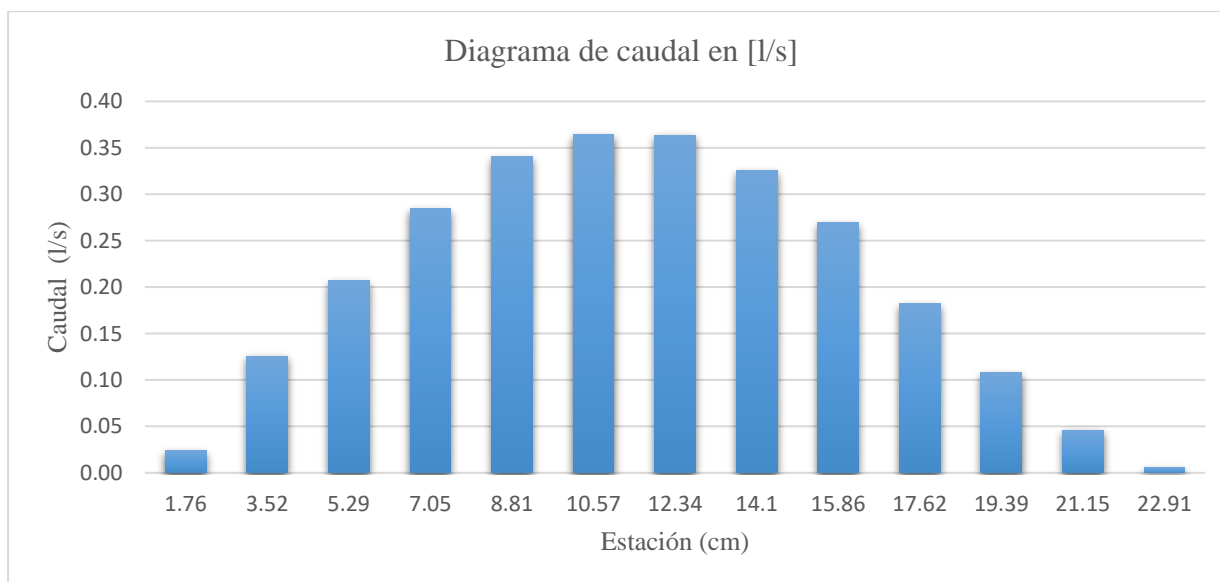
Diagrama de velocidad del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 61

Diagrama de caudal del LSPIV del disipador en forma de Zigzag - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.7. Resultados LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada

Tabla 32

Información del video del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR CON CAÍDA CON DOBLE SALIDA - ENTRADA	3840:2160	1	11	10	1	8.3371

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 33

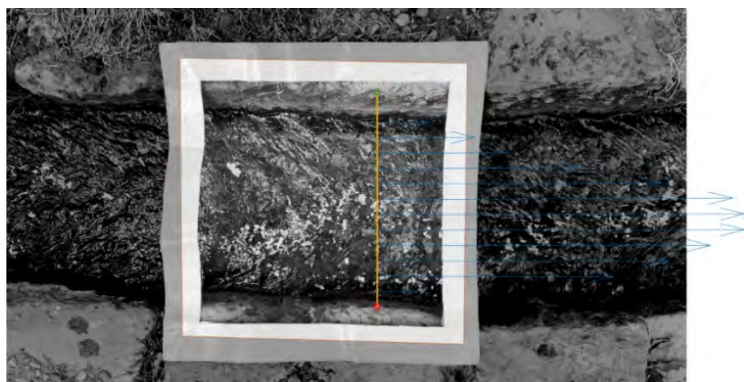
Detalles de medición del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR CON CAÍDA CON DOBLE SALIDA - ENTRADA	23	44.05	9970.55

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 62

Sección Transversal del dissipador con caída con doble salida - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 34

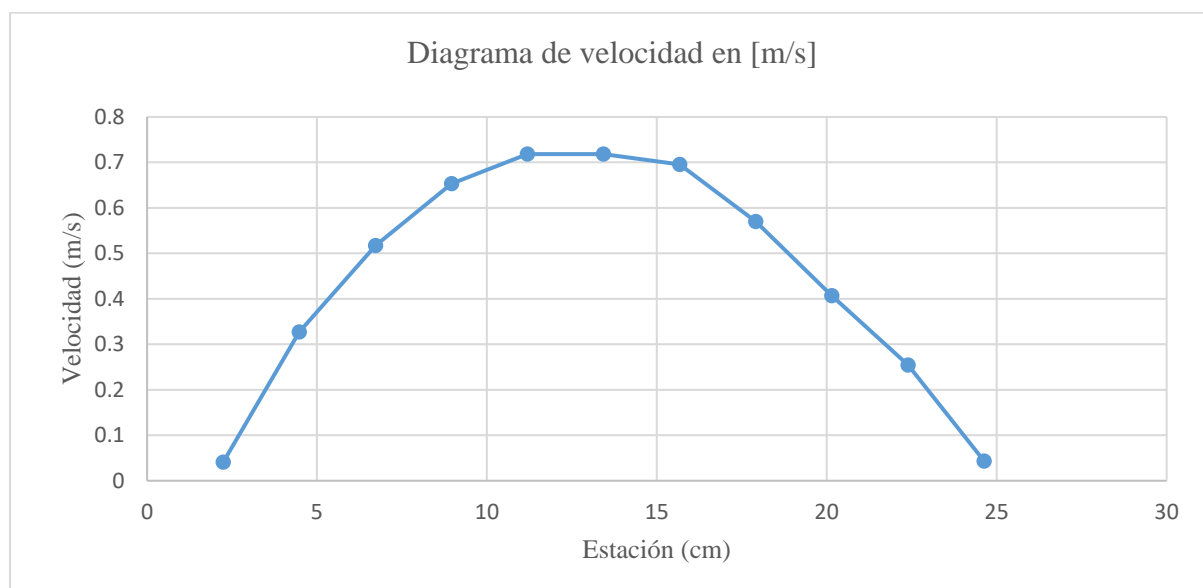
Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Caudal [l/s]
2.24	0.0224	0.09	0.002016	0.040848	0.000082	0.08
4.48	0.0224	0.09	0.002016	0.327198	0.000660	0.66
6.72	0.0224	0.09	0.002016	0.517500	0.001043	1.04
8.96	0.0224	0.09	0.002016	0.653154	0.001317	1.32
11.19	0.0224	0.09	0.002016	0.718290	0.001448	1.45
13.43	0.0224	0.09	0.002016	0.718290	0.001448	1.45
15.67	0.0224	0.09	0.002016	0.695658	0.001402	1.40
17.91	0.0224	0.09	0.002016	0.570142	0.001149	1.15
20.15	0.0224	0.09	0.002016	0.407238	0.000821	0.82
22.39	0.0224	0.09	0.002016	0.254196	0.000512	0.51
24.63	0.0224	0.09	0.002016	0.043194	0.000087	0.09
						9.97

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 63

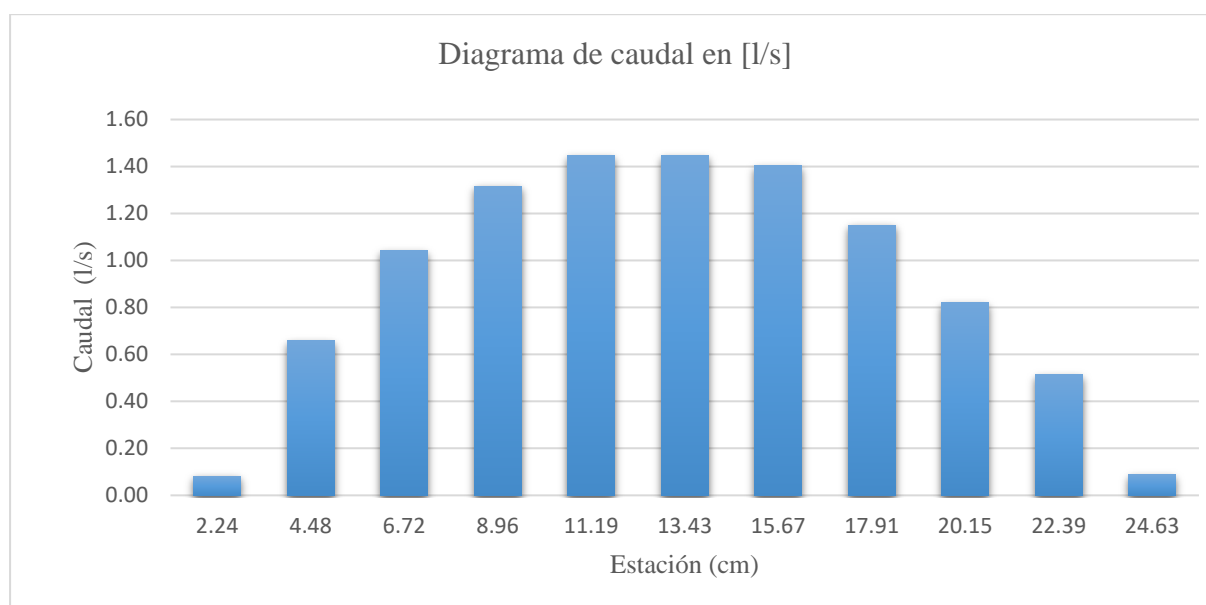
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 64

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.8. Resultados LSPIV del dissipador con caída con doble salida – Salida

Tabla 35

Información del video del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Salida

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR CON CAÍDA CON DOBLE SALIDA – SALIDA	3840:2160	0	7.5283	7.5283	1	8.337

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 36

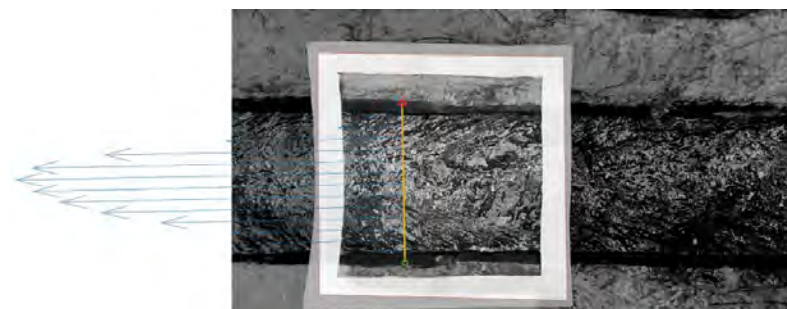
Detalles de medición del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Salida

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR CON CAÍDA CON DOBLE SALIDA - SALIDA	28	47.45	4125.60

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 65

Sección Transversal del dissipador con caída con doble salida - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 37

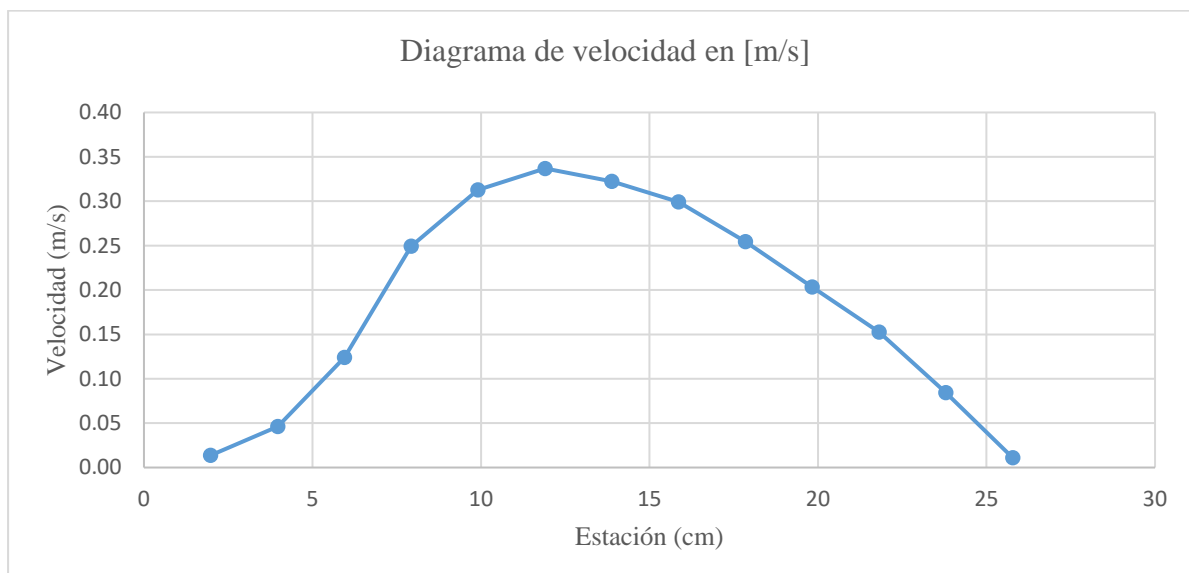
Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Salida

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m 2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.98	0.0198	0.09	0.001782	0.01360	0.000024	0.02
3.97	0.0198	0.09	0.001782	0.04625	0.000082	0.08
5.95	0.0198	0.09	0.001782	0.12415	0.000221	0.22
7.93	0.0198	0.09	0.001782	0.24940	0.000444	0.44
9.91	0.0198	0.09	0.001782	0.31265	0.000557	0.56
11.9	0.0198	0.09	0.001782	0.33690	0.000600	0.60
13.88	0.0198	0.09	0.001782	0.32250	0.000575	0.57
15.86	0.0198	0.09	0.001782	0.29925	0.000533	0.53
17.85	0.0198	0.09	0.001782	0.25450	0.000454	0.45
19.83	0.0198	0.09	0.001782	0.20335	0.000362	0.36
21.81	0.0198	0.09	0.001782	0.15260	0.000272	0.27
23.79	0.0198	0.09	0.001782	0.08445	0.000150	0.15
25.78	0.0298	0.09	0.002682	0.01090	0.000029	0.03
						4.13

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 66

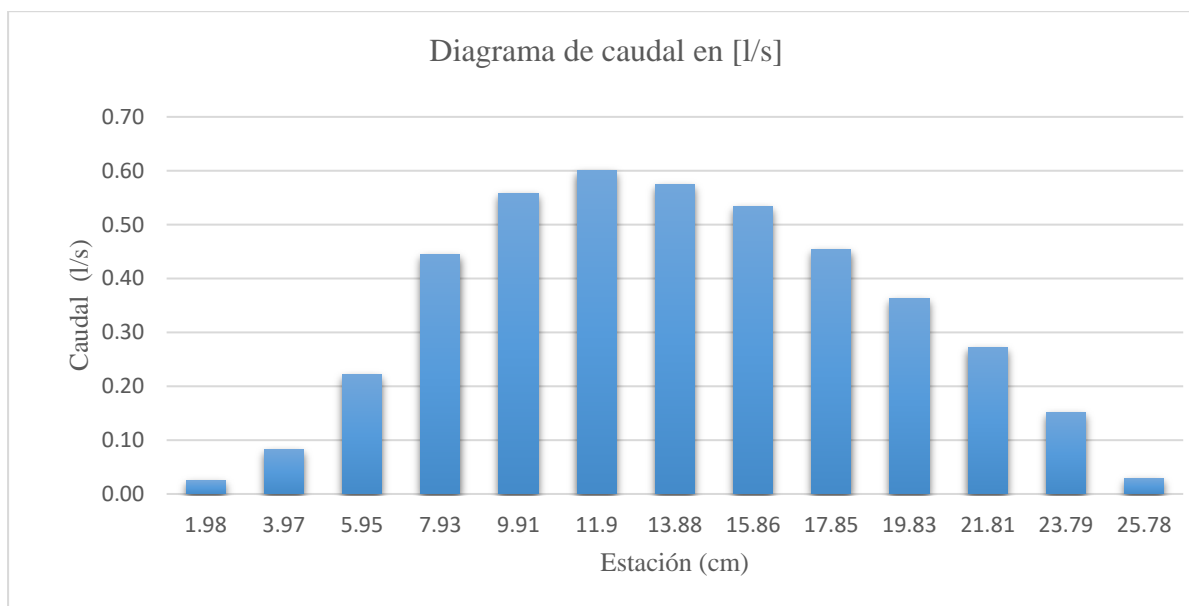
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 67

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con doble salida - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.9. Resultados LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral

- Entrada

Tabla 38

Información del video del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral -

Entrada

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR CON CAÍDA CON ENTRADA RECTAY SALIDA LATERAL - ENTRADA	3840:2160	0	5.8442	5.8442	1	8.3369

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 39

Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral -

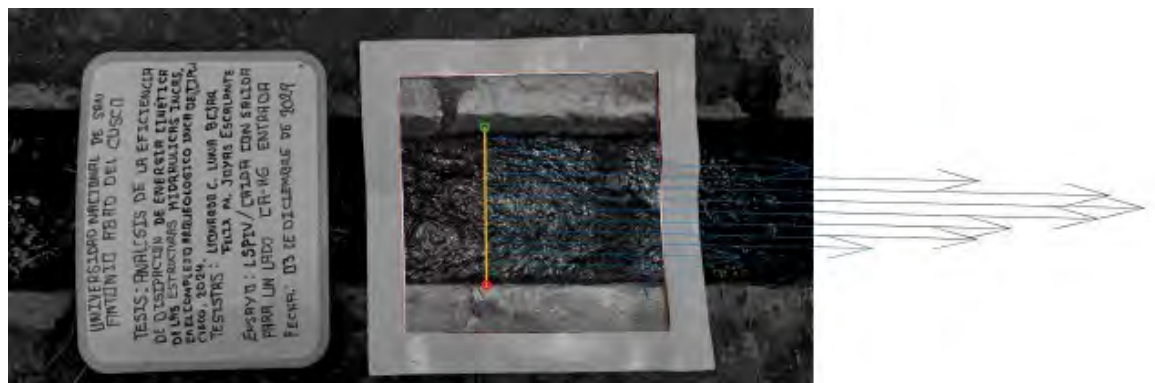
Entrada

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR CON CAÍDA CON ENTRADA RECTAY SALIDA LATERAL - ENTRADA	23	70.23	3503.91

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 68

Sección Transversal del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 40

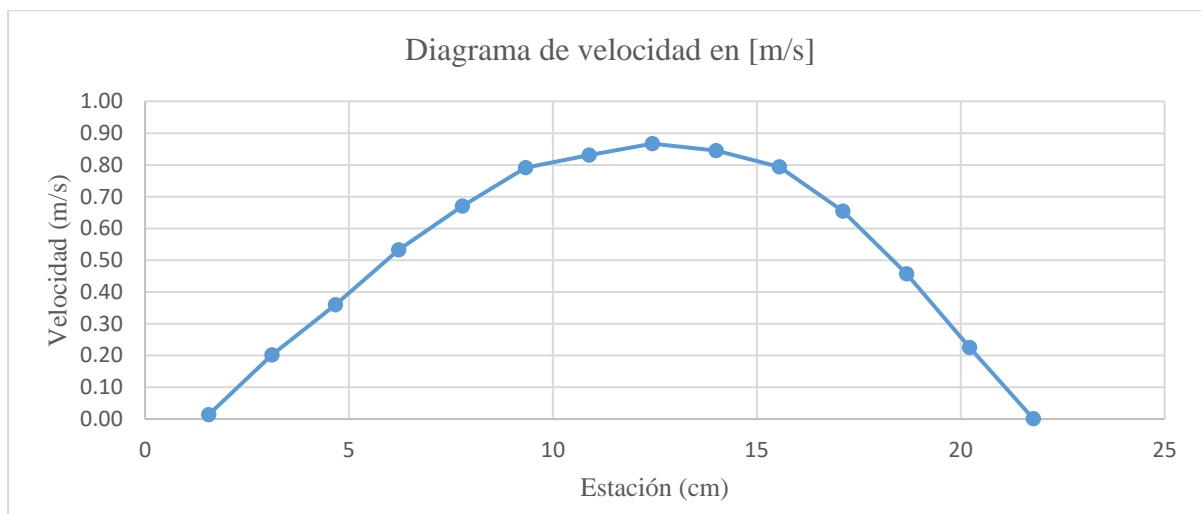
Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m 2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.56	0.0156	0.031	0.0004836	0.014144	0.0000068	0.01
3.11	0.0156	0.031	0.0004836	0.201928	0.0000977	0.10
4.67	0.0156	0.031	0.0004836	0.360040	0.0001741	0.17
6.22	0.0156	0.031	0.0004836	0.532648	0.0002576	0.26
7.78	0.0156	0.031	0.0004836	0.670560	0.0003243	0.32
9.33	0.0156	0.031	0.0004836	0.791512	0.0003828	0.38
10.89	0.0156	0.031	0.0004836	0.830424	0.0004016	0.40
12.44	0.0156	0.031	0.0004836	0.866832	0.0004192	0.42
14.00	0.0156	0.031	0.0004836	0.844792	0.0004085	0.41
15.55	0.0156	0.031	0.0004836	0.793920	0.0003839	0.38
17.11	0.0156	0.031	0.0004836	0.654680	0.0003166	0.32
18.67	0.0156	0.031	0.0004836	0.457280	0.0002211	0.22
20.22	0.0156	0.031	0.0004836	0.225680	0.0001091	0.11
21.78	0.0139	0.031	0.0004309	0.001168	0.0000005	0.00
						3.50

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 69

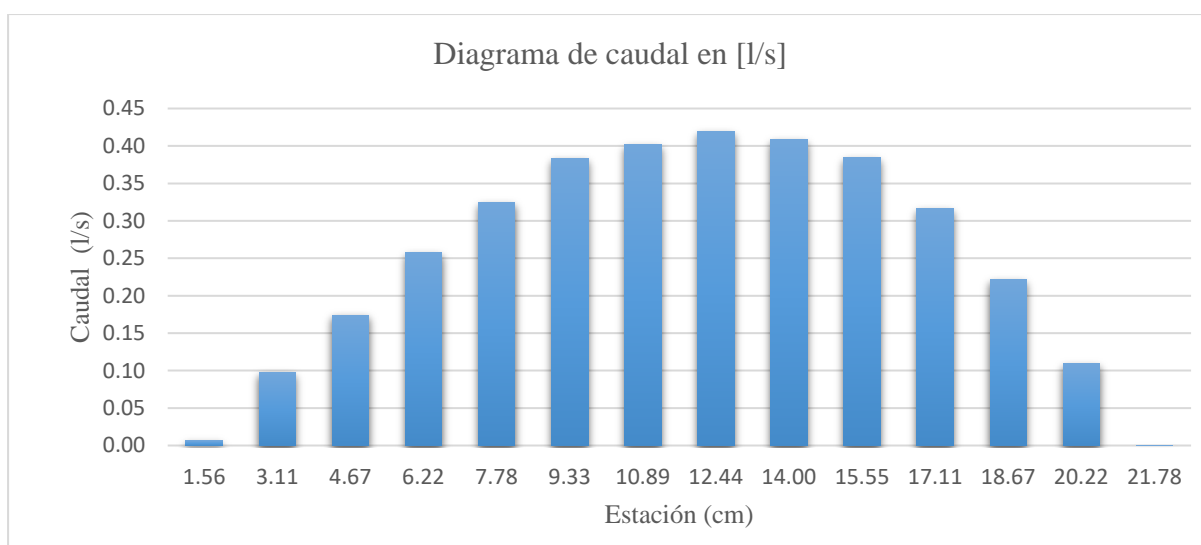
*Diagrama de velocidad del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral -
Entrada*



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 70

*Diagrama de caudal del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral -
Entrada*



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.10. Resultados LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida para un lado - Salida

Tabla 41

Información del video del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
CANAL CON CAÍDA CON ENTRADA RECTAY SALIDA LATERAL - SALIDA	3840:2160	1	7	6	1	8.3374

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 42

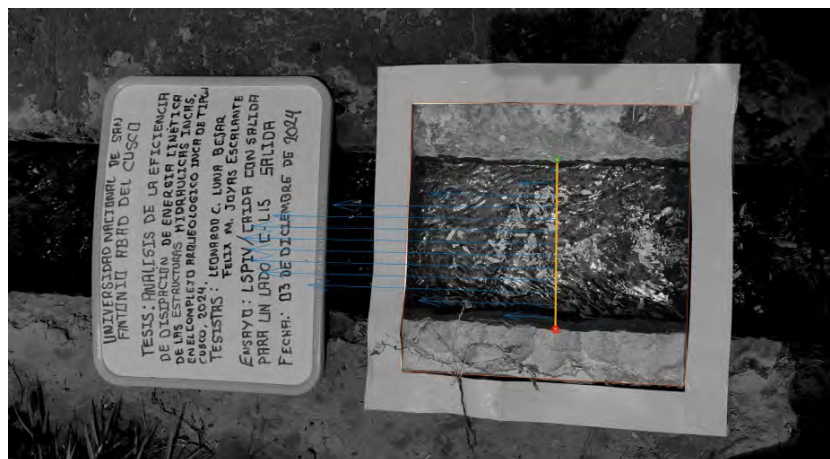
Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
CANAL CON CAÍDA CON ENTRADA RECTAY SALIDA LATERAL - SALIDA	21	41.10	3575.56

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 71

Sección Transversal del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 43

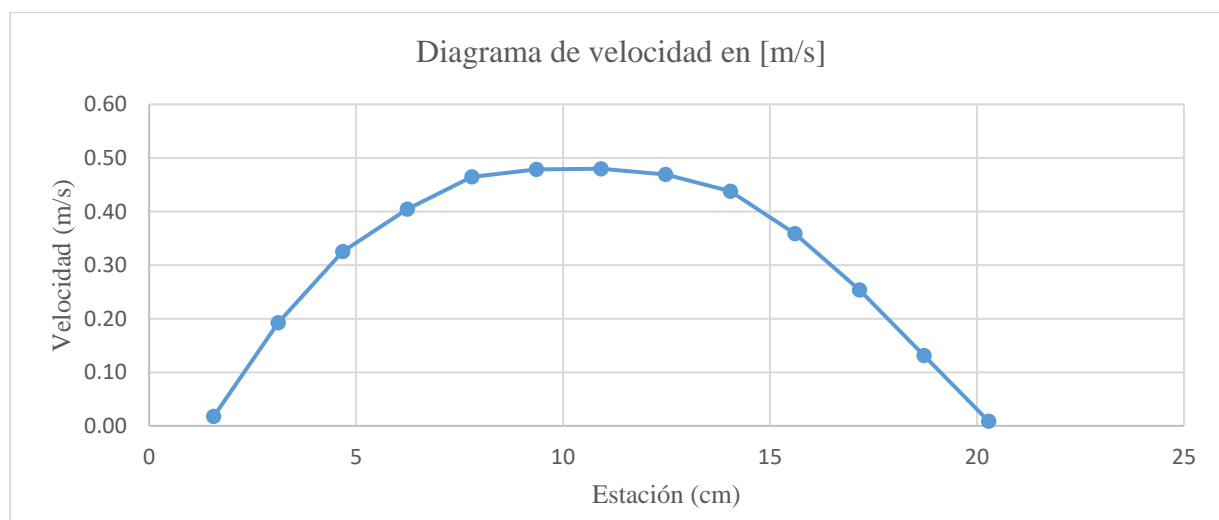
Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m 2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.56	0.0156	0.057	0.000889	0.017447	0.0000155	0.02
3.12	0.0156	0.057	0.000889	0.192602	0.0001713	0.17
4.68	0.0156	0.057	0.000889	0.325346	0.0002893	0.29
6.24	0.0156	0.057	0.000889	0.404677	0.0003598	0.36
7.8	0.0156	0.057	0.000889	0.464857	0.0004134	0.41
9.36	0.0156	0.057	0.000889	0.478882	0.0004258	0.43
10.92	0.0156	0.057	0.000889	0.479936	0.0004268	0.43
12.48	0.0156	0.057	0.000889	0.469175	0.0004172	0.42
14.04	0.0156	0.057	0.000889	0.438082	0.0003895	0.39
15.6	0.0156	0.057	0.000889	0.358870	0.0003191	0.32
17.16	0.0156	0.057	0.000889	0.253521	0.0002254	0.23
18.72	0.0156	0.057	0.000889	0.131325	0.0001168	0.12
20.28	0.0114	0.057	0.00065	0.008730	0.0000057	0.01
						3.58

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 72

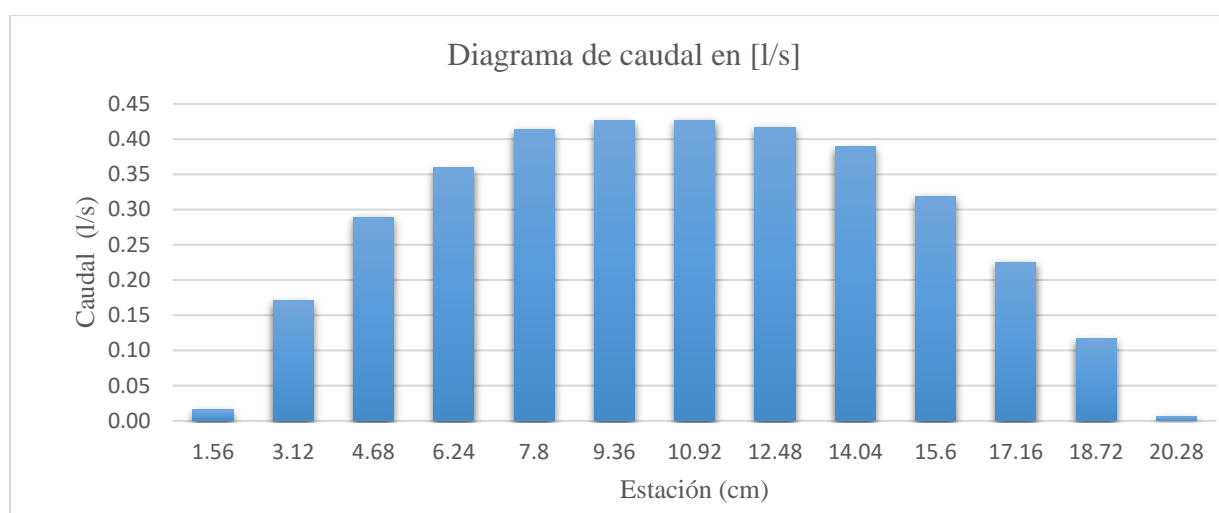
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 73

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con entrada recta y salida lateral - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.11. Resultados LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta

- Entrada

Tabla 44

Información del video del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta -

Entrada

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR CON CAÍDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA - ENTRADA	3840:2160	0	7.0283	7.0283	1	8.3373

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 45

Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta -

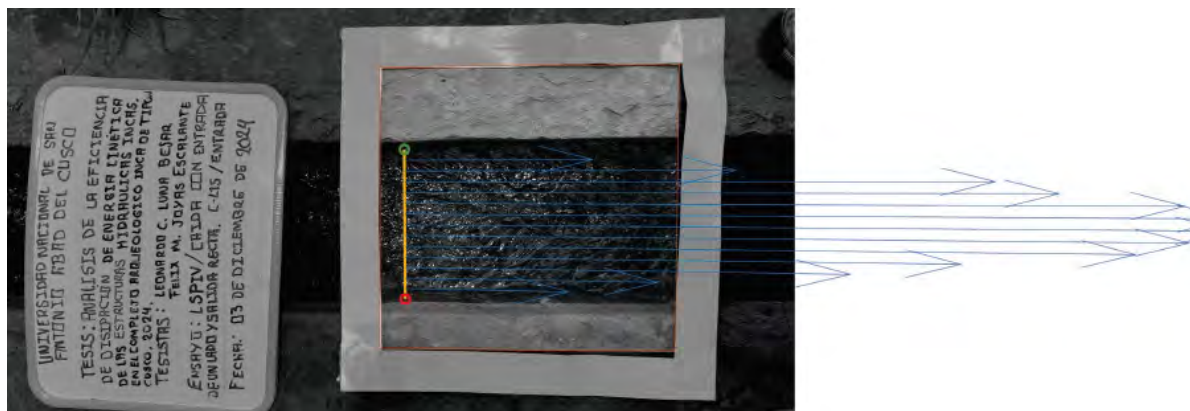
Entrada

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR CON CAÍDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA - ENTRADA	19	92.18	3810.68

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 74

Sección Transversal del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 46

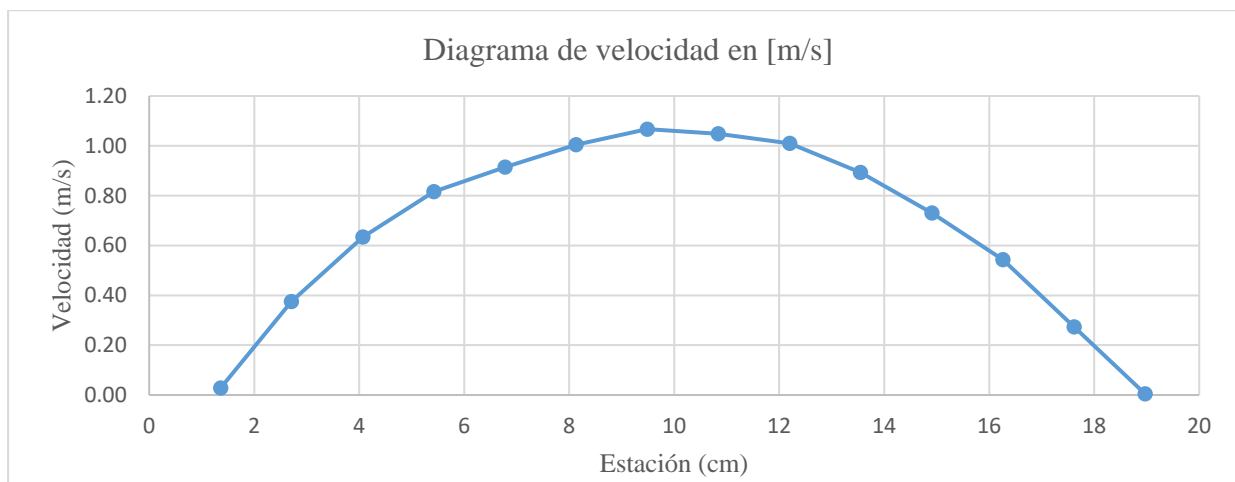
Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta - Entrada

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m 2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.36	0.0136	0.03	0.000408	0.028471	0.000011616	0.01
2.71	0.0136	0.03	0.000408	0.375137	0.000153056	0.15
4.07	0.0136	0.03	0.000408	0.633778	0.000258581	0.26
5.42	0.0136	0.03	0.000408	0.815651	0.000332786	0.33
6.78	0.0136	0.03	0.000408	0.914892	0.000373276	0.37
8.13	0.0136	0.03	0.000408	1.004850	0.000409979	0.41
9.49	0.0136	0.03	0.000408	1.067055	0.000435358	0.44
10.84	0.0136	0.03	0.000408	1.048489	0.000427784	0.43
12.2	0.0136	0.03	0.000408	1.009635	0.000411931	0.41
13.55	0.0136	0.03	0.000408	0.892942	0.000364320	0.36
14.91	0.0136	0.03	0.000408	0.730221	0.000297930	0.30
16.26	0.0136	0.03	0.000408	0.543003	0.000221545	0.22
17.62	0.0136	0.03	0.000408	0.272746	0.000111280	0.11
18.97	0.0094	0.03	0.000282	0.004402	0.000001241	0.00
						3.81

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 75

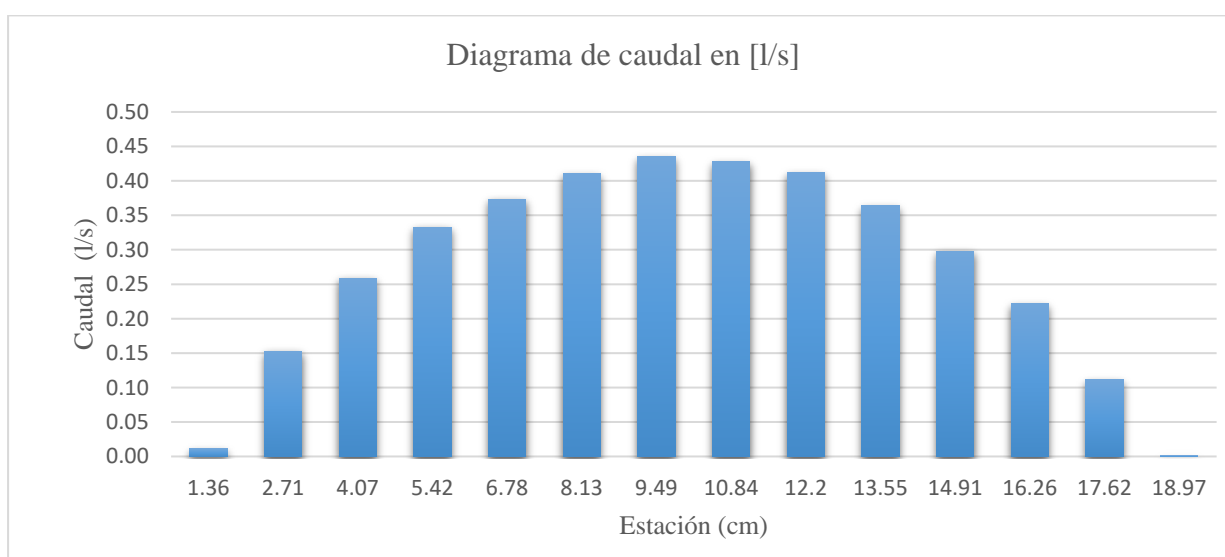
*Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta -
Entrada*



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 76

*Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta -
Entrada*



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.12. Resultados LSPIV del disipador con caída con entrada para un lado y salida recta - Salida

Tabla 47

Información del video del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta – Salida

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR CON CAÍDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA - SALIDA	3840:2160	1	7	6	1	8.3373

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 48

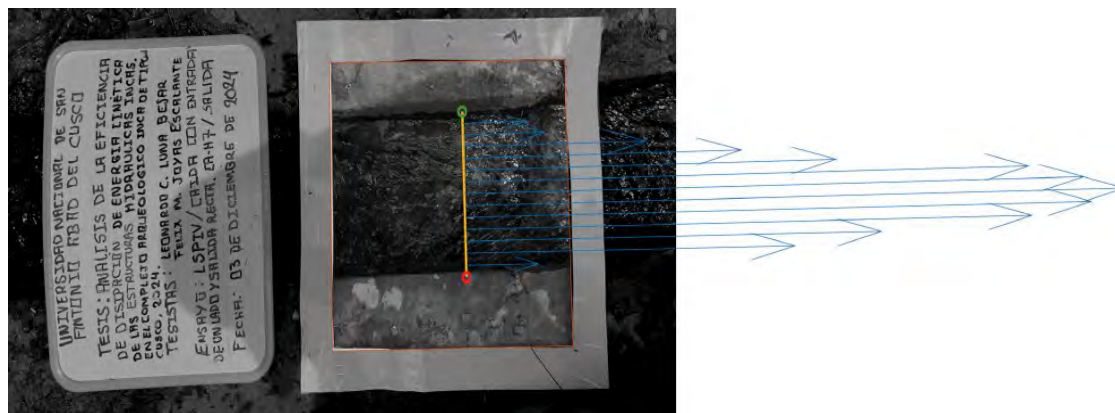
Detalles de medición del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta - Salida

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR CON CAÍDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA - SALIDA	18.5	72.33	3762.68

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 77

Sección Transversal del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 49

Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con caída con entrada

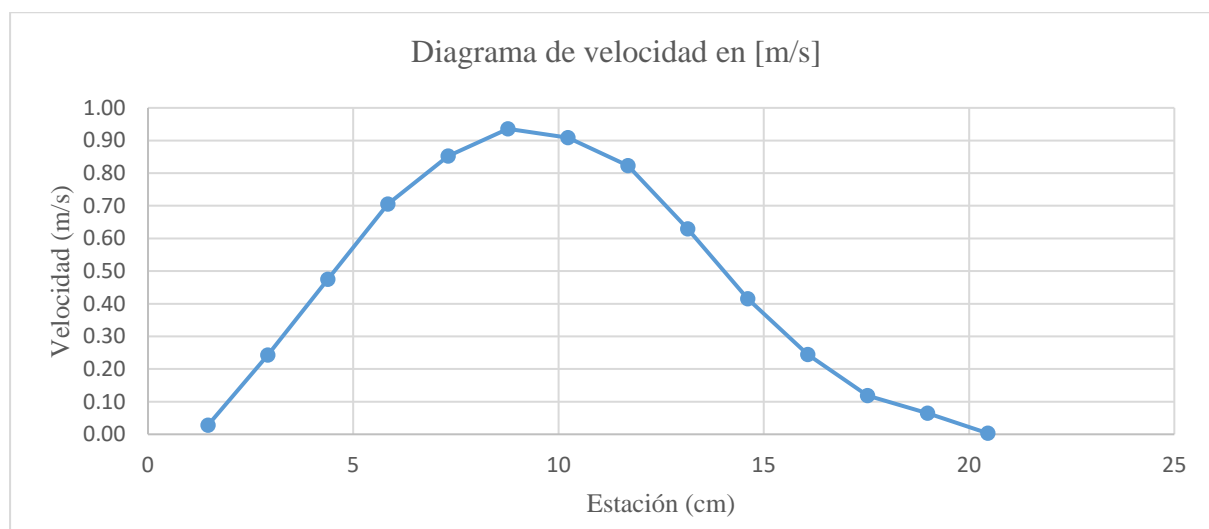
lateral y salida recta - Salida

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m 2]	Velocidad [m/s]	Caudal [m3/s]	Caudal [l/s]
1.46	0.0146	0.04	0.000584	0.0279480	0.000016	0.02
2.92	0.0146	0.04	0.000584	0.2423619	0.000142	0.14
4.38	0.0146	0.04	0.000584	0.4749996	0.000277	0.28
5.84	0.0146	0.04	0.000584	0.7054541	0.000412	0.41
7.31	0.0146	0.04	0.000584	0.8521088	0.000498	0.50
8.77	0.0146	0.04	0.000584	0.9357922	0.000547	0.55
10.23	0.0146	0.04	0.000584	0.9084265	0.000531	0.53
11.69	0.0146	0.04	0.000584	0.8229522	0.000481	0.48
13.15	0.0146	0.04	0.000584	0.6290629	0.000367	0.37
14.61	0.0146	0.04	0.000584	0.4151443	0.000242	0.24
16.07	0.0146	0.04	0.000584	0.2440792	0.000143	0.14
17.53	0.0146	0.04	0.000584	0.1185461	0.000069	0.07
18.99	0.0146	0.04	0.000584	0.0645133	0.000038	0.04
20.46	0.0075	0.04	0.0003	0.0030277	0.000001	0.00
						3.76

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 78

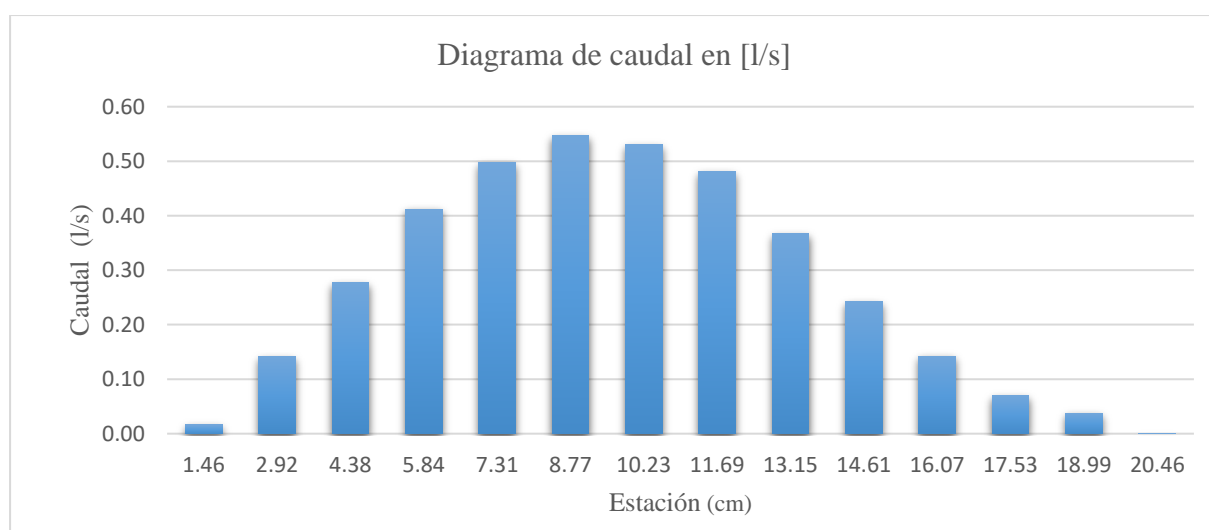
Diagrama de velocidad del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 79

Diagrama de caudal del LSPIV del disipador con caída con entrada lateral y salida recta - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.13. Resultados LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada

Tabla 50

Información del video del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR CON PENDIENTE INVERTIDA-ENTRADA	3840:2160	0	5.8353	5.8353	1	8.3369

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 51

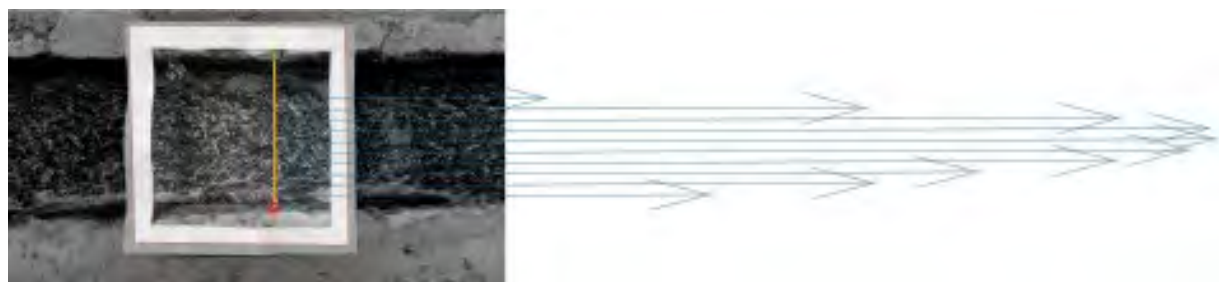
Detalles de medición del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR CON PENDIENTE INVERTIDA - ENTRADA	28	172.27	7788.43

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 80

Sección Transversal del dissipador con pendiente invertida - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 52

Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con pendiente

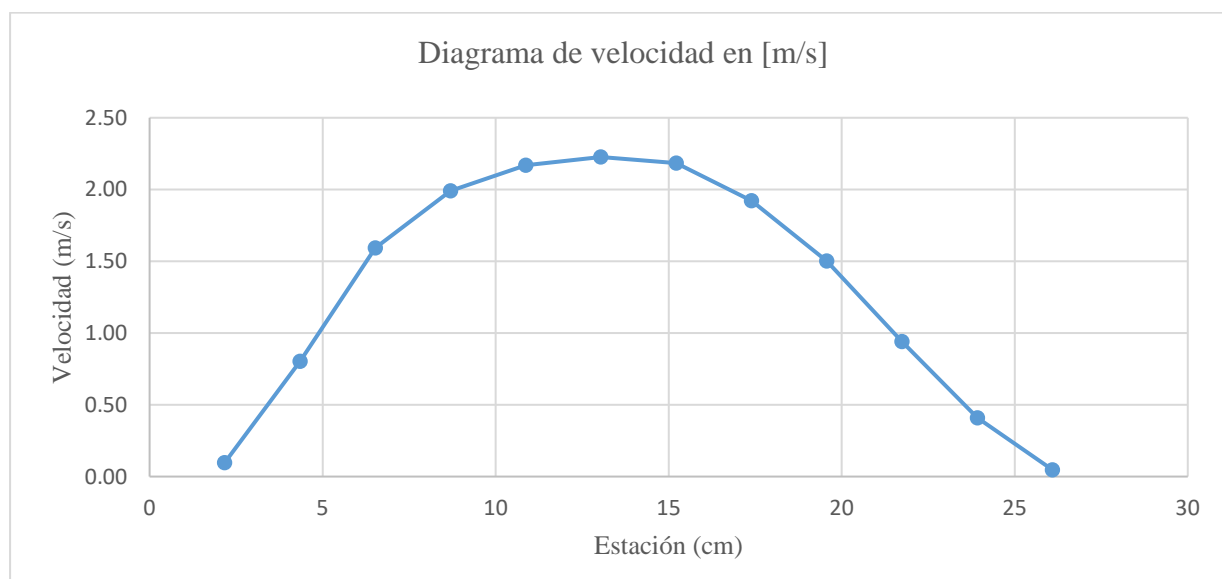
invertida - Entrada

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Caudal [l/s]
2.17	0.0217	0.0226	0.00049042	0.097586	0.000048	0.05
4.35	0.0217	0.0226	0.00049042	0.802848	0.000394	0.39
6.52	0.0217	0.0226	0.00049042	1.592640	0.000781	0.78
8.7	0.0217	0.0226	0.00049042	1.991616	0.000977	0.98
10.87	0.0217	0.0226	0.00049042	2.169696	0.001064	1.06
13.04	0.0217	0.0226	0.00049042	2.226368	0.001092	1.09
15.22	0.0217	0.0226	0.00049042	2.183280	0.001071	1.07
17.39	0.0217	0.0226	0.00049042	1.921472	0.000942	0.94
19.57	0.0217	0.0226	0.00049042	1.501344	0.000736	0.74
21.74	0.0217	0.0226	0.00049042	0.940912	0.000461	0.46
23.92	0.0217	0.0226	0.00049042	0.409056	0.000201	0.20
26.09	0.0204	0.0226	0.00046104	0.047152	0.000022	0.02
						7.79

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 81

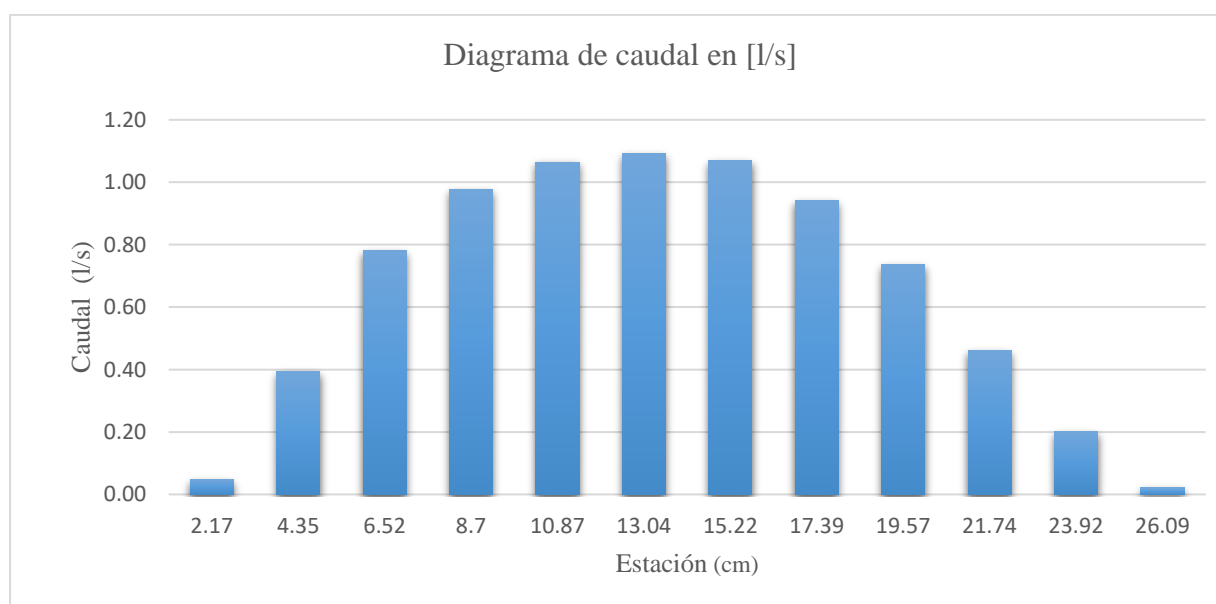
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 82

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Entrada



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

4.1.3.2.14. Resultados LSPIV del disipador con pendiente invertida - Salida

Tabla 53

Información del video del LSPIV del disipador con pendiente invertida - Salida

Nombre	Resolución	Inicio (s)	Final (s)	Tiempo Total (s)	Step (frame)	Time Step (ms)
DISIPADOR CON PENDIENTE INVERTIDA - SALIDA	3840:2160	0	8.2204	8.2204	1	8.3371

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 54

Detalles de medición del LSPIV del disipador con pendiente invertida - Salida

Nombre	Ancho (cm)	Velocidad Superficial (cm/s)	Total Q (cm ³ /s)
DISIPADOR CON PENDIENTE INVERTIDA- SALIDA	28.5	58.18	7844.21

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 83

Sección Transversal del disipador con pendiente invertida - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Tabla 55

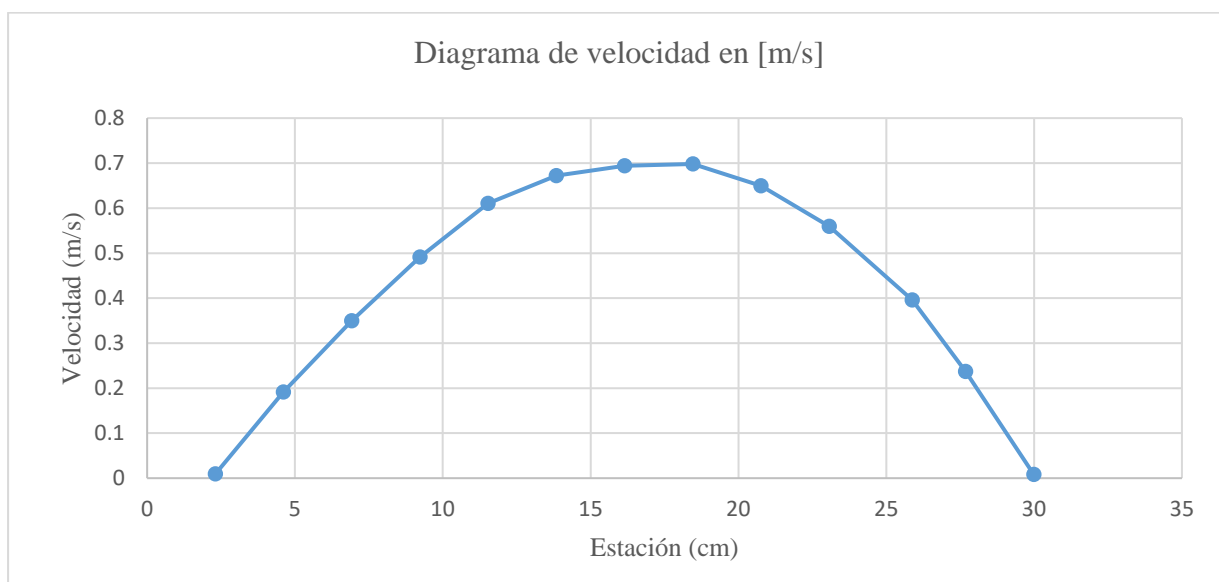
Tabla resumen (método de la sección intermedia) del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida

Estación [cm]	Ancho [m]	Profundidad [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]	Caudal [m ³ /s]	Caudal [l/s]
2.31	0.0231	0.061	0.0014091	0.0094	0.000013	0.01
4.61	0.0231	0.061	0.0014091	0.1917	0.000270	0.27
6.92	0.0231	0.061	0.0014091	0.3495	0.000492	0.49
9.23	0.0231	0.061	0.0014091	0.4915	0.000693	0.69
11.53	0.0231	0.061	0.0014091	0.6104	0.000860	0.86
13.84	0.0231	0.061	0.0014091	0.6723	0.000947	0.95
16.15	0.0231	0.061	0.0014091	0.6943	0.000978	0.98
18.46	0.0231	0.061	0.0014091	0.6981	0.000984	0.98
20.76	0.0231	0.061	0.0014091	0.6496	0.000915	0.92
23.07	0.0231	0.061	0.0014091	0.5598	0.000789	0.79
25.88	0.0231	0.061	0.0014091	0.3959	0.000558	0.56
27.68	0.0231	0.061	0.0014091	0.2371	0.000334	0.33
29.99	0.0206	0.061	0.0012566	0.0081	0.000010	0.01
						7.844

Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 84

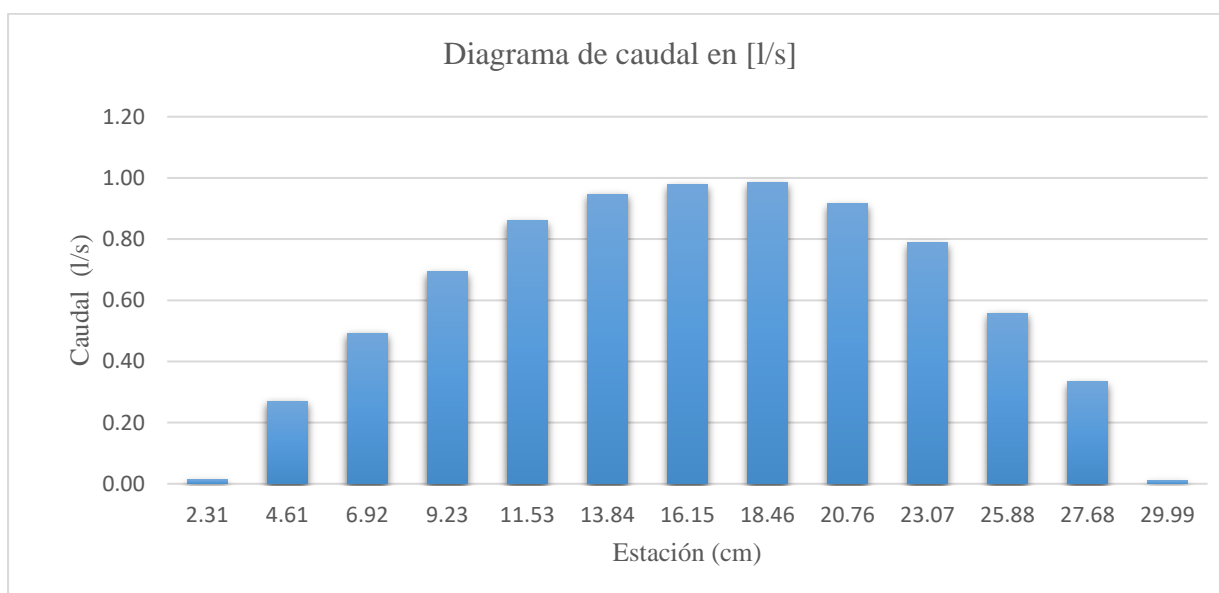
Diagrama de velocidad del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Figura 85

Diagrama de caudal del LSPIV del dissipador con pendiente invertida - Salida



Nota. RIVeR Stylesheet Version: 1.3

Una vez obtenidos los registros de velocidad superficial a través de la técnica LSPIV, se procedió al cálculo de la velocidad media del flujo para cada sección transversal. Este proceso consistió en la extracción de valores promedio de velocidad superficial (V_S) en puntos representativos del canal, seguidos de la aplicación de un coeficiente de corrección (α), con base en recomendaciones técnicas y literatura especializada. El valor adoptado para dicho coeficiente fue de 0.80, adecuado para canales con flujo subcrítico y superficies libres regulares. La fórmula aplicada fue:

$$V_m = \alpha * V_S \quad (51)$$

Donde:

V_m : velocidad media del flujo

V_S : velocidad superficial obtenida por LSPIV

α : coeficiente de corrección (usualmente entre 0.80 y 0.85 en canales con flujo uniforme y sin turbulencias excesivas)

Estos valores de velocidad media fueron fundamentales para la caracterización hidráulica de las estructuras analizadas y constituyen parámetros de entrada esenciales para la calibración y validación de los modelos numéricos tridimensionales en el software FLOW-3D.

4.1.3.2.15. Validación de la Velocidad Registrada por LSPIV mediante la Ecuación

General de Caudal

Se realizará la validación de la velocidad obtenida mediante LSPIV utilizando la ecuación general de continuidad, tomando el caudal como referencia. Es importante señalar que esta comparación constituye una aproximación, debido a que el área hidráulica empleada para el cálculo se obtiene a partir de mediciones aproximadas y no de una geometría perfectamente definida, ya que los canales presentan formas irregulares propias de su construcción inca.

Tabla 56

Velocidades resultantes de la ecuación general de continuidad

ECUACION GENERAL DE CONTINUIDAD CON CAUDAL DEL VERTEDERO						
DISIPADORES	ENTRADA					
	TIRANTE	ANCHO	AREA M2	CAUDAL M3/S	CAUDAL L/S	VELOCIDAD M/S
S	0.035	0.32	0.0112	0.004867	4.87	0.43
T	0.035	0.31	0.01085	0.00906	9.06	0.84
ZIGZAG	0.04	0.24	0.0096	0.004318	4.32	0.45
SALIDA DOBLE	0.09	0.23	0.0207	0.01076	10.76	0.52
SALIDA LATERAL	0.031	0.23	0.00713	0.004163	4.16	0.58
SALIDA RECTA	0.03	0.19	0.0057	0.004514	4.51	0.79
PENDIENTE INVERTIDA	0.022	0.28	0.00616	0.00962	9.62	1.56
DISIPADORES	SALIDA					
	TIRANTE	ANCHO	AREA M2	CAUDAL M3/S	CAUDAL L/S	VELOCIDAD M/S
S	0.05	0.31	0.0155	0.004813	4.81	0.31
T	0.105	0.14	0.0147	0.00905	9.05	0.62
ZIGZAG	0.046	0.255	0.0117	0.004294	4.29	0.37
SALIDA DOBLE	0.05	0.28	0.0140	0.00404	4.04	0.29
SALIDA LATERAL	0.057	0.21	0.0120	0.004105	4.11	0.34
SALIDA RECTA	0.04	0.185	0.0074	0.00451	4.51	0.61
PENDIENTE INVERTIDA	0.061	0.285	0.0174	0.00954	9.54	0.55

Nota. Elaboración Propia

Tabla 57*Velocidades resultantes del método de LSPIV*

CANALES	LSPIV			
	VELOCIDAD SUPERFICIAL (Vs)		VELOCIDAD PROMEDIO (Vs*0.8)	
	LSPIV Entrada	LSPIV Salida	LSPIV Entrada	LSPIV Salida
S	0.48	0.29	0.39	0.24
T	0.92	0.27	0.74	0.22
ZIGZAG	0.41	0.37	0.33	0.30
SALIDA DOBLE	0.44	0.47	0.35	0.38
SALIDA LATERAL	0.70	0.41	0.56	0.33
SALIDA RECTA	0.92	0.72	0.74	0.58
PENDIENTE INVERTIDA	1.72	0.58	1.38	0.47

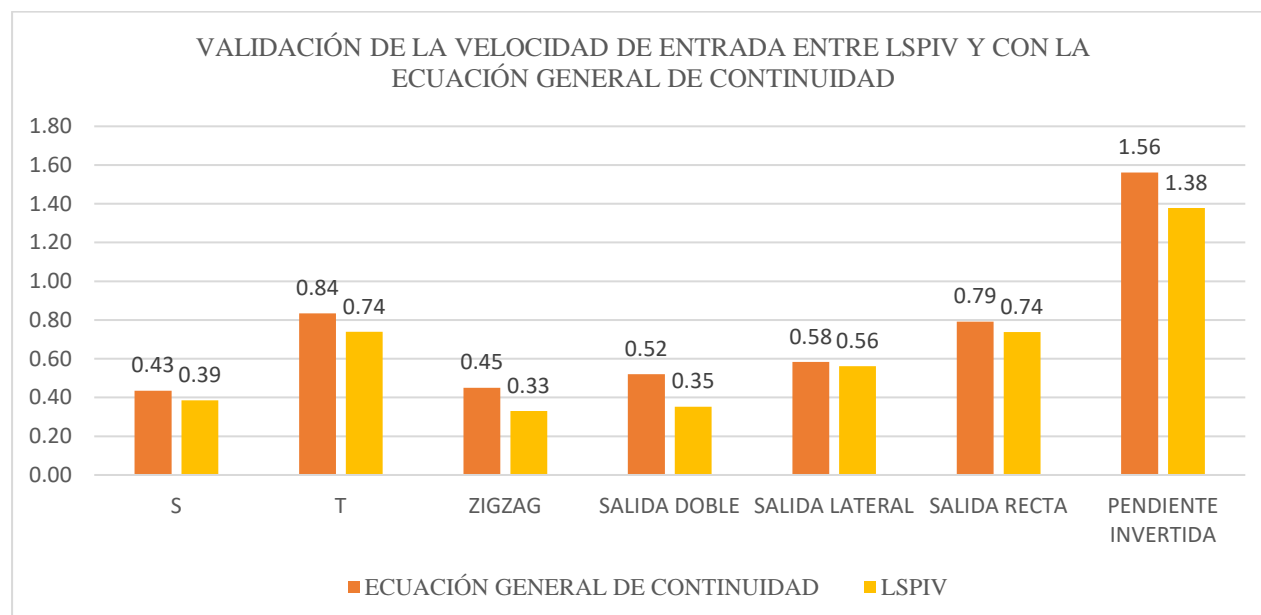
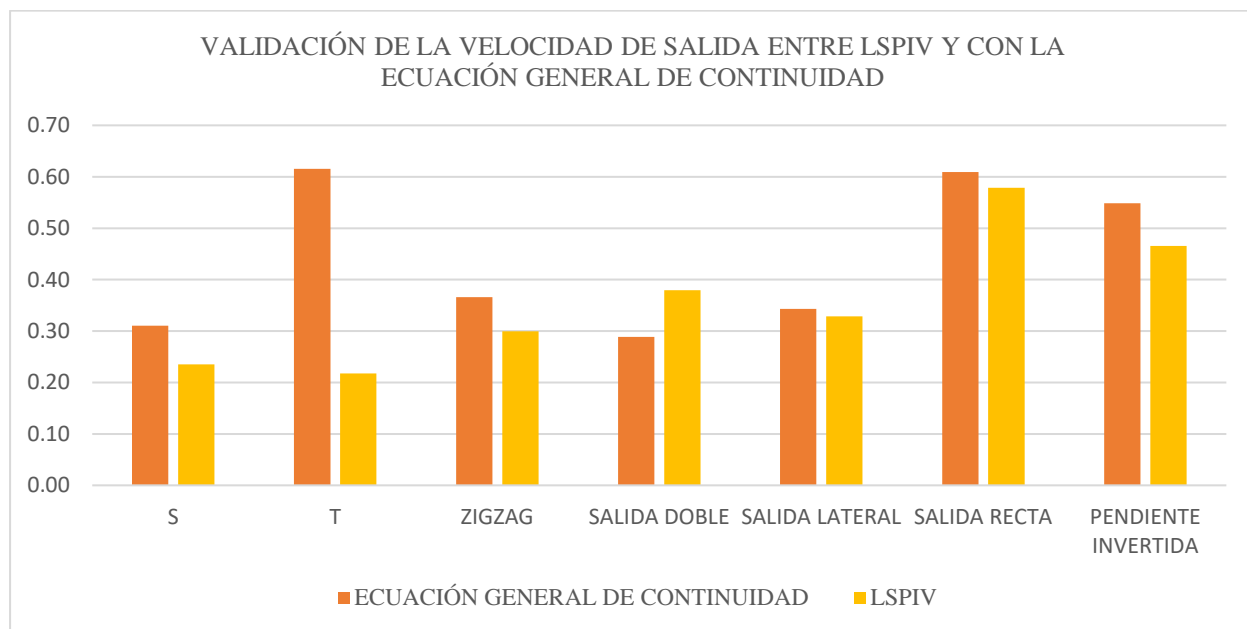
Nota. Elaboración Propia**Figura 86***Validación de la velocidad de entrada entre LSPIV y con la ecuación general de continuidad**Nota.* Elaboración Propia

Figura 87

Validación de la velocidad de salida entre LSPIV y con la ecuación general de continuidad



Nota. Elaboración Propia

Los resultados muestran que la validación de la velocidad obtenida mediante LSPIV frente a la estimada con la ecuación general de continuidad presenta una correspondencia adecuada en la mayoría de los disipadores evaluados. En el caso del canal en T, la mayor diferencia observada en la velocidad de salida se debe principalmente a lo complejo que fue captar con claridad el movimiento del agua en esa zona, donde la geometría y la turbulencia dificultan que el LSPIV identifique correctamente los patrones superficiales. Aun así, en los demás disipadores la coincidencia es consistente y el error relativo se mantiene reducido, lo que respalda la confiabilidad de los resultados obtenidos al comparar el método LSPIV con la ecuación general de continuidad basada en el caudal determinado mediante vertedero.

4.1.3.3. Modelación hidrodinámica en FLOW-3D:

4.1.3.3.1. Cálculo de la rugosidad:

La rugosidad absoluta k_s fue determinada a partir de las diferencias de cota entre los puntos del fondo del canal obtenidos mediante levantamiento LiDAR y la cota mínima de la sección transversal, considerando como valor representativo el promedio de dichas diferencias.

Tabla 58

Cálculo de rugosidad

Punto	Cota Z (m)	$\Delta Z = Z_i - Z_{\min}$
P1	3490.47	0
P2	3490.4756	0.0056
P3	3490.4761	0.0061
P4	3490.4749	0.0049
P5	3490.4758	0.0058
P6	3490.4763	0.0063
P7	3490.4752	0.0052
P8	3490.4757	0.0057
P9	3490.476	0.006
P10	3490.475	0.005

Nota. Elaboración Propia

La rugosidad hidráulica del contorno se representó mediante una rugosidad absoluta equivalente k_s , la cual se relaciona empíricamente con el coeficiente de Manning n a partir de la formulación de Strickler.

Para flujo turbulento completamente rugoso en canales abiertos, dicha relación se expresa como:

$$n = \frac{k_s^{1/6}}{26} \quad (52)$$

$$K_s = \frac{\sum \Delta Z}{10} \approx 0.00564 \text{ m}$$

$$n \approx \frac{(0.00564)^{1/6}}{26} \approx 0.016$$

La rugosidad absoluta obtenida para el canal, $k_s \approx 0.0056 \text{ m}$ (valor que se pondrá como dato de entrada en el Flow3D), es coherente con superficies de piedra labrada y mampostería hidráulica, caracterizadas por irregularidades del orden de algunos milímetros. Al relacionar este valor con el coeficiente de Manning mediante la formulación de Strickler, se obtiene un valor equivalente de $n \approx 0.016$, el cual se encuentra dentro del rango reportado para canales revestidos de piedra trabajada ($n = 0.013\text{--}0.017$).

Estos valores son consistentes con los indicados en la literatura clásica de hidráulica para canales de piedra natural (Chow, 1994), confirmando la validez del parámetro de rugosidad empleado.

Tabla 59

Tabla de coeficientes de Manning según el material

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
a. Canales revestidos o desarmables			
B-1. Metal			
a. Superficie lisa de acero			
1. Sin pintar	0.011	0.012	0.014
2. Pintada	0.012	0.013	0.017
b. Corrugado	0.021	0.025	0.030
B-2. No metal			
a. Cemento			
1. Superficie pulida	0.010	0.011	0.013
2. Mortero	0.011	0.013	0.015
b. Madera			
1. Cepillada, sin tratar	0.010	0.012	0.014
2. Cepillada, creosotada	0.011	0.012	0.015
3. Sin cepillar	0.011	0.013	0.015
4. Láminas con listones	0.012	0.015	0.018
5. Forrada con papel impermeabilizante	0.010	0.014	0.017
c. Concreto			
1. Terminado con llana metálica (palustre)	0.011	0.013	0.015
2. Terminado con llana de madera	0.013	0.015	0.016
3. Pulido, con gravas en el fondo	0.015	0.017	0.020
4. Sin pulir	0.014	0.017	0.020
5. Lanzado, sección buena	0.016	0.019	0.023
6. Lanzado, sección ondulada	0.018	0.022	0.025
7. Sobre roca bien excavada	0.017	0.020	
8. Sobre roca irregularmente excavada	0.022	0.027	
d. Fondo de concreto terminado con llana de madera y con lados de			
1. Piedra labrada, en mortero	0.015	0.017	0.020
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.017	0.020	0.024
3. Mampostería de piedra cementada, recubierta	0.016	0.020	0.024
4. Mampostería de piedra cementada	0.020	0.025	0.030
5. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.020	0.030	0.035
e. Fondo de gravas con lados de			
1. Concreto encofrado	0.017	0.020	0.025
2. Piedra sin seleccionar, sobre mortero	0.020	0.023	0.026
3. Piedra suelta o <i>riprap</i>	0.023	0.033	0.036
f. Ladrillo			
1. Barnizado o lacado	0.011	0.013	0.015
2. En mortero de cemento	0.012	0.015	0.018
g. Mampostería			
1. Piedra partida cementada	0.017	0.025	0.030
2. Piedra suelta	0.023	0.032	0.035
h. Bloques de piedra labrados	0.013	0.015	0.017
i. Asfalto			
1. Liso	0.013	0.013	
2. Rugoso	0.016	0.016	
j. Revestimiento vegetal	0.030	0.500

Nota. Hidráulica de canales abiertos, Ven Te Chow, Pág. 109.

En la modelación hidrodinámica realizada en FLOW-3D se obtuvieron resultados que permitieron visualizar y cuantificar el comportamiento del flujo dentro de las estructuras hidráulicas incas. Los patrones de velocidad, la distribución de presiones y la formación de zonas de disipación evidenciaron una respuesta coherente con las características geométricas y rugosas de cada disipador. Asimismo, el análisis permitió identificar las áreas donde se concentró la pérdida de energía cinética, confirmando la efectividad de las estructuras en la reducción del impulso del flujo y validando los supuestos planteados en las hipótesis sobre la eficiencia.

4.1.3.3.2. Simulación del disipador en forma de S

Primeramente, se hace la toma real del disipador en este caso es el disipador en forma de S, teniendo las imágenes y el STL generado esta se lleva al programa adjuntando el STL.

Figura 88

Toma aérea con dron del disipador en forma en S

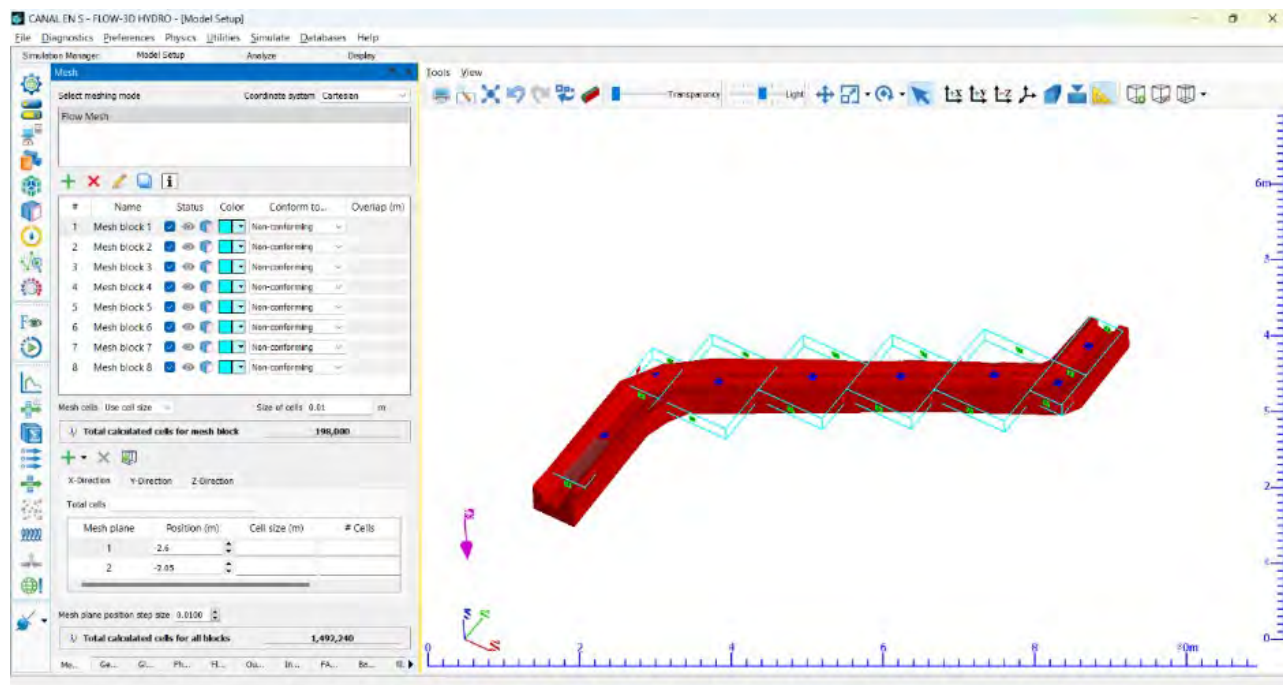


Nota. Elaboración Propia

Se realiza la creación de Mesh Blocks que son las mallas que nos permitirá realizar la simulación, haciendo una entrada de datos de todos los parámetros correspondientes en cuanto a las propiedades del fluido, se trabajó con un numero de celdas de 1,492,240 con las correspondientes condiciones de borde establecidas, y una duración de 30s.

Figura 89

Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de S

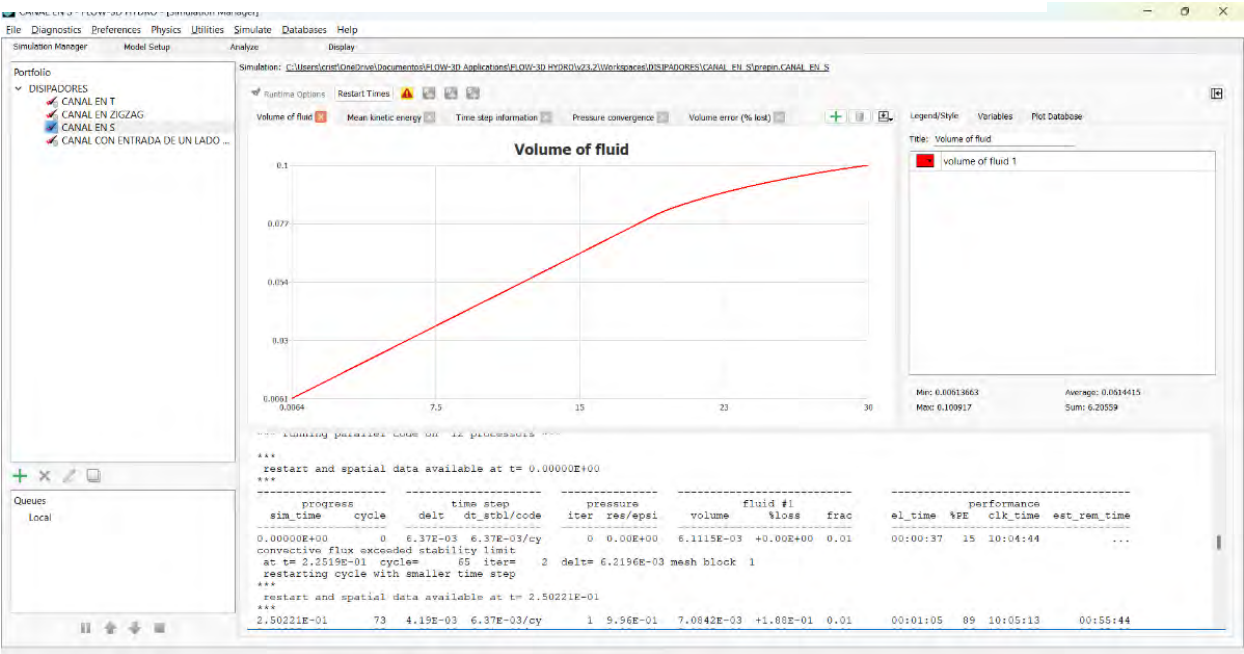


Nota. Elaboración propia en FLOW-3D® (Versión 2024R1)

Se procede a correr la simulación durando dicha simulación aproximadamente 3 horas.

Figura 90

Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del disipador en forma de S



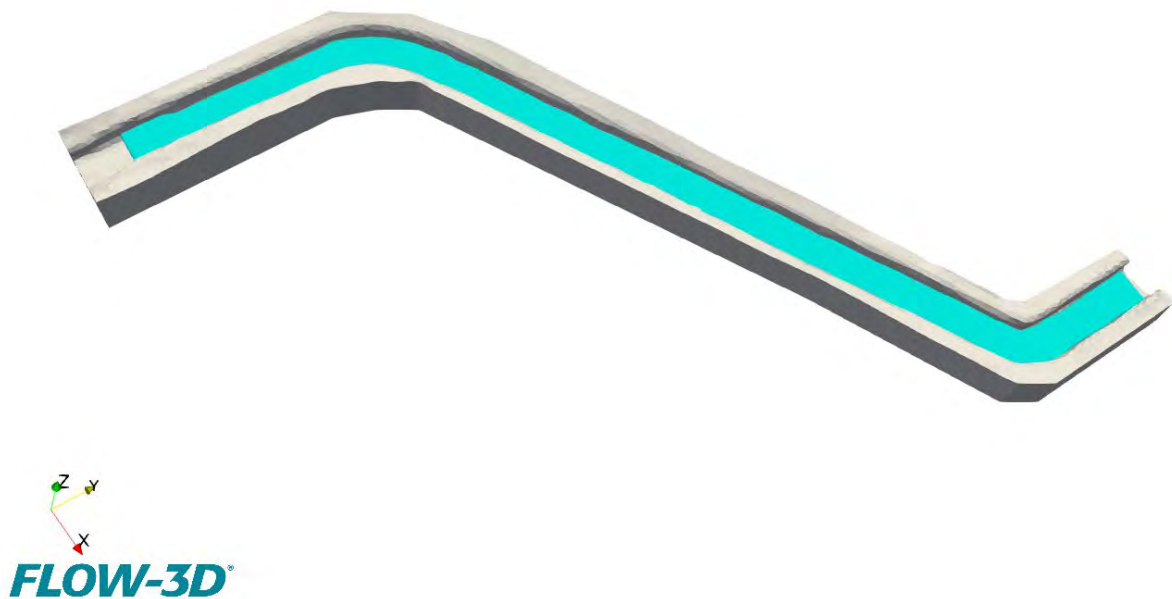
Nota. Elaboración propia en FLOW-3D® (Versión 2024R1)

Una vez realizada la simulación se hará el procesamiento y la verificación de los resultados de la simulación en el Flow 3D Post dándonos como resultado tanto el canal y el fluido como se hace la visualización tridimensional del flujo dentro del canal.

Figura 91

Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del disipador en forma de S

Time: 30.005 s



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa el perfil longitudinal del disipador observando que este disipador no se caracteriza por una pendiente, o una caída como si lo veremos en los disipadores posteriores, se caracteriza por sus 2 curvas pronunciadas que dan alusión al nombre establecido a este disipador.

Figura 92

Perfil longitudinal del dissipador en forma de S

Time: 30.005 s



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

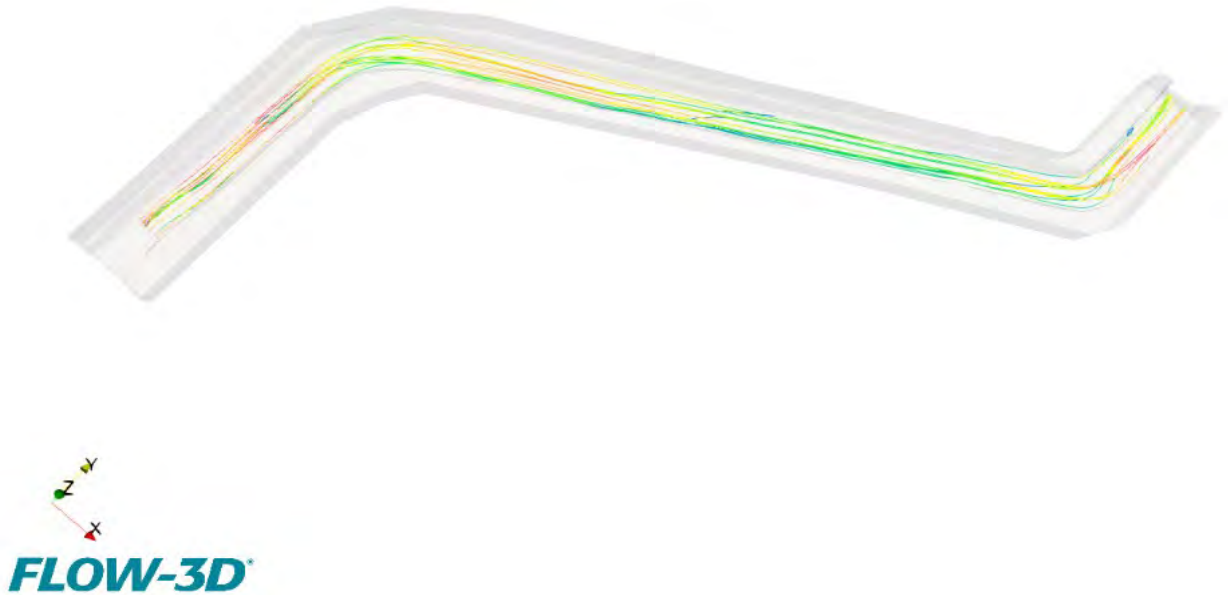
Se observa las líneas de corriente coloreadas según la vorticidad (aunque en esta imagen específica las líneas están coloreadas por velocidad, la intención es representar vorticidad). Este tipo de análisis permite identificar zonas de recirculación y cambios en la estructura del flujo que son las características clave para el cálculo de la eficiencia del dissipador.

La geometría del canal en forma de “S” obliga al flujo a realizar varios cambios de dirección, lo cual genera vorticidad y turbulencia que ayudan a disipar la energía hidráulica del fluido. Esta simulación corresponde al instante de tiempo $t = 30.005$ segundos, y se utiliza como herramienta de diagnóstico para optimizar el diseño hidráulico del canal.

Figura 93

Líneas de flujo del dissipador en forma de S

Time: 30.005 s



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa el resultado de la simulación con una gráfica de colores de velocidad, donde se observa que la forma de canal en S visualmente realiza una disipación de energía cinética donde en su comienzo del canal llega a su pico de velocidad y pasando la curva pronunciada se observa la pérdida de energía o pérdida de velocidad, que nos ayudara en el cálculo cuantitativo de la disipación de energía cinética.

Figura 94

Distribución del campo de velocidades en el dissipador en forma de S

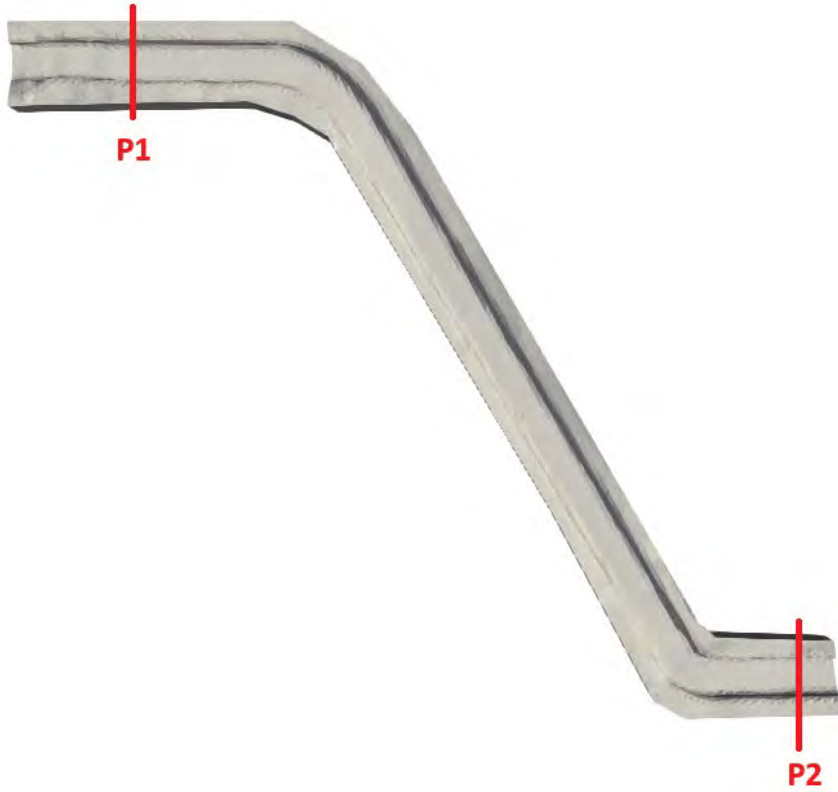


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se realizó en análisis de datos de la simulación en los siguientes puntos P1 denominado Punto de Entrada y P2 denominado Punto de Salida. En el P1 Entrada se realizó la toma del video para el LSPIV y la toma de datos con el vertedero en dicho punto.

Figura 95

Puntos de comprobación del disipador en forma de S



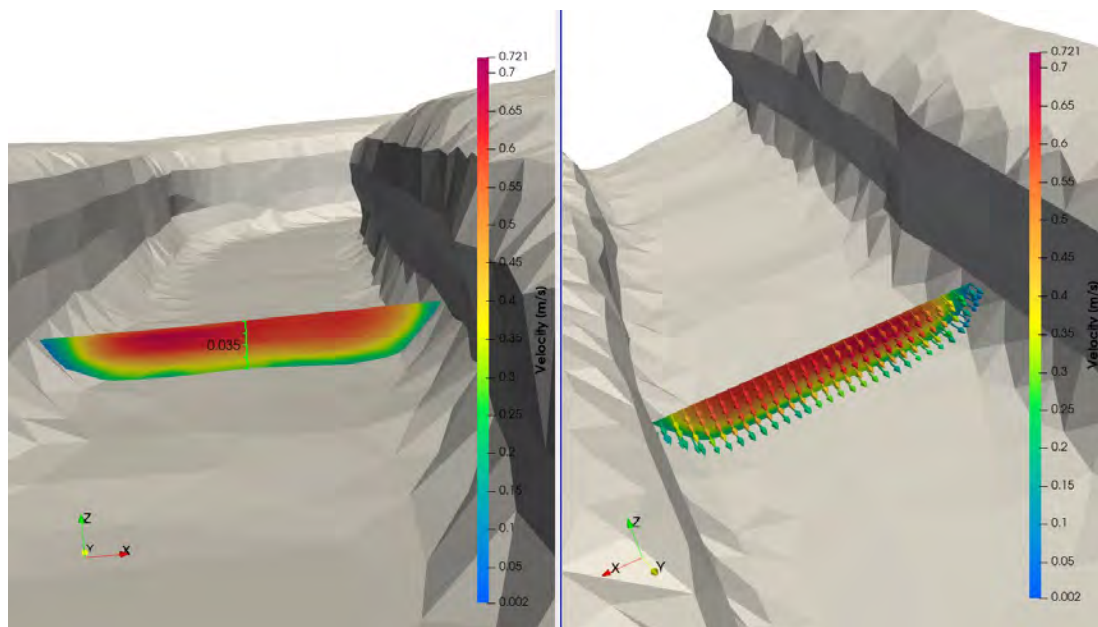
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En el punto de P1 Punto de entrada se sacó el corte transversal como se observa en la **Figura 96**, de esta sección tendremos que realizar la extracción de datos de las velocidades para así saber cuál es la velocidad promedio de esta sección.

Se observa en la **Figura 97** la velocidad superficial en el punto de entrada es alta, pero el resultado destacable para el análisis de eficiencia de disipación cinética será el promedio de los 697 datos que nos vota el software dando como resultado la velocidad promedio de 0.43 m/s.

Figura 96

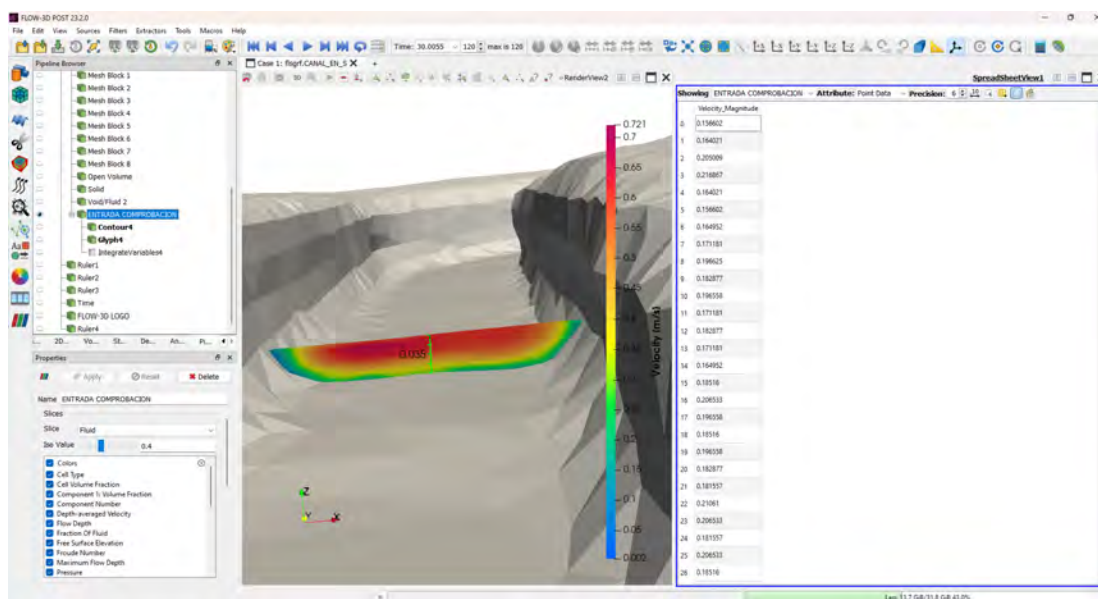
Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador en forma de S



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Figura 97

Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador en forma de S

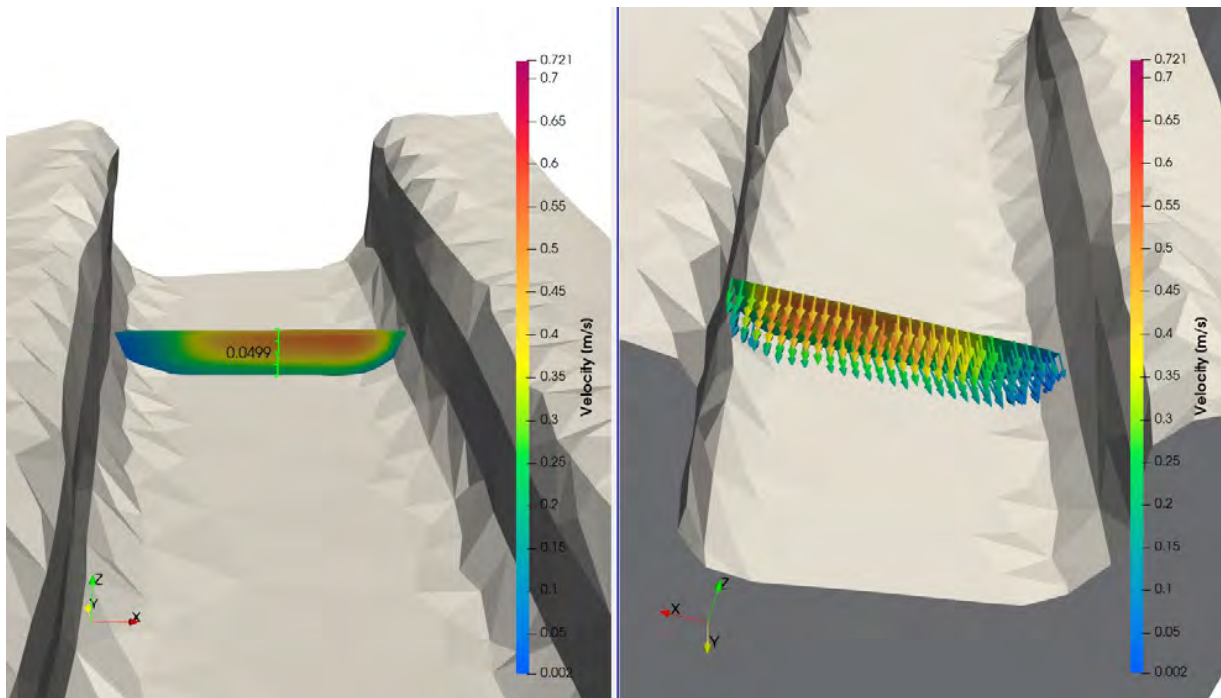


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En el punto P2 Punto de Salida se sacó el corte transversal, de esta sección tendremos que realizar la extracción de datos de las velocidades para así saber cuál es la velocidad promedio de esta sección.

Figura 98

Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador en forma de S

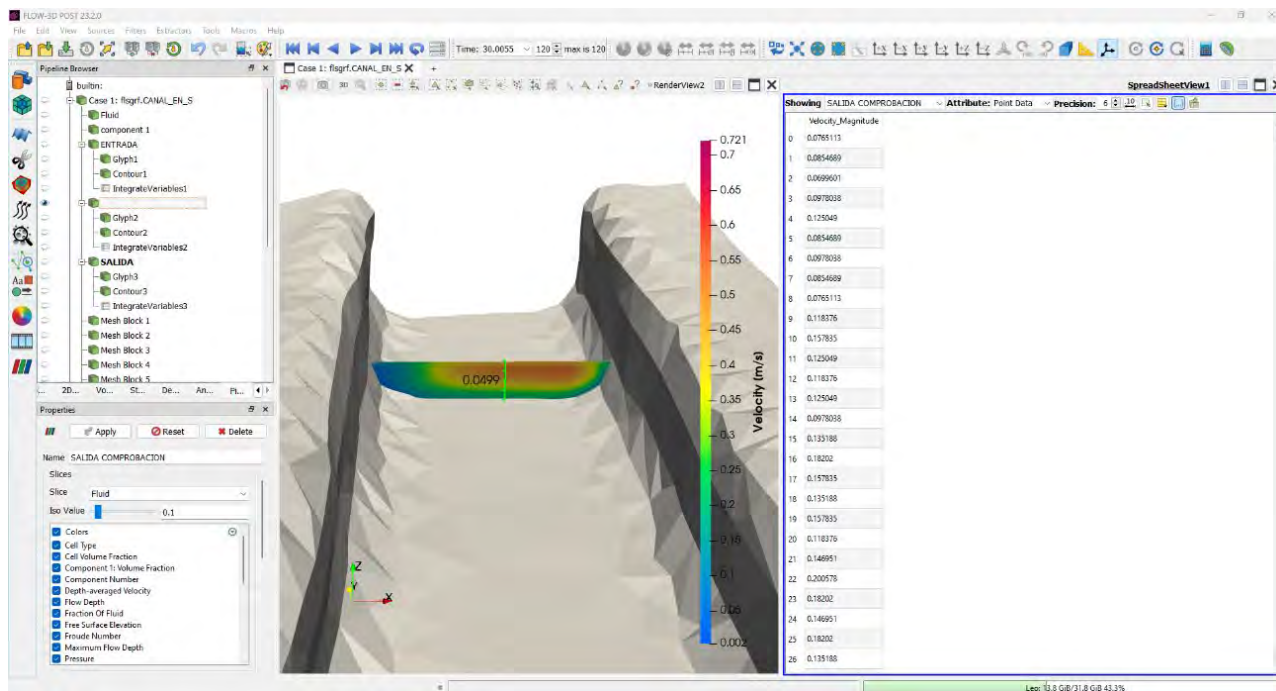


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 99** la velocidad superficial de salida es mucho menor al resultado de entrada, pero el resultado importante para el análisis de eficiencia de disipación cinética será el promedio de los 796 datos que nos vota el software dando como resultado la velocidad promedio de 0.31 m/s.

Figura 99

Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador en forma de S



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.1.3.3. Simulación del dissipador en forma de T

Se observa en la **Figura 100** la toma real del dissipador en forma de T donde se realizó la toma de imágenes, el levantamiento LIDAR y su correspondiente STL para poder realizar el análisis en el Flow 3D.

Figura 100

Toma aérea con dron del dissipador en forma en T

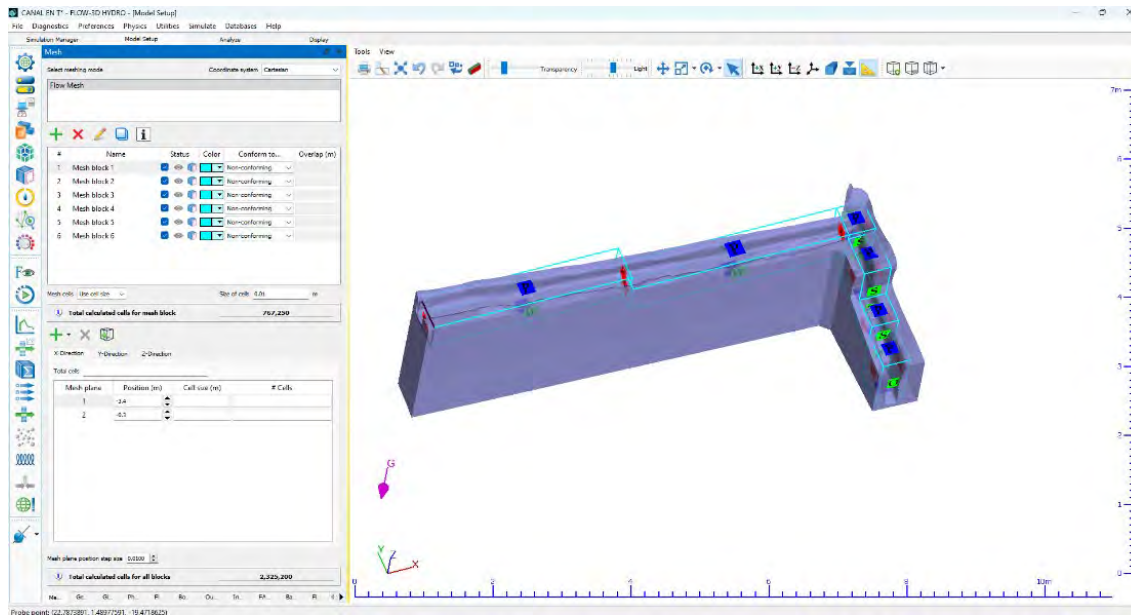


Nota. Elaboración Propia

Se realizó la creación de los Mesh Blocks correspondientes que dichas mallas nos ayudara a realizar el modelamiento, colocando las condiciones iniciales tanto del fluido, así como las condiciones de borde correspondientes a cada Mesh Block, y dando un total de 2,325,200 celdas de un tamaño de 0.01 m cada una.

Figura 101

Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de T

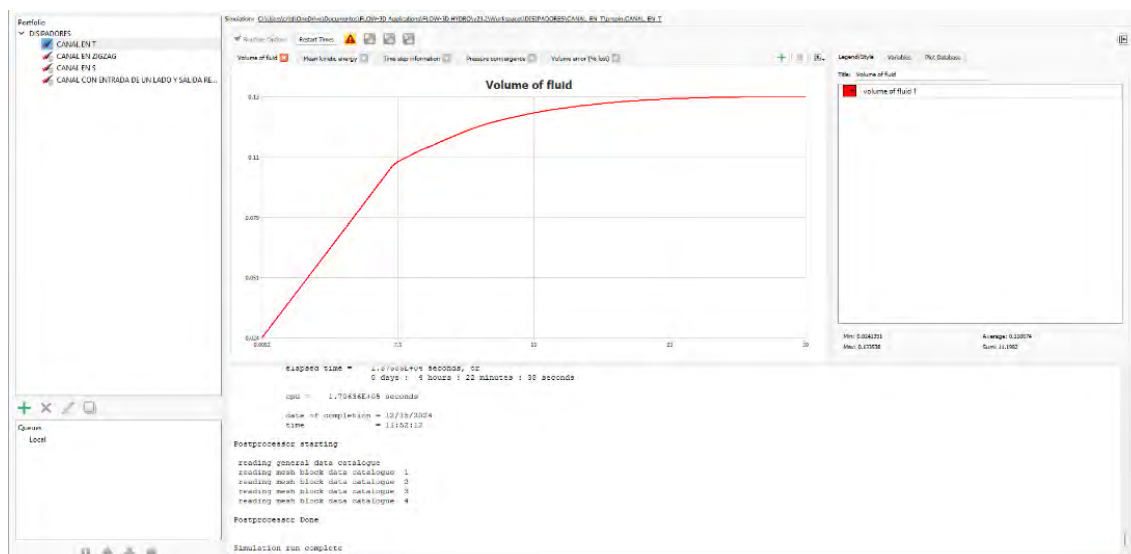


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se procede a realizar la simulación dando un tiempo total de esta simulación de 30s donde los datos de Select y Restart se configuro cada 0.25s.

Figura 102

Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de T



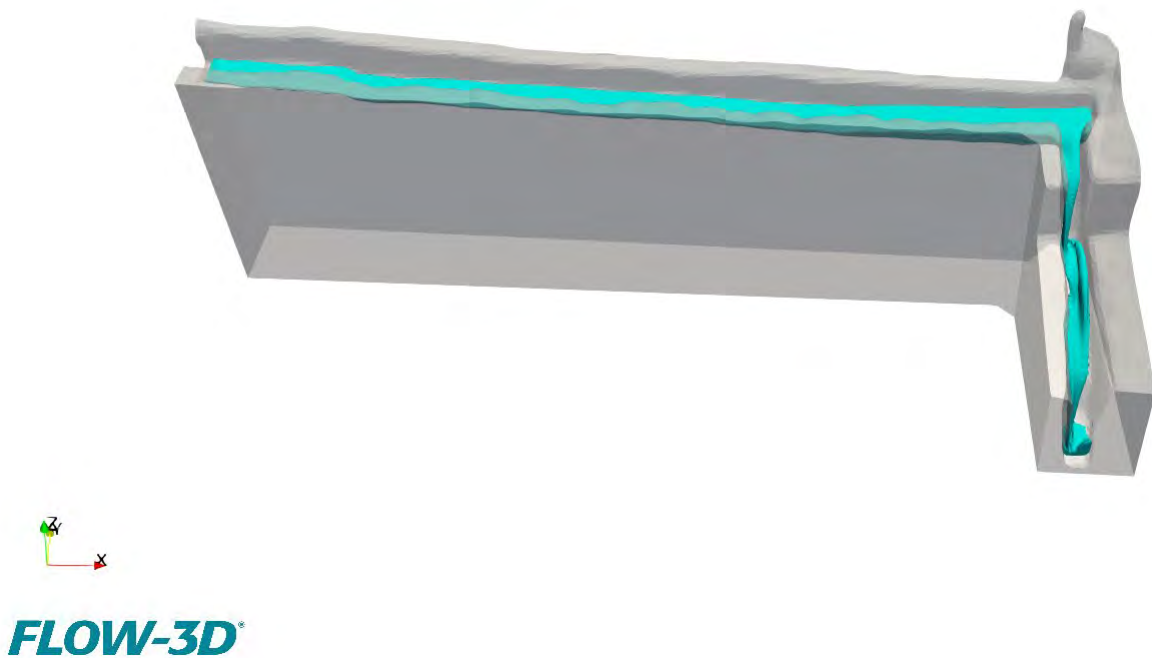
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Terminada la simulación se extraerá los datos y la visualización de la simulación en el software Flow 3D Post donde podremos ver tanto el disipador en este caso el disipador en forma de T y el fluido como se observa en la **Figura 103** de forma tridimensional del flujo dentro del canal.

Figura 103

Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del disipador en forma de T

Time: 30.001 s



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa el perfil longitudinal del disipador, donde se observa que el disipador posee una ligera pendiente la cual esta disipada por una sección adicional antes de la caída para poder amortiguar y disipar la energía cinética, este disipador no se caracteriza por tener curvas.

Figura 104

Perfil longitudinal del dissipador en forma de T

Time: 30.001 s

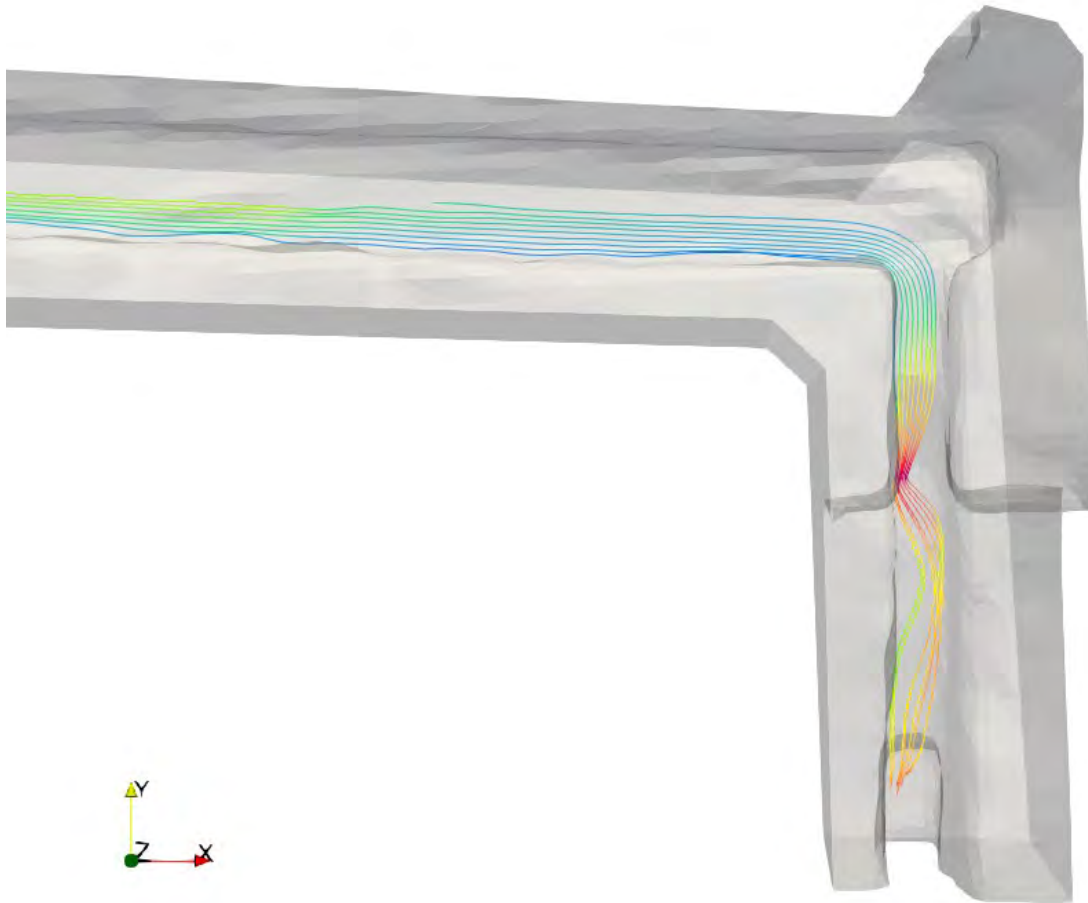


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa las líneas de corriente del flujo de agua en el canal donde este análisis nos permitirá observar el movimiento del fluido y ver los cambios en la estructura del flujo que son características clave para el cálculo de la eficiencia del dissipador y ver el comportamiento del dissipador.

Figura 105

Líneas de flujo del dissipador en forma de T



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

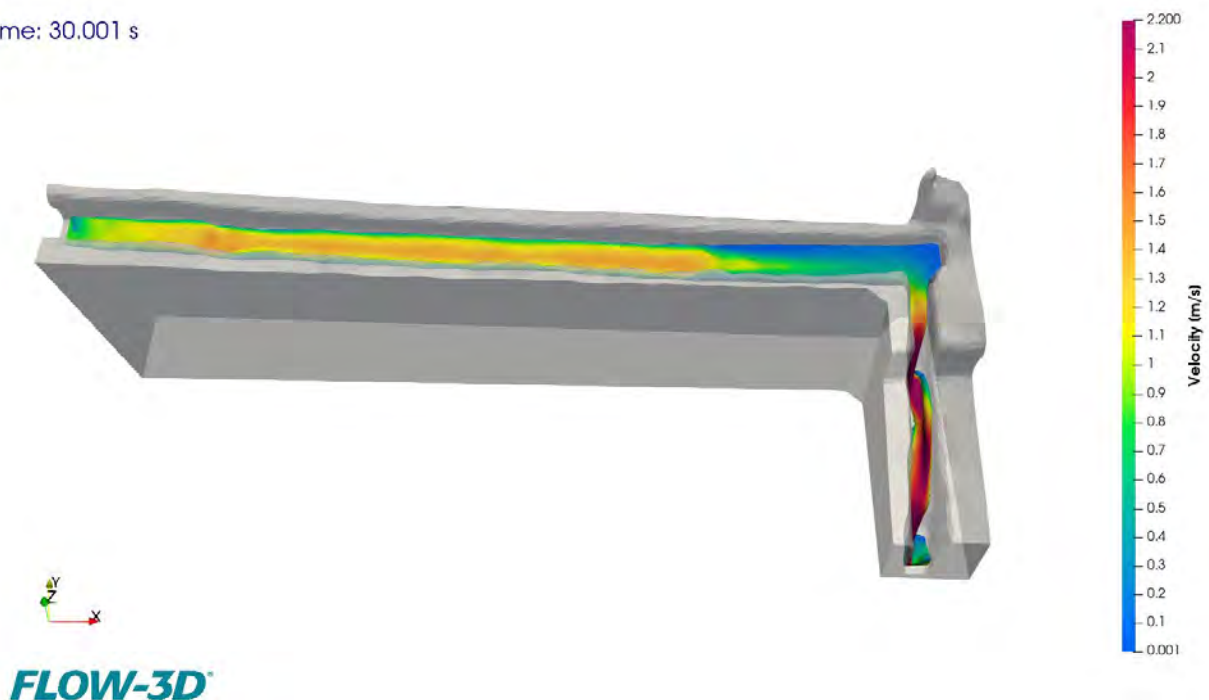
La geometría de este dissipador que hace referencia a una forma de T obliga al flujo a pasar por esta y hacer una vorticidad y turbulencia que ayudan a disipar la energía cinética del canal, y así que el flujo no llegue con la velocidad de entrada y así haber un rebalse de agua alrededor del canal y seguir con su circulación de manera óptima.

Se observa el resultado de la simulación con una gráfica de colores de acuerdo con la velocidad máxima y velocidad mínima en el canal, donde se observa que en la parte inicial del dissipador la velocidad del flujo es mucho mayor comparado a la velocidad cuando realiza el paso por la T y hace que amortigüe la velocidad haciendo que haya una disipación antes de entrar en la caída del canal.

Figura 106

Distribución del campo de velocidades en el dissipador en forma de T

Time: 30.001 s

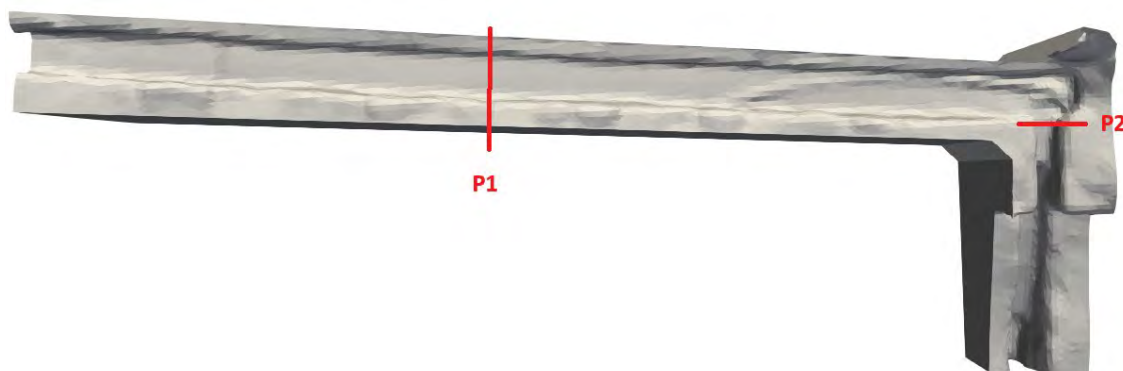


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se realizó el análisis de datos de la simulación en los siguientes puntos denominados P1 Punto de Entrada y P2 denominado Punto de Salida. Donde en ambos puntos se realizó la toma de datos del vertedero y del LSPIV para corroboración de los resultados del modelamiento.

Figura 107

Puntos de comprobación del dissipador en forma de T

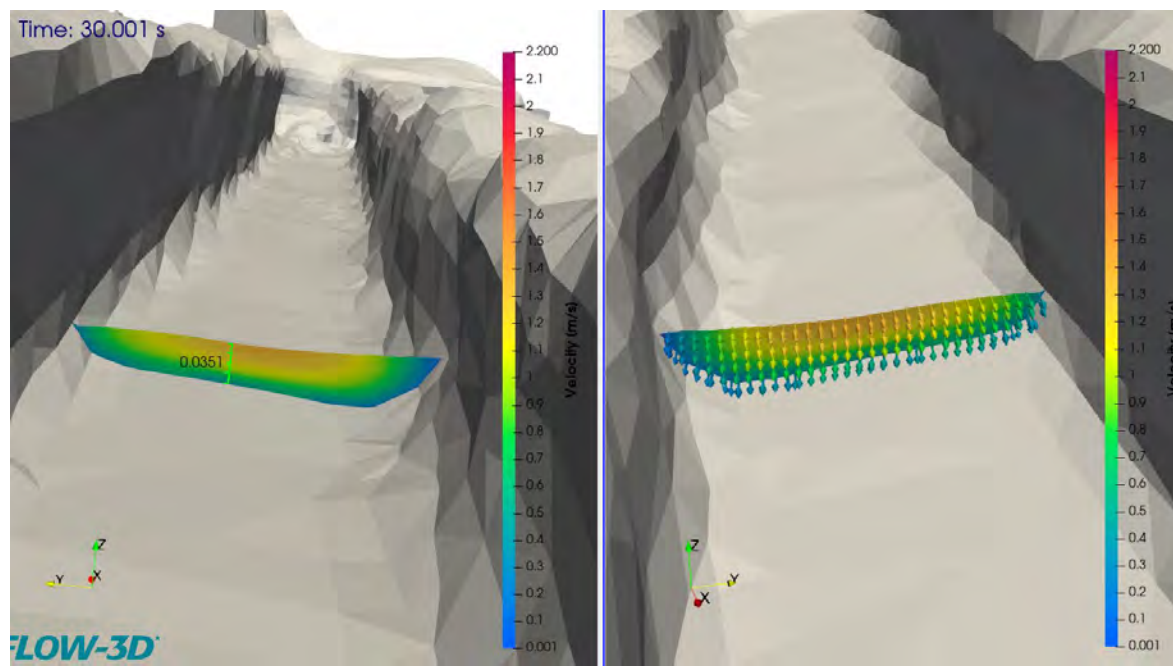


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Los resultados en el punto P1 de entrada son los siguientes, realizamos un corte transversal donde se observa el conjunto de velocidad en cada punto de la sección de agua que pasa en este tramo y así realizar la extracción para sacar la velocidad promedio.

Figura 108

Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador en forma de T

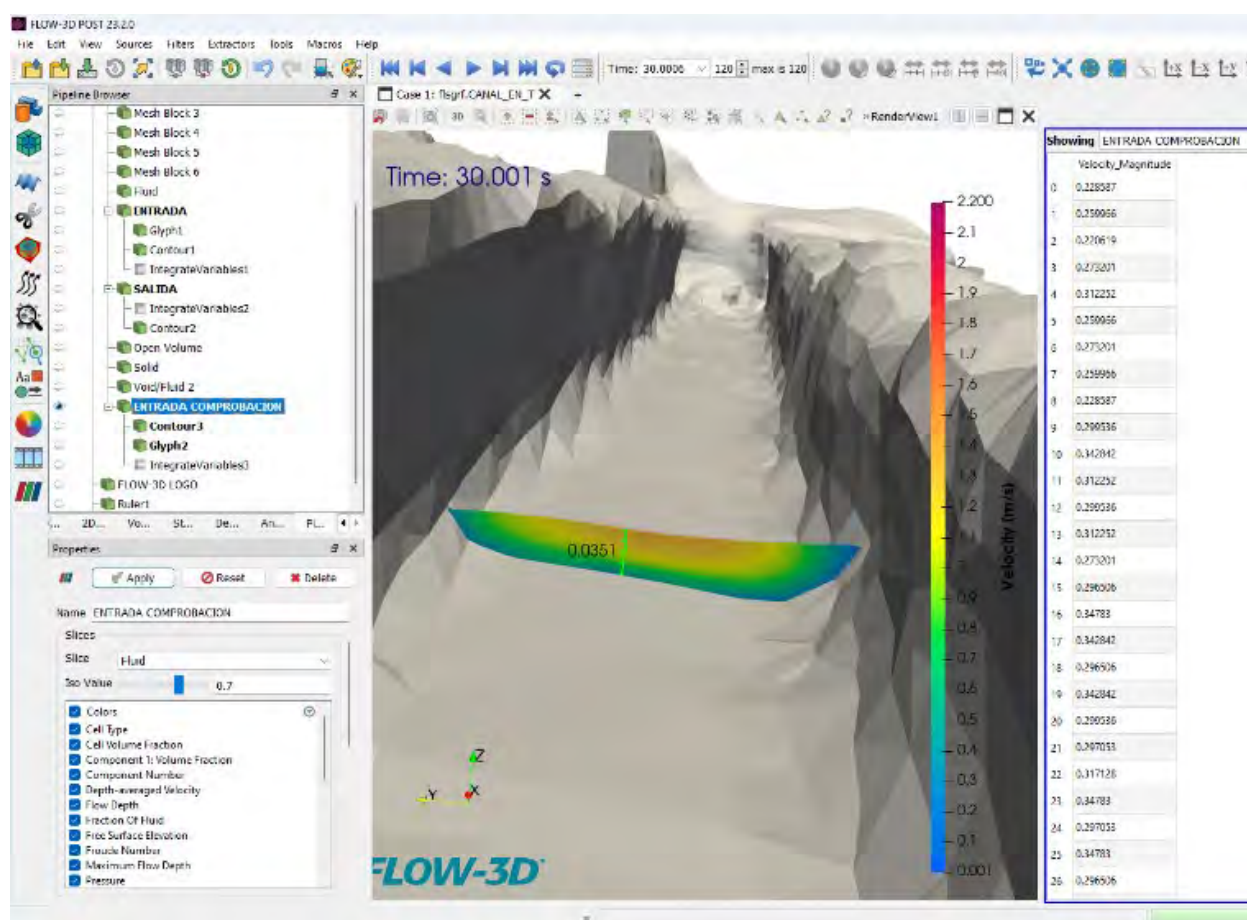


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa que la velocidad superficial en el punto de entrada es alta, donde nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 958 datos de cada punto de la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.83 m/s.

Figura 109

Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador en forma de T

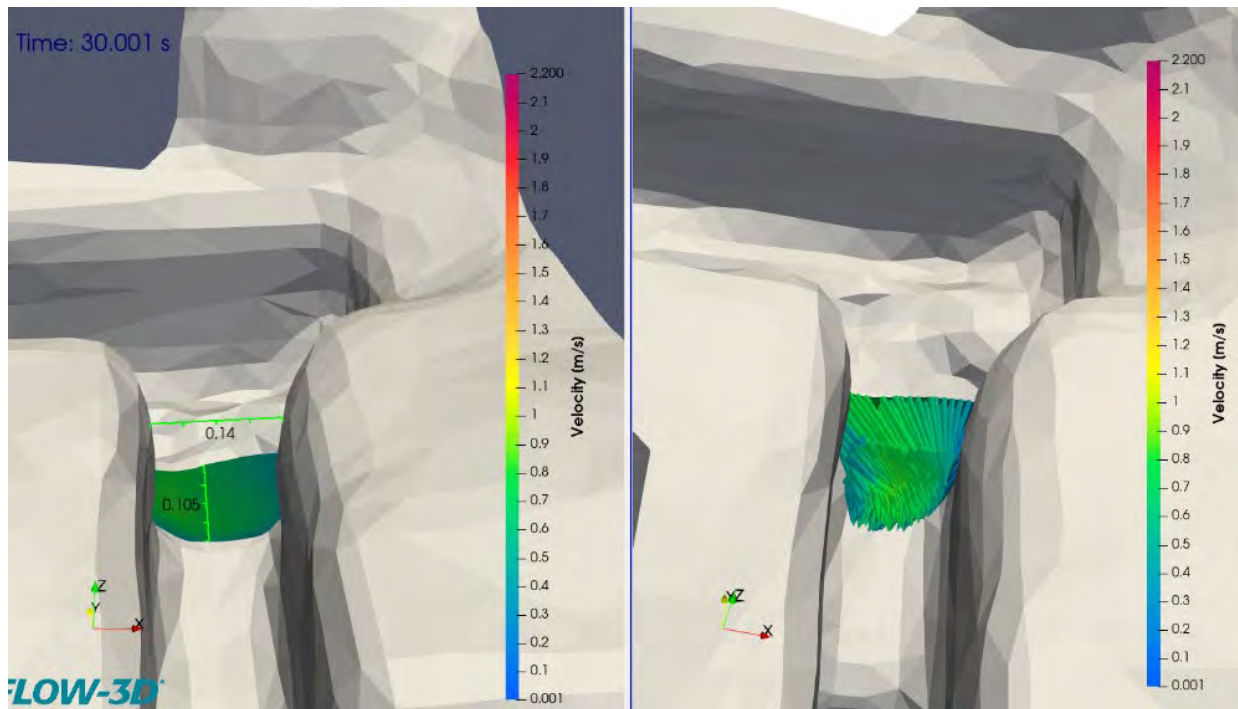


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Los resultados en el punto P2 de salida son los siguientes, realizamos un corte transversal donde se observa el conjunto de velocidad en cada punto de la sección de agua que pasa por en este tramo y así realizar la extracción para sacar la velocidad promedio.

Figura 110

Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador en forma de T

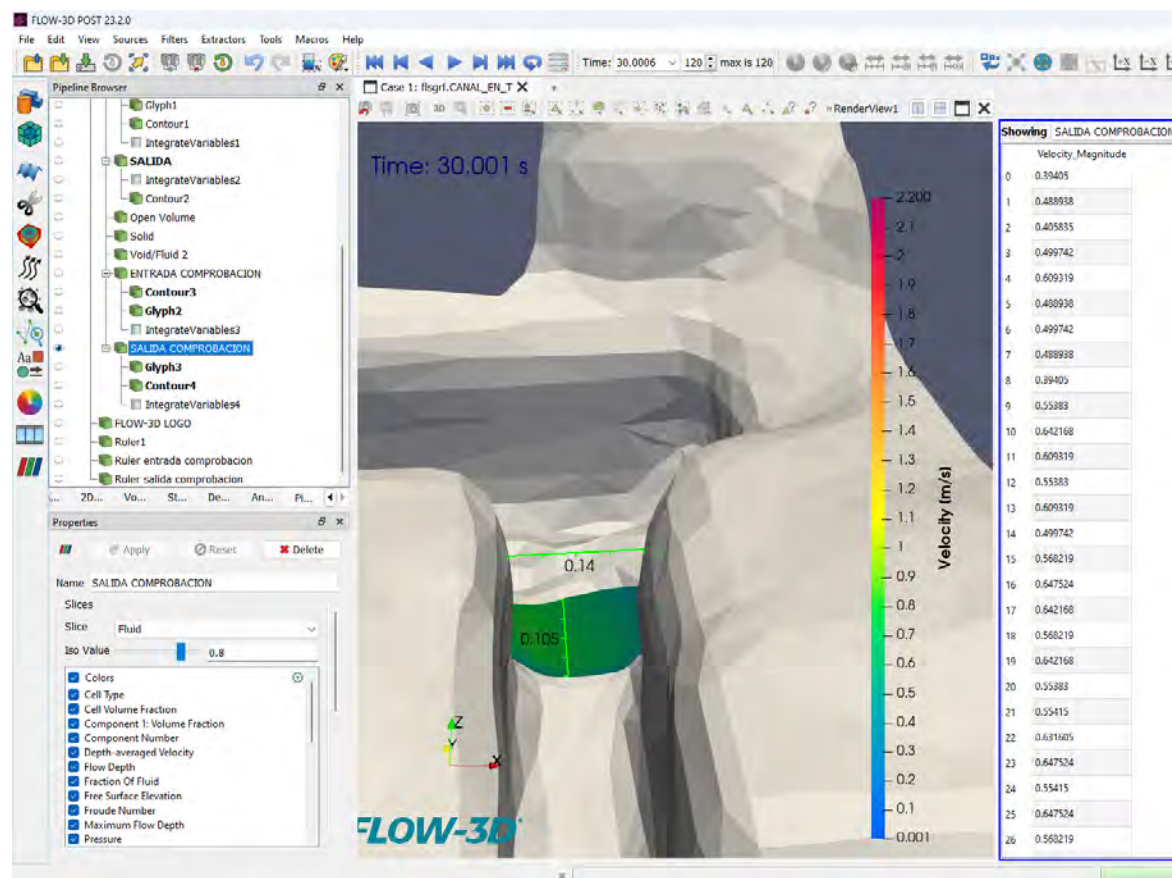


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 110** que la velocidad superficial en el punto de salida es mucho menor que en el punto de entrada, observando la disipación gracias a la vorticidad que genera la T, aquí nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 1321 puntos de velocidad en la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.61 m/s

Figura 111

Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador en forma de T



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.1.3.3.4. Simulación del dissipador en forma de Zigzag

Se observa la toma real del dissipador en forma de Zigzag donde se realizó el levantamiento LIDAR, toma de imágenes y su correspondiente STL para poder realizar el análisis en el Flow 3D.

Figura 112

Toma aérea con dron del dissipador en forma en Zigzag

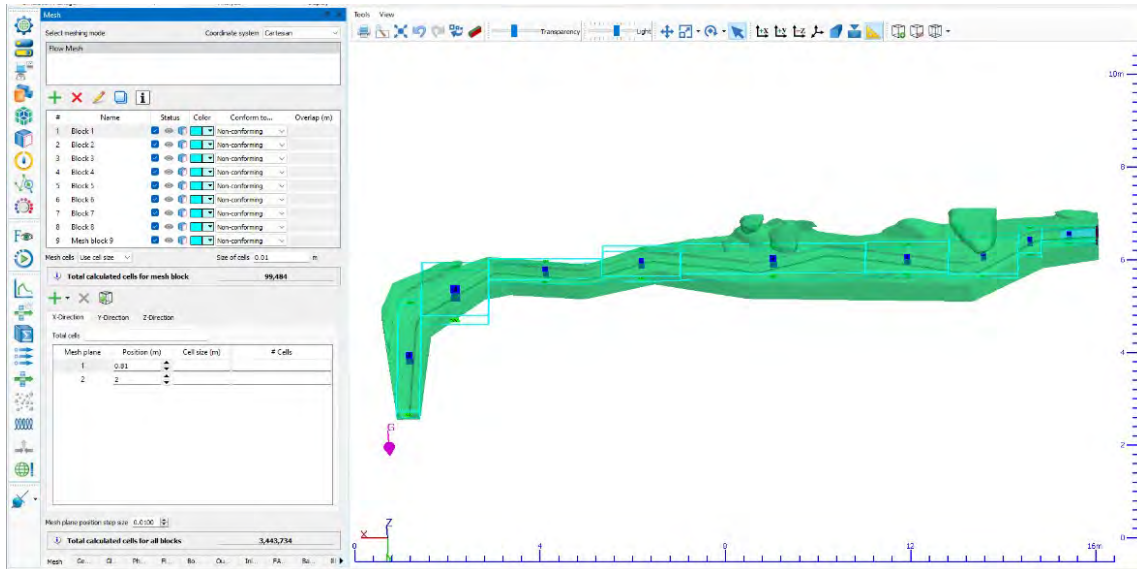


Nota. Elaboración Propia

Se realizó la creación de los Mesh Blocks correspondientes que dichas mallas nos ayudara a realizar el modelamiento, colocando las condiciones iniciales tanto del fluido, así como las condiciones de borde correspondientes a cada Mesh Block, y dando un total de 3,443,734 celdas de un tamaño de 0.01 m cada una.

Figura 113

Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de Zigzag

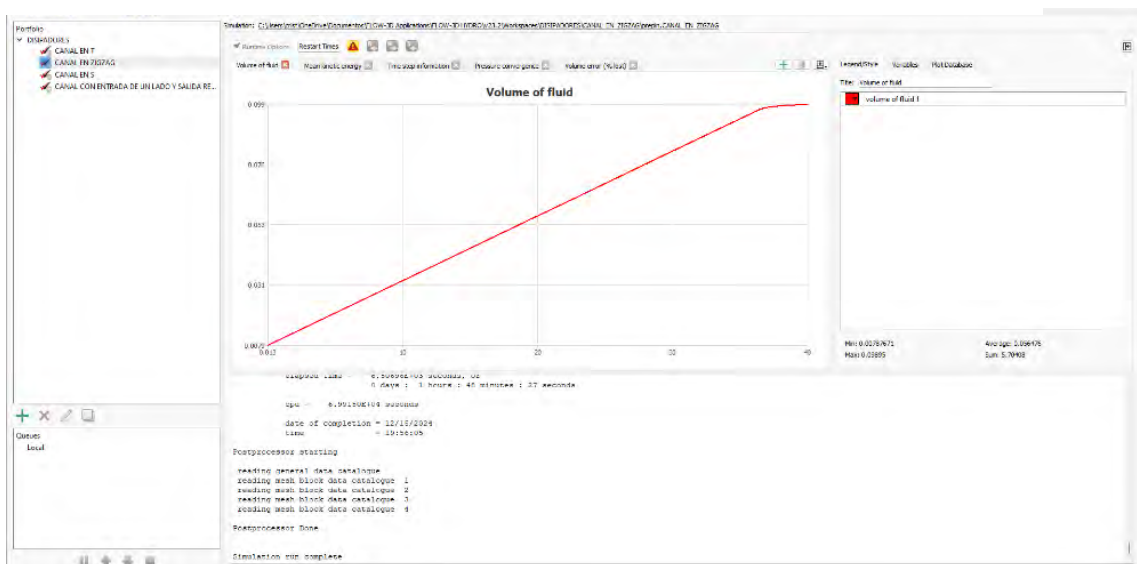


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se procede a realizar la simulación dando un tiempo total de esta simulación de 40s donde los datos de Select y Restart se configuro cada 0.25s.

Figura 114

Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador en forma de Zigzag



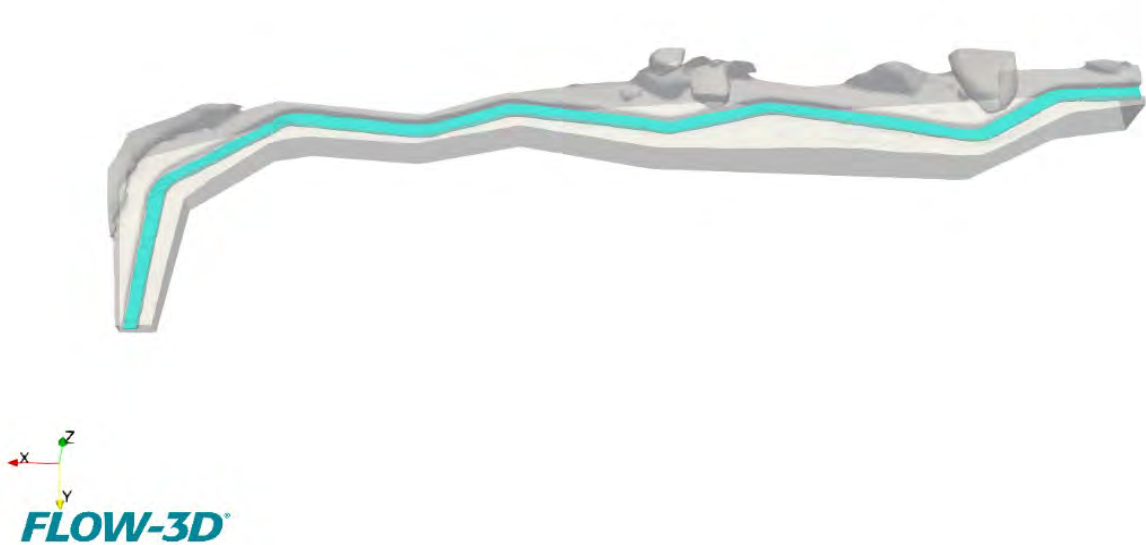
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Terminada la simulación se extraerá los datos y la visualización de la simulación en el software Flow 3D Post donde podremos ver tanto el disipador en este caso el disipador en forma de Zigzag y el fluido como se observa en la **Figura 115** de forma tridimensional del flujo dentro del canal.

Figura 115

Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del disipador en forma de Zigzag

Time: 40.003 s



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa el perfil longitudinal del disipador en forma de Zigzag, donde se observa que el disipador posee una ligera pendiente la cual esta esta al culminar el canal y que influye ligeramente en un aumento de velocidad después de que haya una disipación, este disipador se caracteriza por tener múltiples curvas en forma de Zigzag para poder disipar la energía cinetica, sin este disipador la velocidad sería muy excesiva a la salida y haría que el fluido llegue a un tirante mayor a la altura del canal y haya perdida de fluido.

Figura 116

Perfil longitudinal del disipador en forma de Zigzag



FLOW-3D®

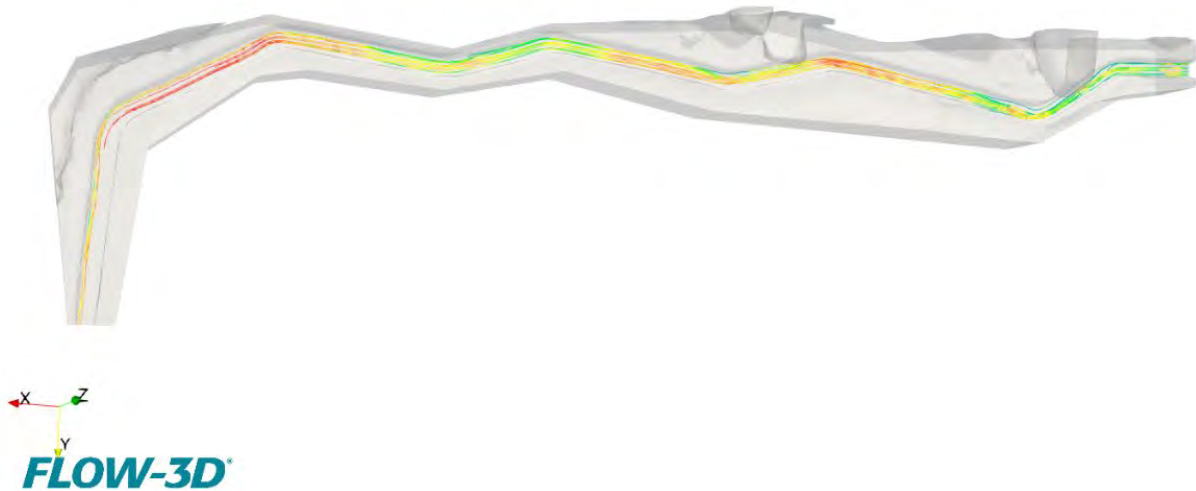
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa las líneas de corriente del flujo de agua en el canal donde este análisis nos permitirá observar el movimiento del fluido y ver los cambios en la estructura del flujo gracias a las múltiples curvas del zigzag que son características clave para el cálculo de la eficiencia del disipador y ver el comportamiento del disipador.

La geometría de este disipador que hace referencia a una forma de Zigzag que obliga al flujo a pasar por estas curvas y ayudan a disipar la energía cinética del canal, y que el flujo no llegue con la velocidad alta y así no haber un rebalse de agua alrededor del canal y seguir con su circulación de manera óptima.

Figura 117

Líneas de flujo del dissipador en forma de Zigzag



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa el resultado de la simulación con una gráfica de colores de acuerdo con la velocidad máxima y velocidad mínima en el canal, donde se observa que en la parte inicial del dissipador la velocidad del flujo es mucho mayor comparado a la velocidad cuando realiza el paso por las curvas del Zigzag y hace que amortigüe la velocidad haciendo que haya una disipación antes de entrar a la salida del canal.

Figura 118

Distribución del campo de velocidades en el dissipador en forma de Zigzag

Time: 40.003 s



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se realizó el análisis de datos de la simulación en los siguientes puntos denominados P1 Punto de Entrada y P2 denominado Punto de Salida. Donde en ambos puntos se realizó la toma de datos del vertedero y del LSPIV para corroboración de los resultados del modelamiento.

Figura 119

Puntos de comprobación del dissipador en forma de Zigzag

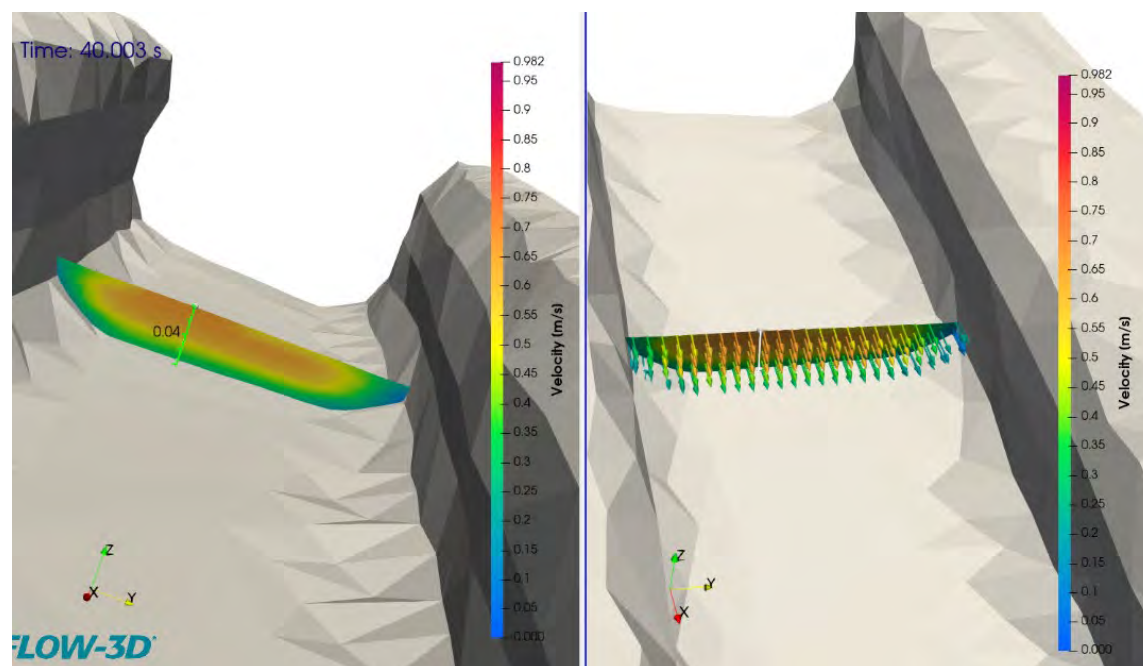


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Los resultados en el punto P1 de entrada son los siguientes, realizamos un corte transversal donde se observa el conjunto de velocidad en cada punto de la sección de agua que pasa en este tramo y así realizar la extracción para sacar la velocidad promedio.

Figura 120

Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador en forma de Zigzag

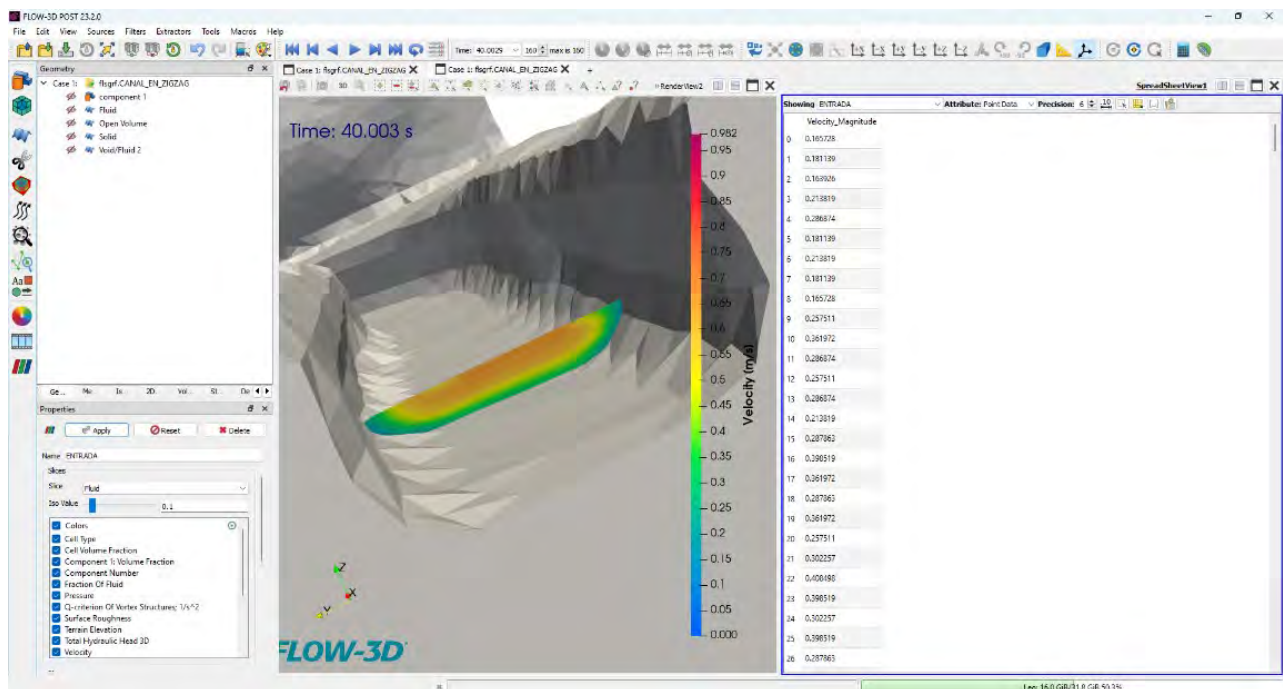


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa que la velocidad superficial en el punto de entrada es alta, donde nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 534 en cada punto de la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.45 m/s.

Figura 121

Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador en forma de Zigzag

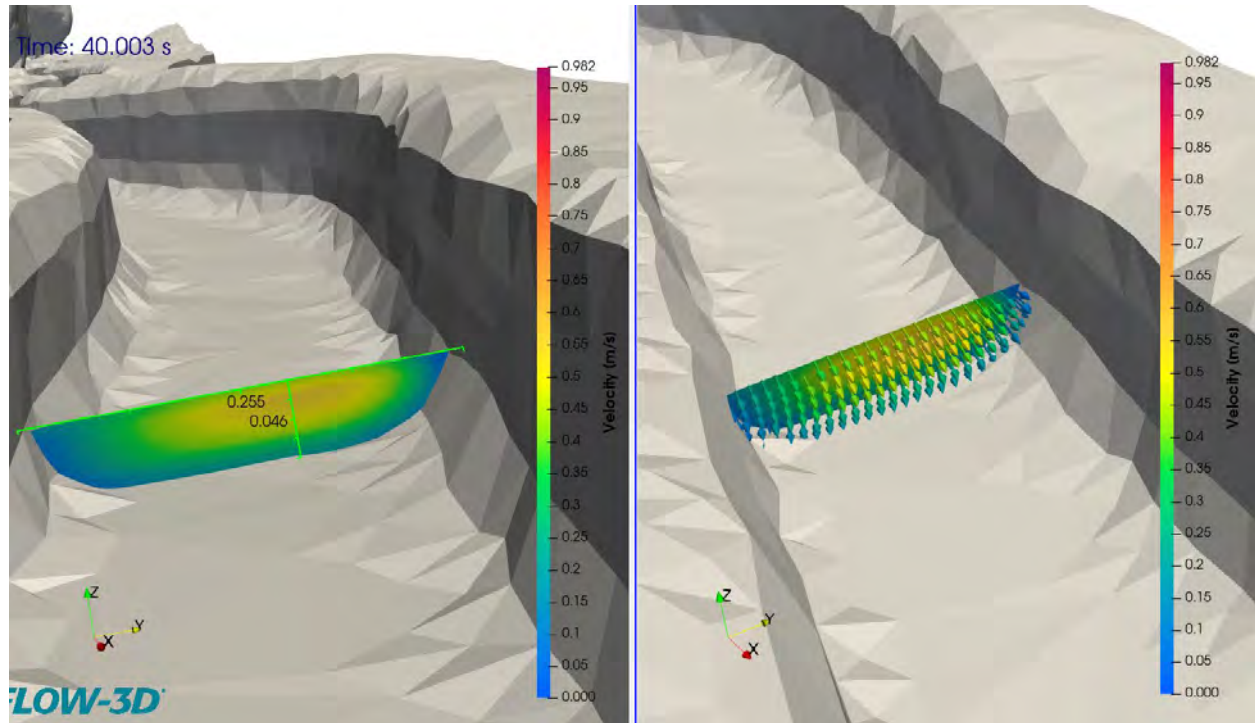


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Los resultados en el punto P2 de salida son los siguientes, realizamos un corte transversal donde se observa el conjunto de velocidad en cada punto de la sección de agua que pasa por en este tramo y así realizar la extracción para sacar la velocidad promedio.

Figura 122

Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador en forma de Zigzag

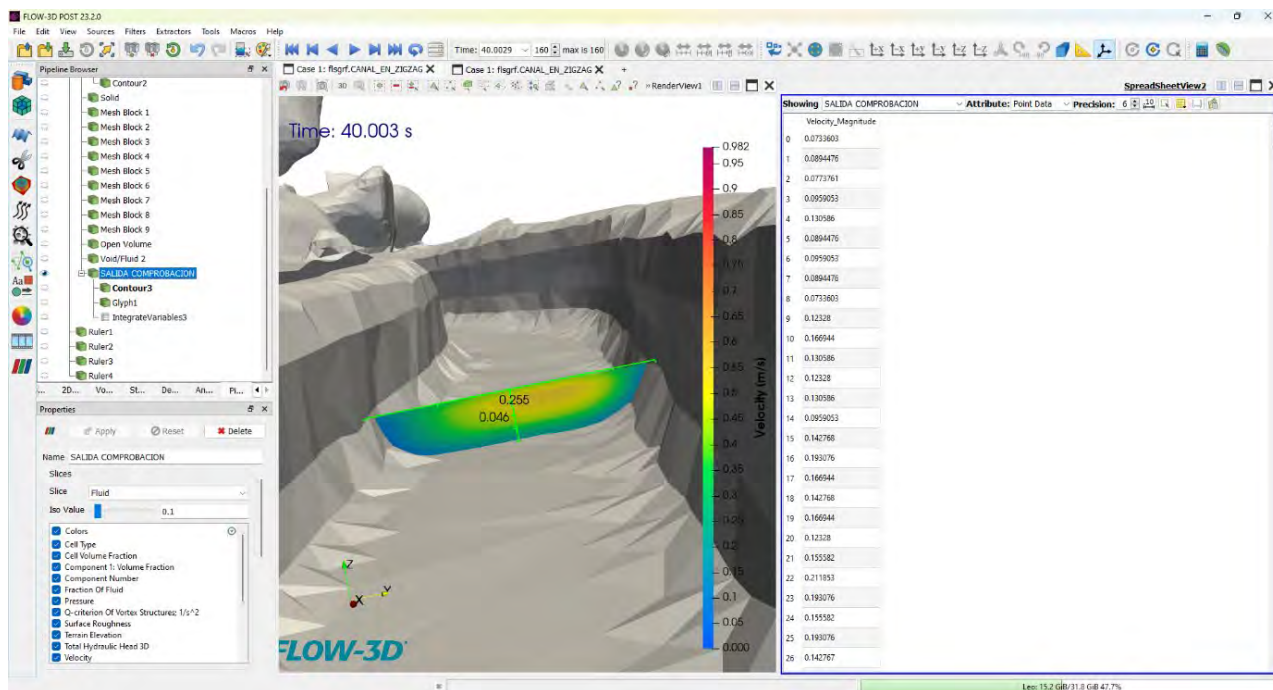


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 123** que la velocidad superficial en el punto de salida es mucho menor que en el punto de entrada, observando la disipación gracias a las curvas que posee el Zigzag, aquí nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 652 puntos de velocidad en la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.35 m/s.

Figura 123

Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador en forma de Zigzag



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.1.3.3.5. Simulación del dissipador de caída con doble salida

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante un levantamiento topográfico utilizando tecnología LiDAR, complementado con un vuelo de dron a baja altura, con el objetivo de obtener registros visuales en video de la caída de agua de doble salida para la posterior validación. A partir de la información recolectada, se generó el modelo tridimensional en formato STL, el cual fue empleado posteriormente para el análisis numérico en el software FLOW-3D.

Figura 124

Toma aérea con dron del dissipador de caída con doble salida

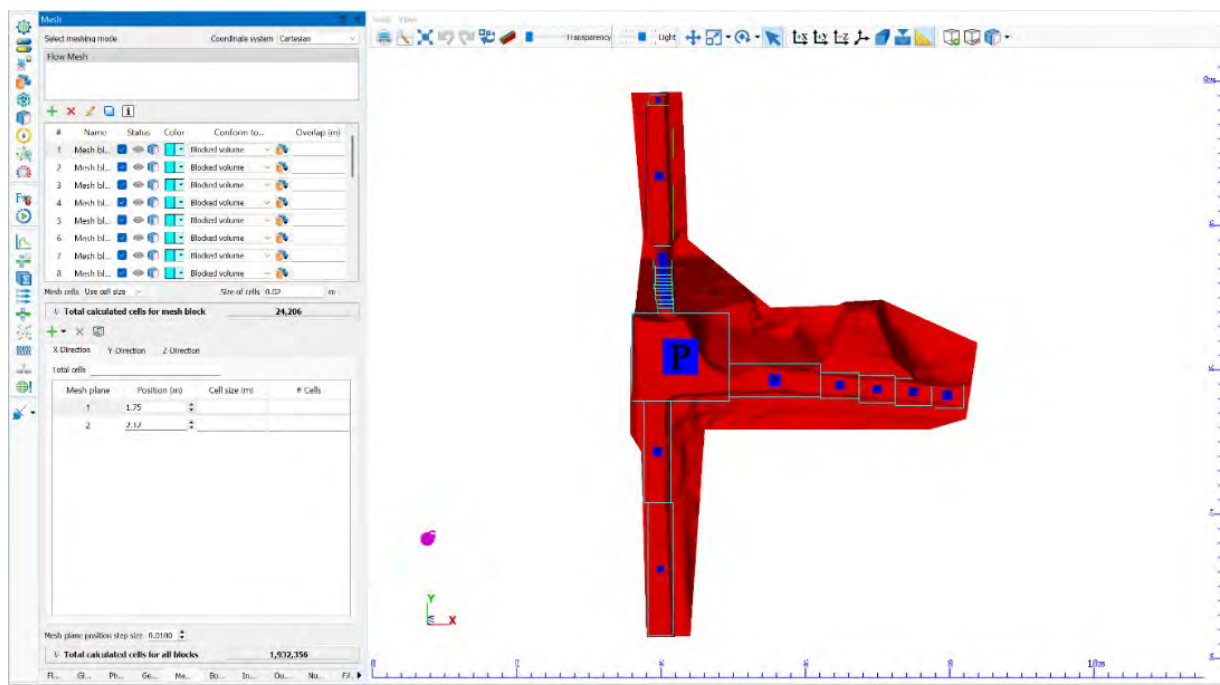


Nota. Elaboración Propia

Se procedió a la creación de los MESH BLOCKS correspondientes, los cuales permitieron definir el dominio computacional necesario para el modelamiento hidrodinámico. En cada bloque de malla se establecieron las condiciones iniciales del fluido, así como las condiciones de frontera específicas según su ubicación y función dentro del modelo. El dominio total estuvo conformado por 1,932,356 celdas, con un tamaño uniforme de malla de 0.01 metros por celda, lo que permitió un nivel de detalle adecuado para analizar en FLOW-3D.

Figura 125

Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con doble salida



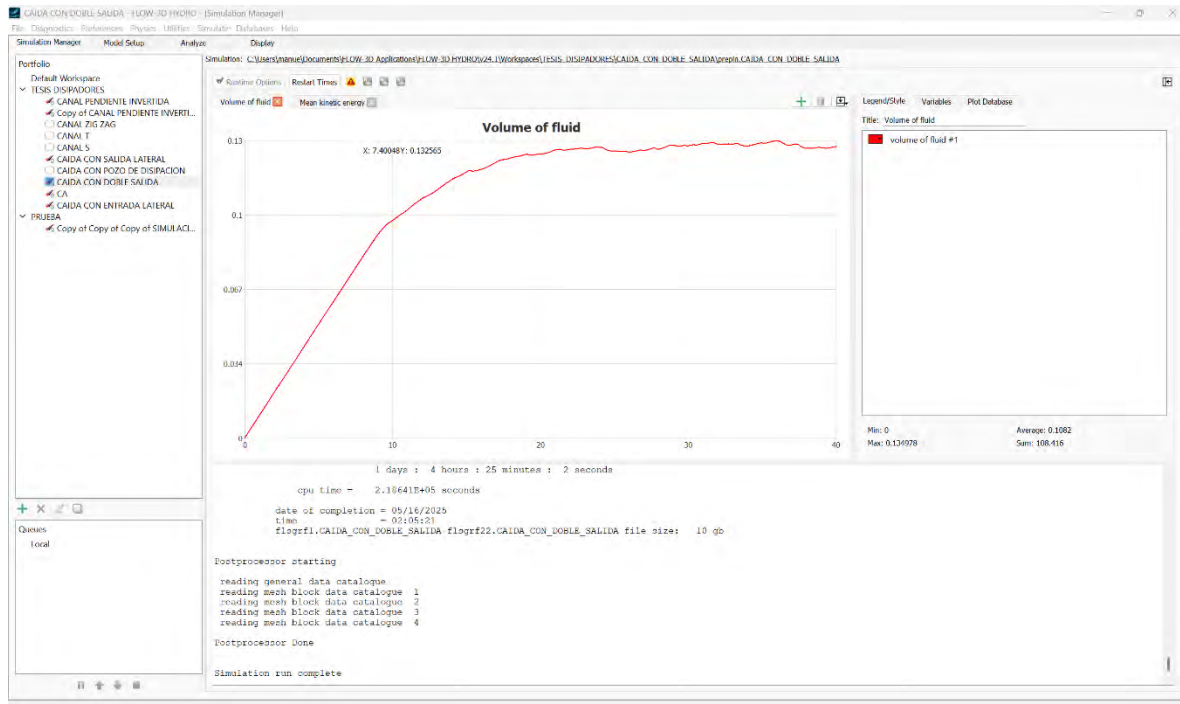
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se llevó a cabo la simulación numérica con una duración total de 40 segundos. Para el registro de resultados visuales, se configuraron los parámetros **SELECT** y **RESTART** con un

intervalo de salida de datos visual cada segundo, permitiendo así una resolución temporal suficiente para el análisis detallado del comportamiento del flujo durante el proceso simulado.

Figura 126

Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con doble salida

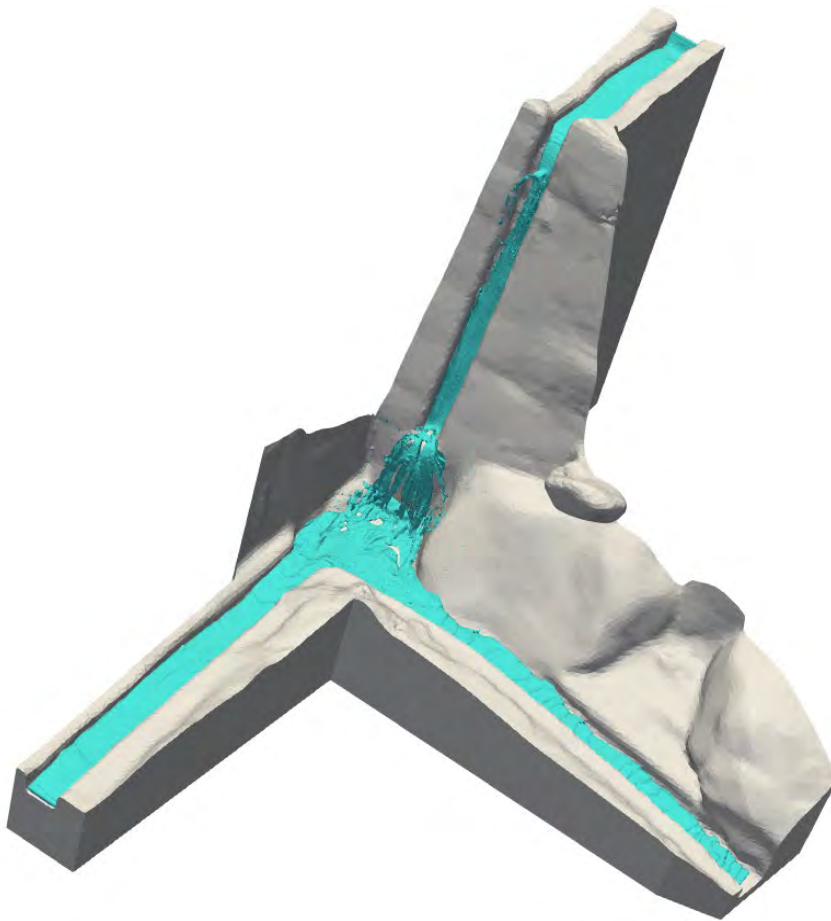


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 127** se muestra una vista general del modelo con la simulación concluida, utilizando una representación en color sólido del fluido. Esta visualización permite identificar únicamente el volumen ocupado por el flujo dentro del dominio, no se asocia ningún parámetro físico específico. El objetivo de esta captura es proporcionar una percepción clara de la distribución espacial del fluido y su interacción con la geometría del dissipador, al margen de los datos cuantitativos.

Figura 127

Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del dissipador de caída con doble salida



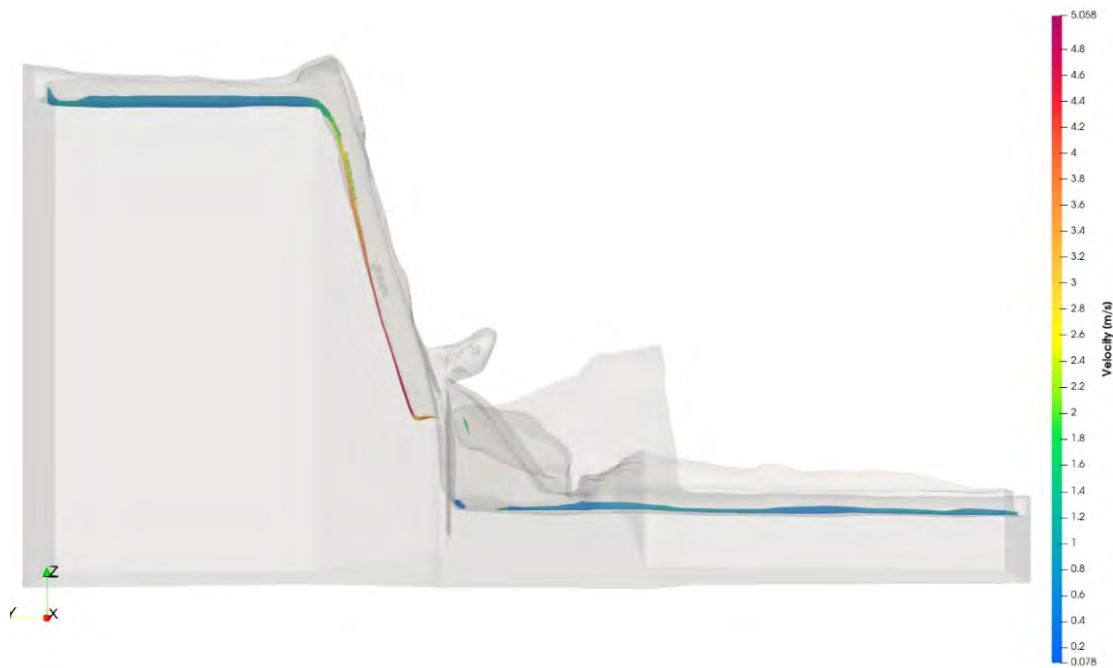
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 131** se ilustran las líneas de flujo obtenidas durante la simulación. Estas permiten analizar la trayectoria del fluido dentro del dissipador y detectar patrones de recirculación o turbulencia en partículas. La coherencia y continuidad del flujo se mantiene en la mayoría del dominio, aunque se evidencian perturbaciones localizadas asociadas a cambios geométricos.

En la **Figura 128** se presenta un corte longitudinal del modelo en el eje X, donde se visualiza el comportamiento del fluido durante la simulación, representado mediante un mapa de velocidades. Esta captura permite observar la distribución espacial de la magnitud de la velocidad en todo el dominio, identificando claramente las zonas de mayor y de menor intensidad del flujo. La representación es útil para interpretar el desarrollo global del movimiento del fluido y su interacción con los elementos geométricos del dissipador a lo largo del tiempo simulado.

Figura 128

Perfil longitudinal del dissipador de caída con doble salida

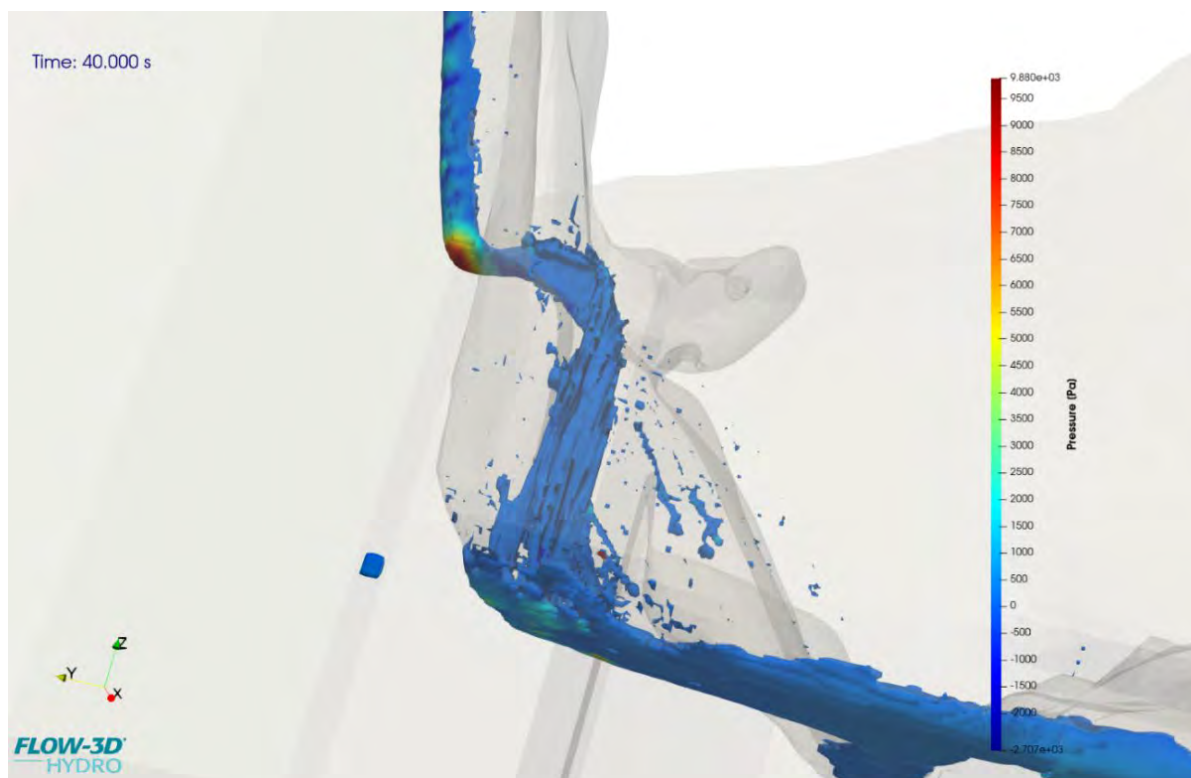


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

La **Figura 129** presenta la distribución de presión en la zona de impacto del flujo contra la estructura rocosa y el pozo receptor. Se aprecia un incremento notable de presión en el punto de impacto directo considerando un valor máximo de 9880 Pa en la estructura rocosa, lo cual resulta relevante para el análisis estructural y la verificación del comportamiento hidráulico en dicha sección.

Figura 129

Distribución de presión del dissipador de caída con doble salida

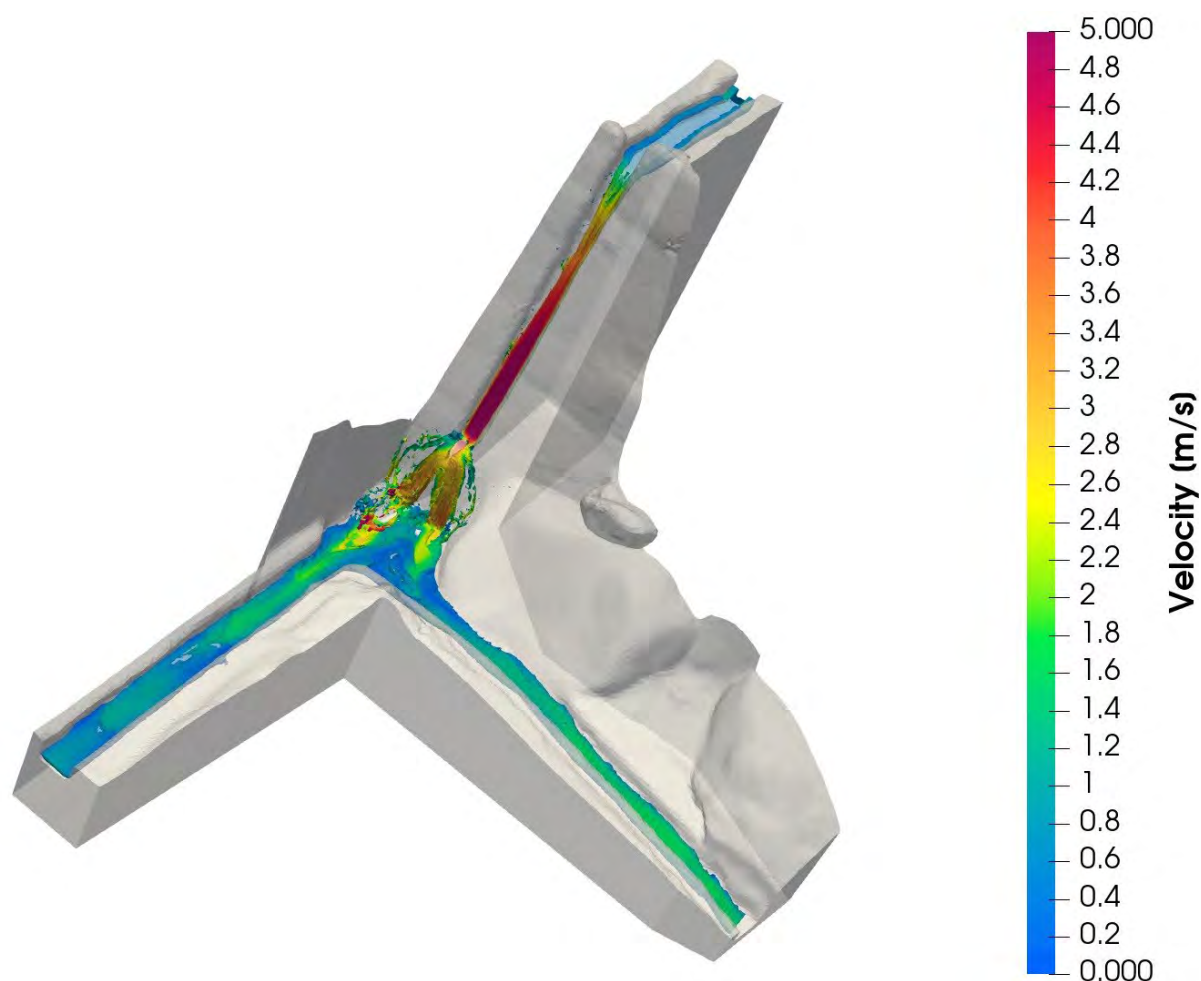


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa el resultado de la simulación con una gráfica de colores de acuerdo con la velocidad máxima y velocidad mínima en el canal, donde se observa que en la parte inicial del dissipador la velocidad es mucho menor que en una de las salidas, también se observa que la salida número 2 que esta de forma lateral a la entrada presenta un aumento de velocidad a la presencia de una pendiente que hace que el flujo de agua aumente de velocidad.

Figura 130

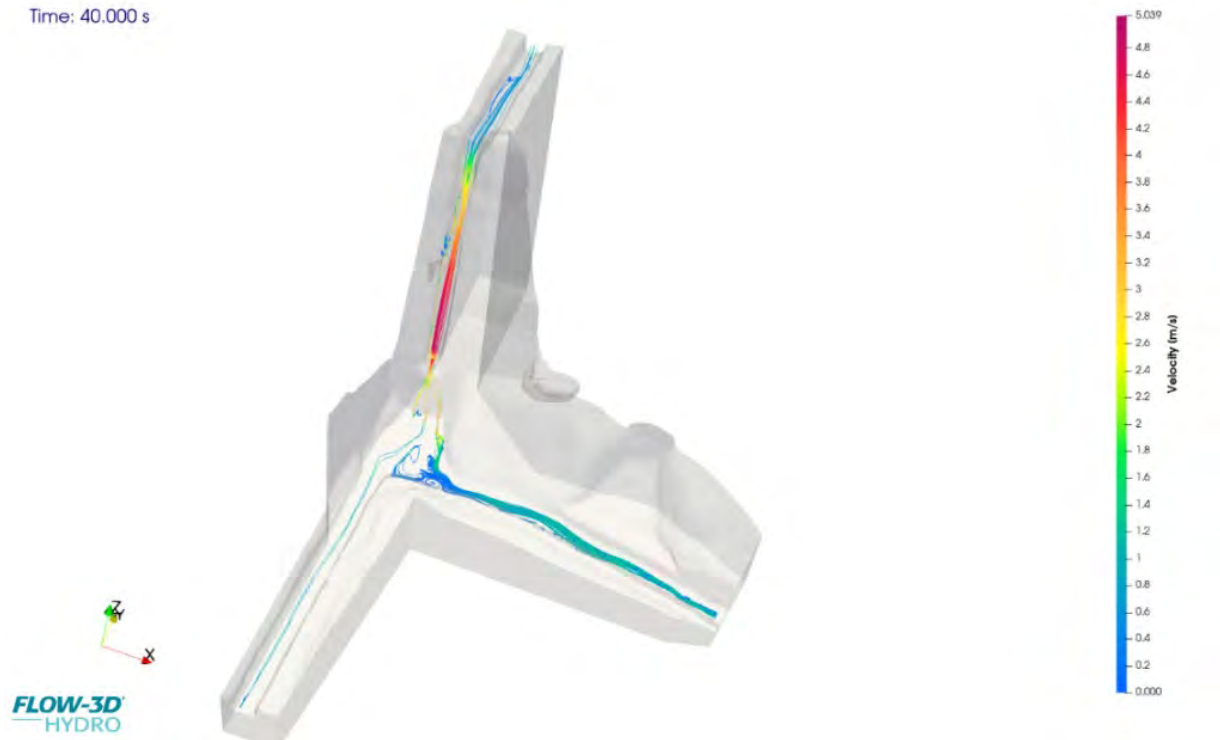
Distribución del campo de velocidades en el dissipador de caída con doble salida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Figura 131

Líneas de flujo del dissipador de caída con doble salida

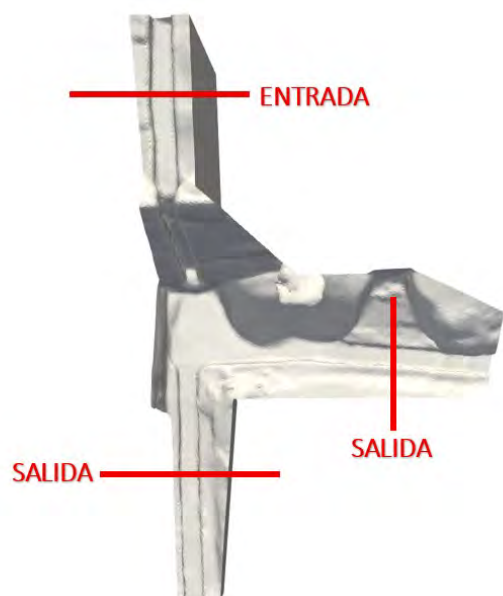


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 133** y **Figura 135** se muestran los cortes de secciones transversales al canal y la ubicación de los cortes, cada corte ubicado uno aguas arriba y otras dos aguas abajo de la caída. Estas capturas permiten analizar el comportamiento del campo de velocidades en ambas regiones permitiendo que se pueda realizar la validación de la simulación considerando los datos tomados en campo de caudal y velocidad.

Figura 132

Puntos de comprobación del dissipador de caída con doble salida

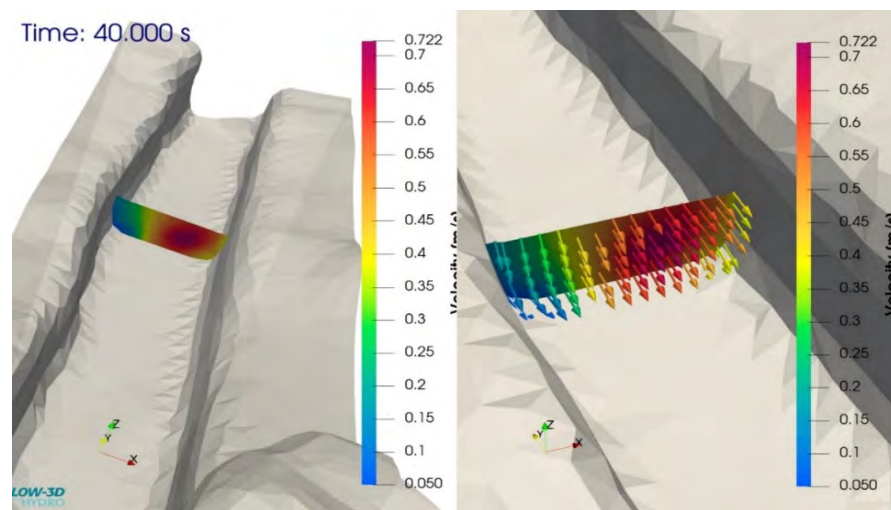


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 133** se observa el corte de sección transversal de entrada aguas arriba de la caída con vectores de velocidad

Figura 133

Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador de caída con doble salida

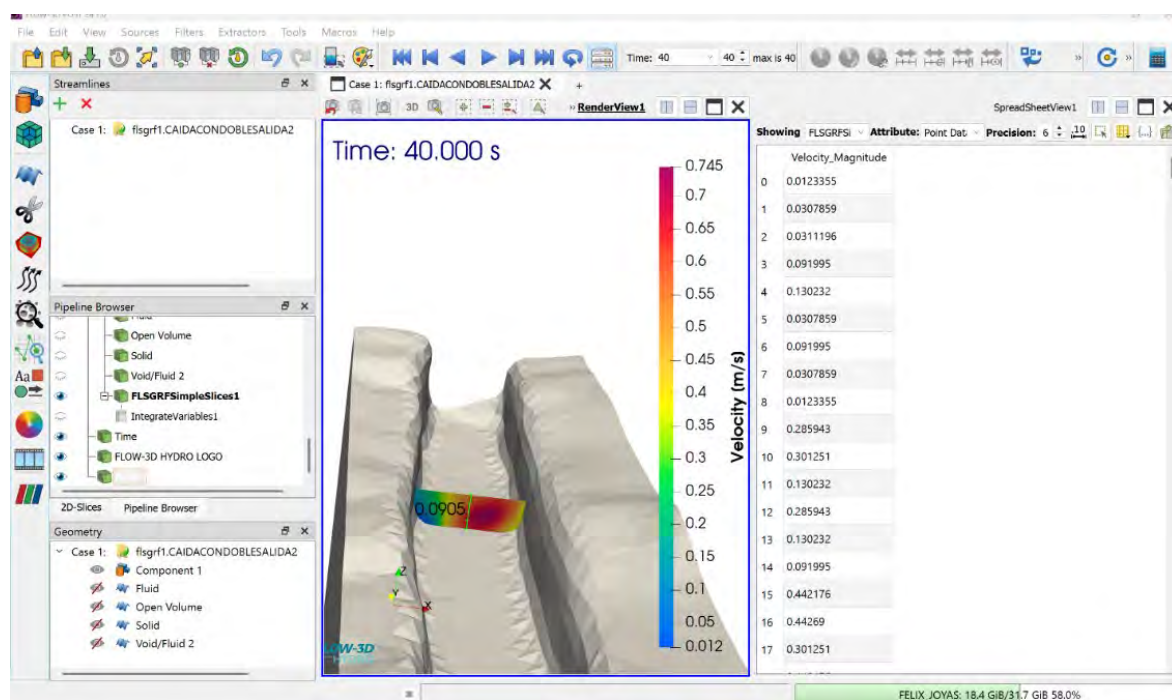


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 134** que la velocidad en el punto de entrada, donde nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 1495 en cada punto de la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.52 m/s.

Figura 134

Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador de caída con doble salida



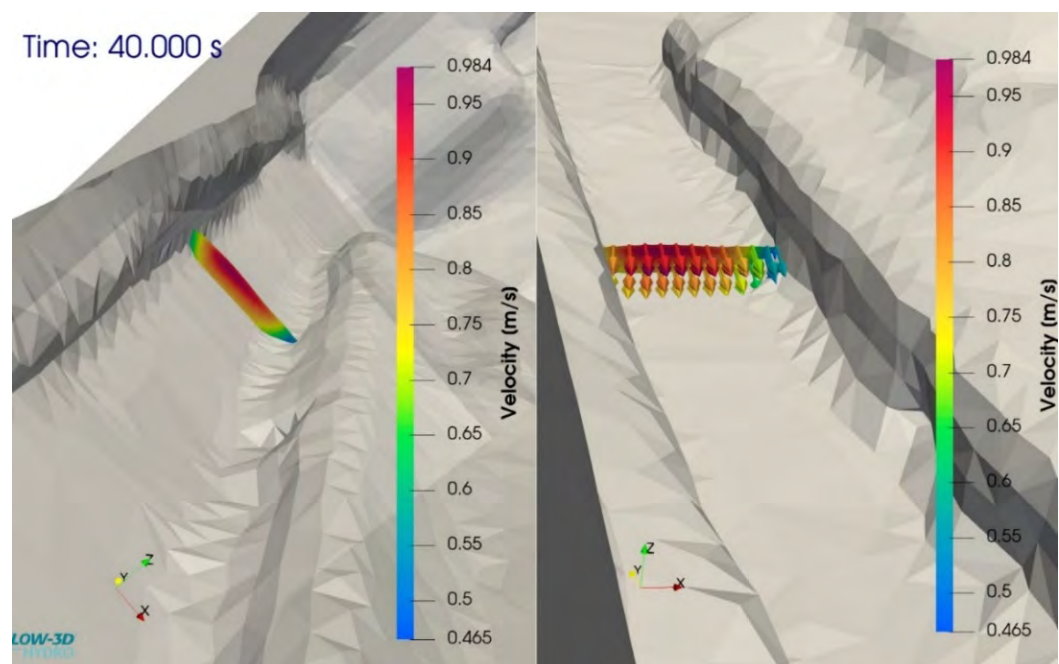
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 135** el corte de sección transversal salida 1 aguas abajo de la caída con vectores de velocidad.

Se observa en la **Figura 136** que la velocidad en la sección en el punto de salida 1 es menor que en el punto de entrada, observando la dissipación gracias a la estructura rocosa colocada antes de la poza, la velocidad en la sección en este caso son un total de 367 puntos de velocidad en la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.43 m/s.

Figura 135

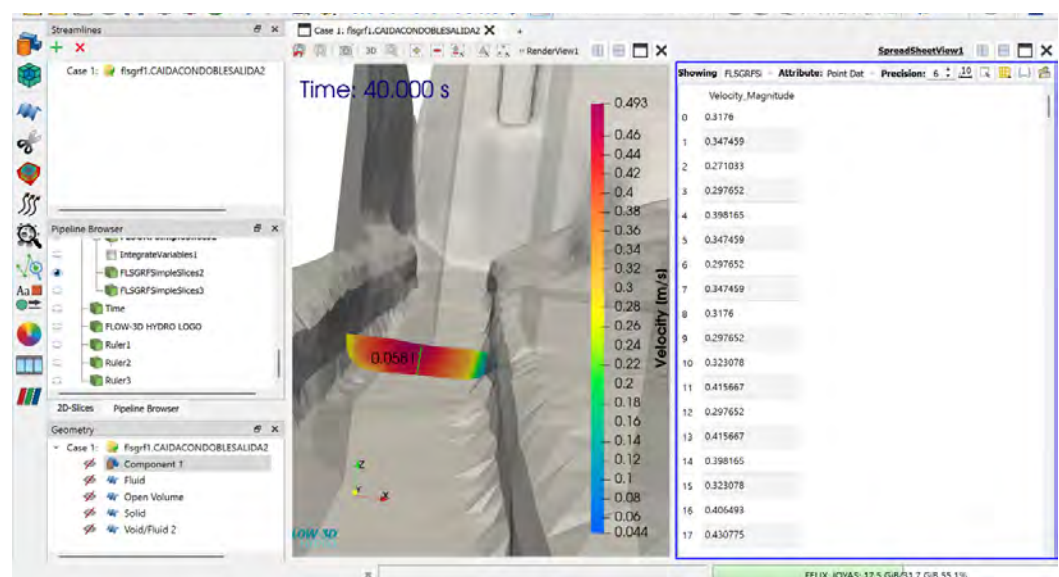
Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador de caída con doble salida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Figura 136

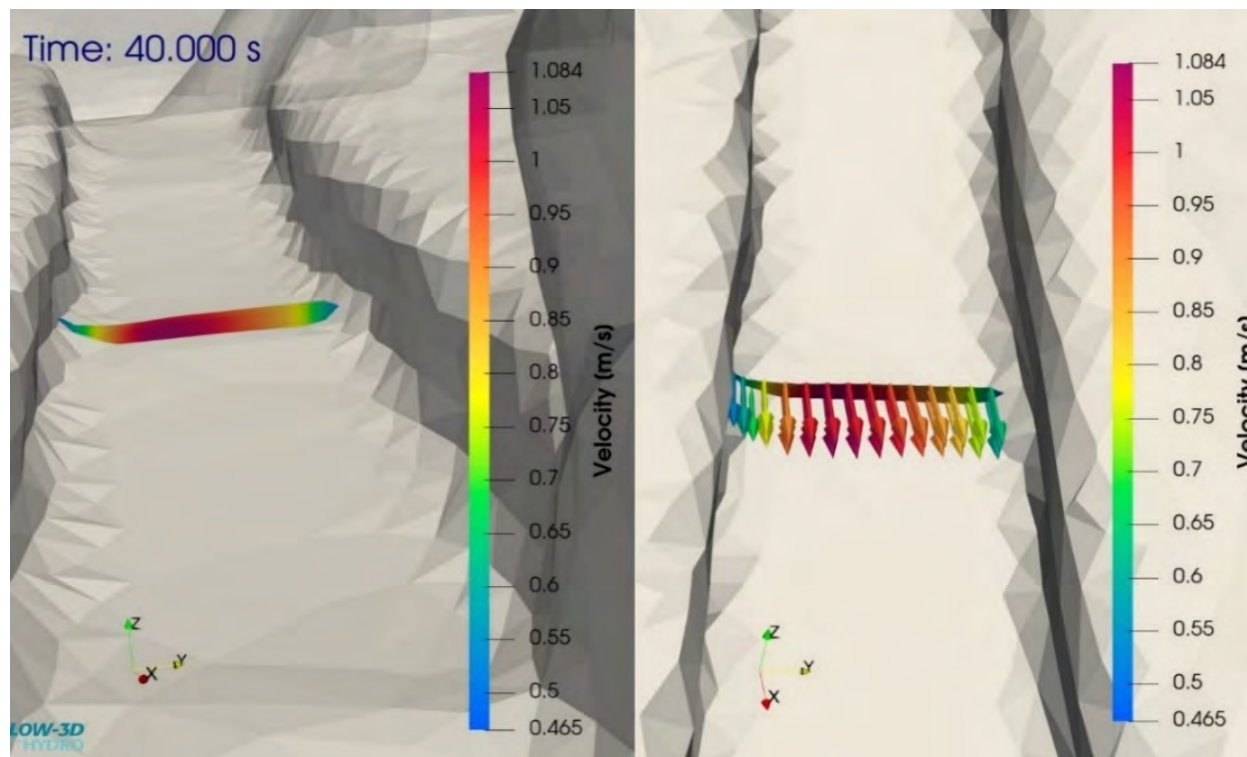
Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador de caída con doble salida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Figura 137

Corte transversal del P3 de comprobación del dissipador de caída con doble salida

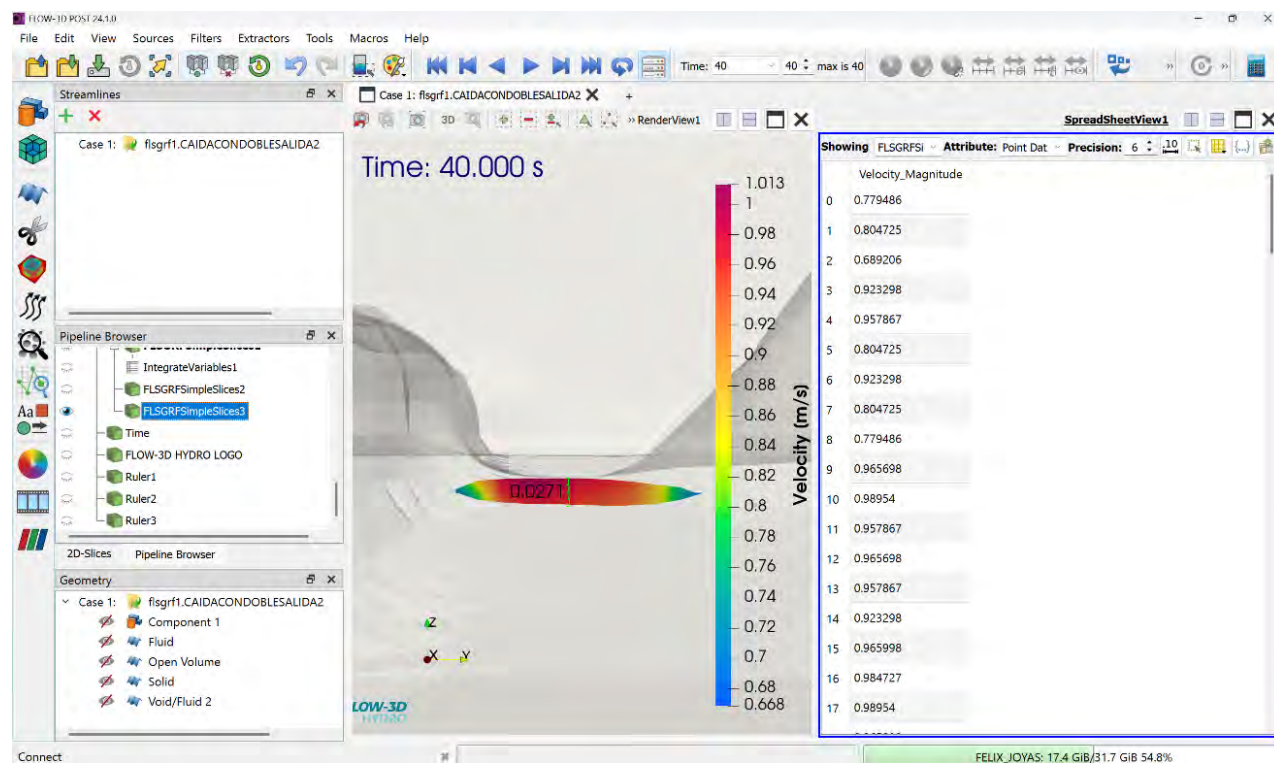


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 138** que la velocidad en la sección en el punto de salida 2 es mayor que en el punto de entrada, observando sin embargo que la altura del tirante es considerablemente menor con un valor aproximado de 3 cm, la velocidad en la sección en este caso son un total de 124 puntos de velocidad en la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.90 m/s

Figura 138

Extracción de velocidades del P3 del corte transversal del dissipador de caída con doble salida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.1.3.3.6. Simulación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante un levantamiento topográfico utilizando tecnología LiDAR, complementado con un vuelo de dron a baja altura, con el objetivo de obtener registros visuales en video de la caída de agua de entrada recta y salida lateral. A partir de la información recolectada, se generó el modelo tridimensional en formato STL, el cual fue empleado posteriormente para el análisis numérico en el software FLOW-3D.

Figura 139

Toma aérea con dron del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

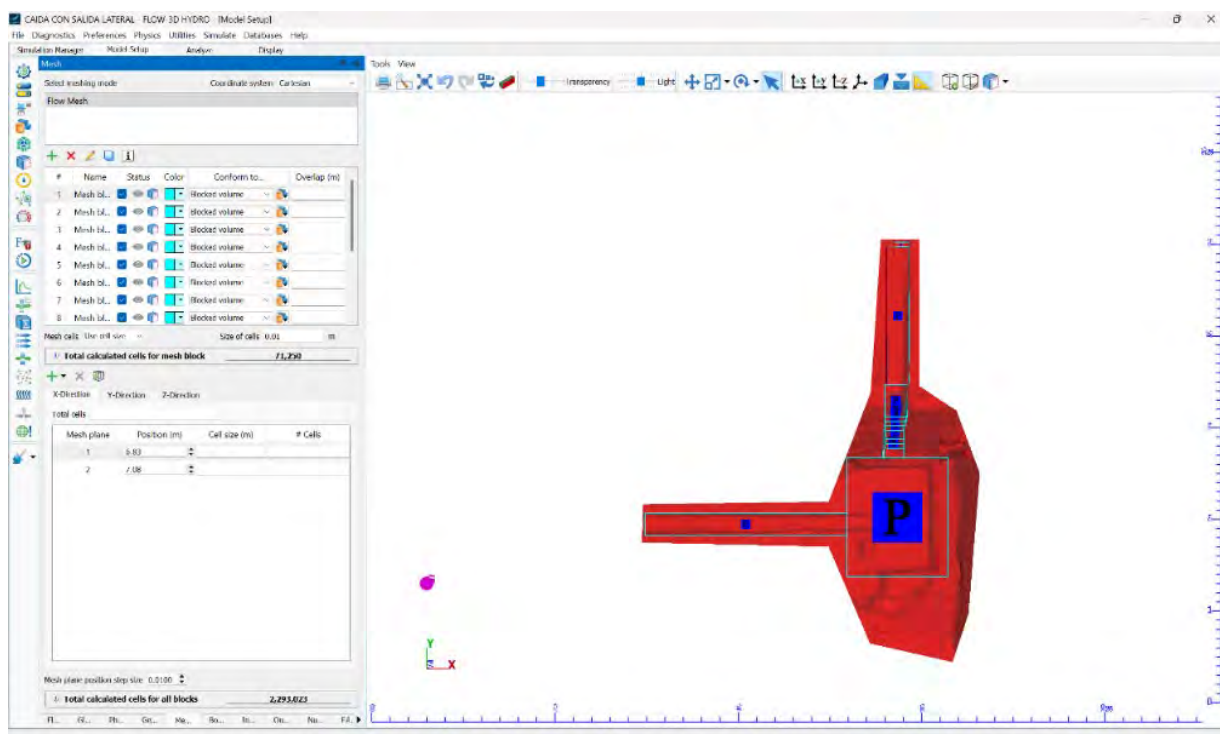


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se procedió a la creación de los MESH BLOCKS correspondientes, los cuales permitieron definir el dominio computacional necesario para el modelamiento hidrodinámico. En cada bloque de malla se establecieron las condiciones iniciales del fluido, así como las condiciones de frontera específicas según su ubicación y función dentro del modelo. El dominio total estuvo conformado por 2,293,023 celdas, con un tamaño uniforme de malla de 0.01 metros por celda, lo que permitió un nivel de detalle adecuado para el análisis en FLOW-3D.

Figura 140

Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

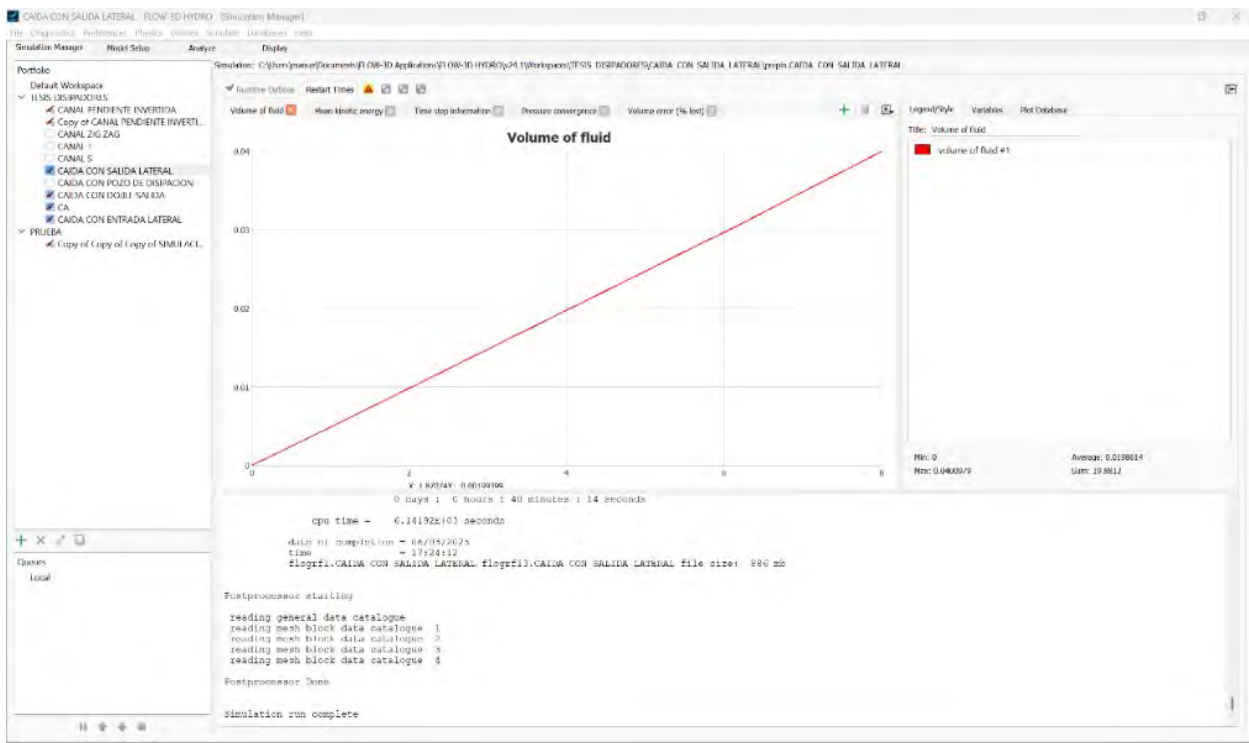


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Posteriormente, se llevó a cabo la simulación numérica con una duración total de 40 segundos. Para el registro de resultados visuales, se configuraron los parámetros **SELECT** y **RESTART** con un intervalo de salida de datos visual cada segundo, permitiendo así una resolución temporal suficiente para el análisis detallado del comportamiento del flujo durante el proceso simulado.

Figura 141

Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral



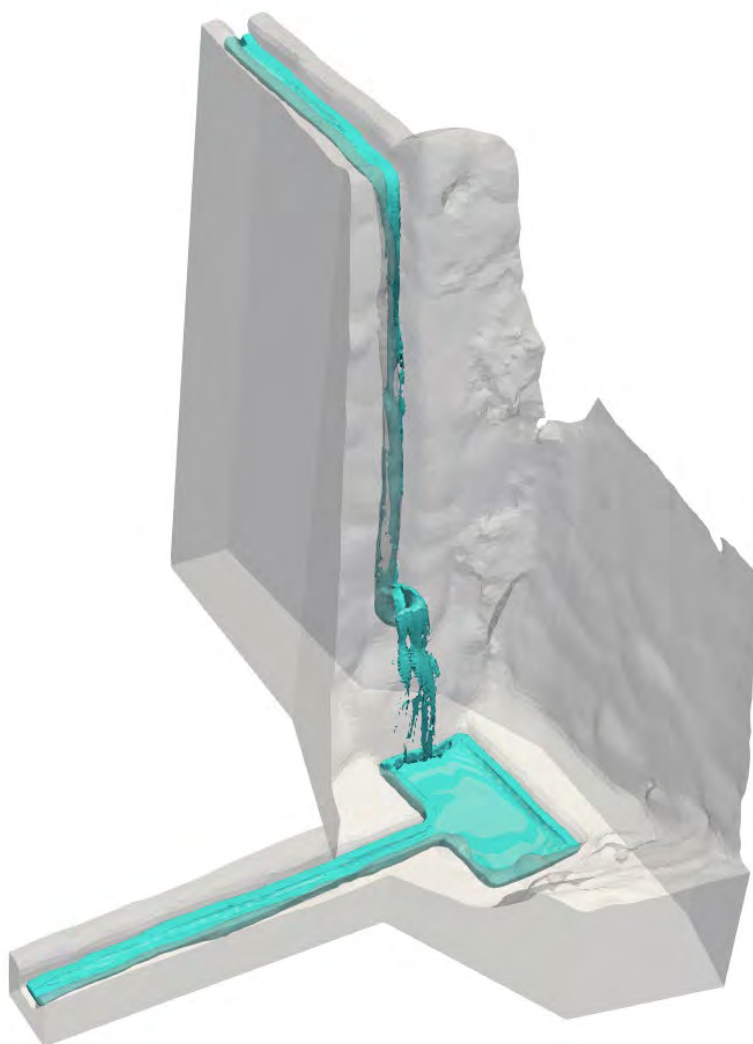
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 142** se muestra una vista general del modelo con la simulación concluida, utilizando una representación en color sólido del fluido. Esta visualización permite identificar únicamente el volumen ocupado por el flujo dentro del dominio, sin asociar ningún parámetro físico específico. El objetivo de esta captura es proporcionar una percepción clara de la distribución

espacial del fluido y su interacción con la geometría del disipador, al margen de los datos cuantitativos.

Figura 142

Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del disipador de caída con entrada recta y salida lateral



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 143** se presenta un perfil lateral del modelo completo, donde se visualiza el comportamiento del fluido durante toda la simulación, representado mediante un mapa de velocidades. Esta captura permite observar la distribución espacial de la magnitud de la velocidad en todo el dominio, identificando claramente las zonas de mayor y menor intensidad del flujo. También se observa cómo es la geometría exacta vista desde otro punto no accesible en el complejo y conocer más de su comportamiento.

Figura 143

Perfil lateral del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

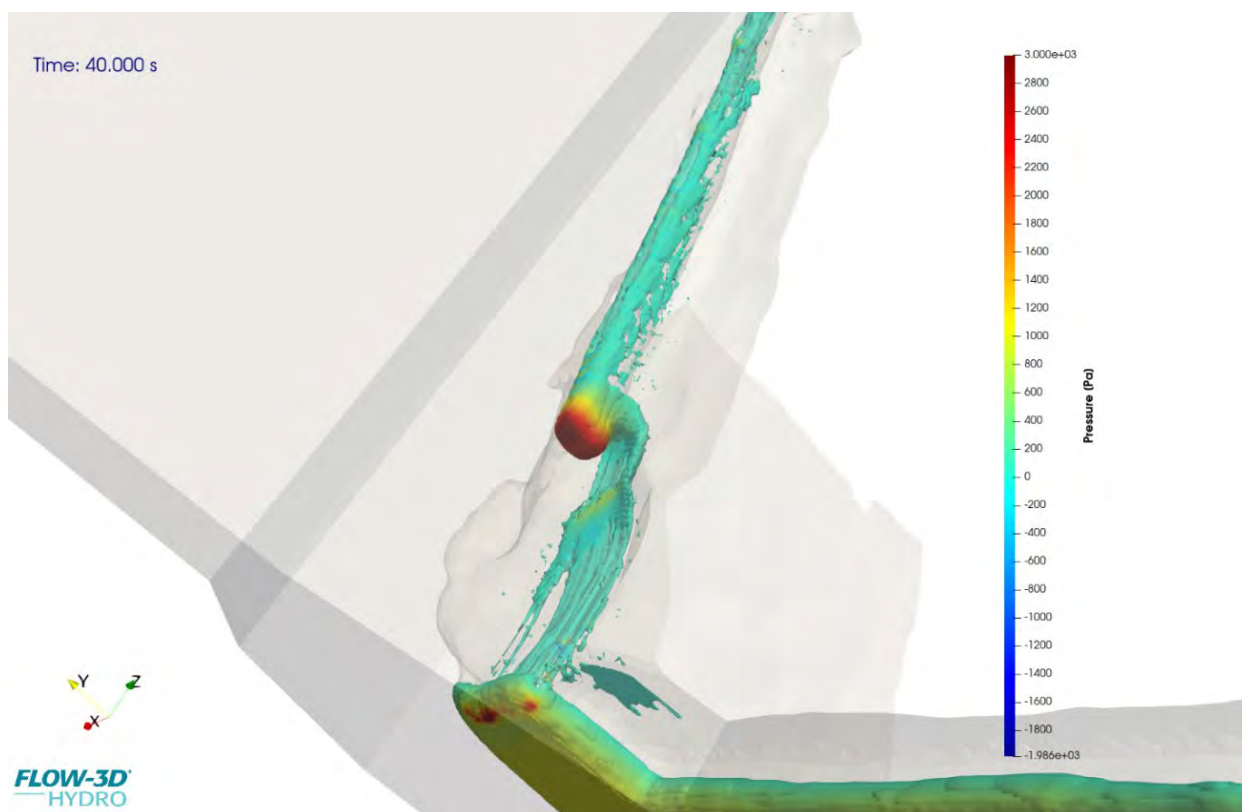


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

La **Figura 144** presenta la distribución de presión en la zona de impacto del flujo contra la estructura rocosa y el pozo receptor. Se aprecia un incremento notable de presión en el punto de impacto directo, lo cual resulta relevante para el análisis estructural y la verificación del comportamiento hidráulico en dicha sección.

Figura 144

Distribución de presión del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral



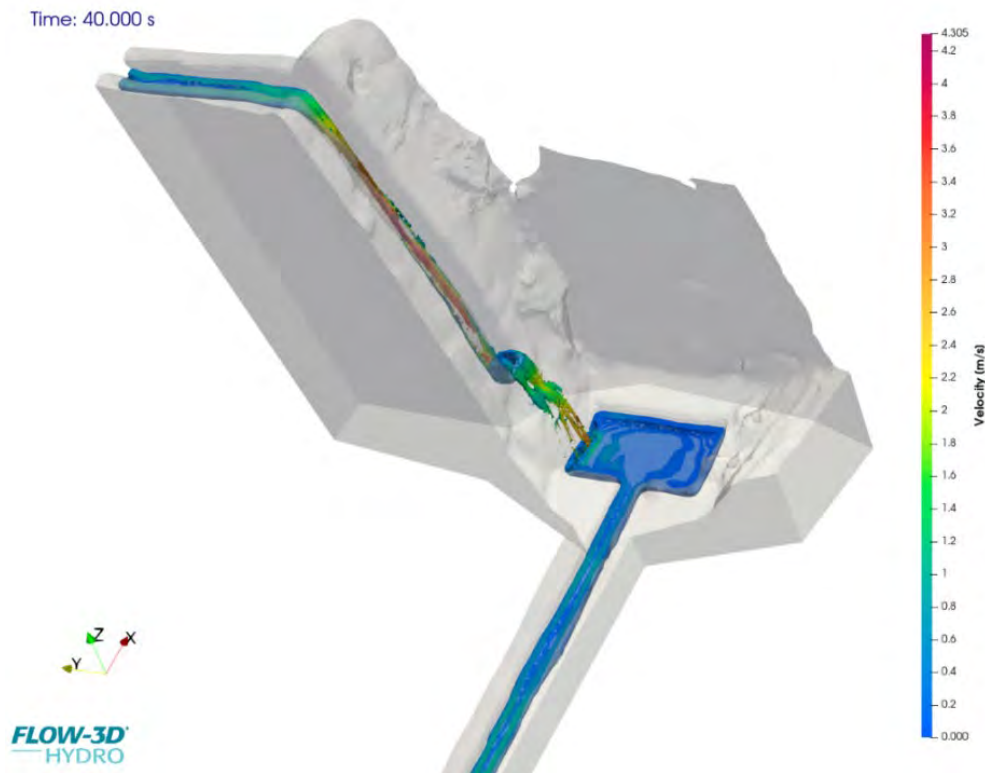
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 145** se presenta una vista isométrica del modelo completo, donde se visualiza el comportamiento del fluido durante toda la simulación mediante un mapa de velocidades. Esta captura permite observar la distribución espacial de la magnitud de la velocidad en todo el dominio, identificando claramente las zonas de mayor y menor intensidad del flujo. La representación es

útil para interpretar el desarrollo global del movimiento del fluido y su interacción con los elementos geométricos del dissipador a lo largo del tiempo simulado.

Figura 145

Distribución del campo de velocidades en el dissipador de caída con entrada recta y salida

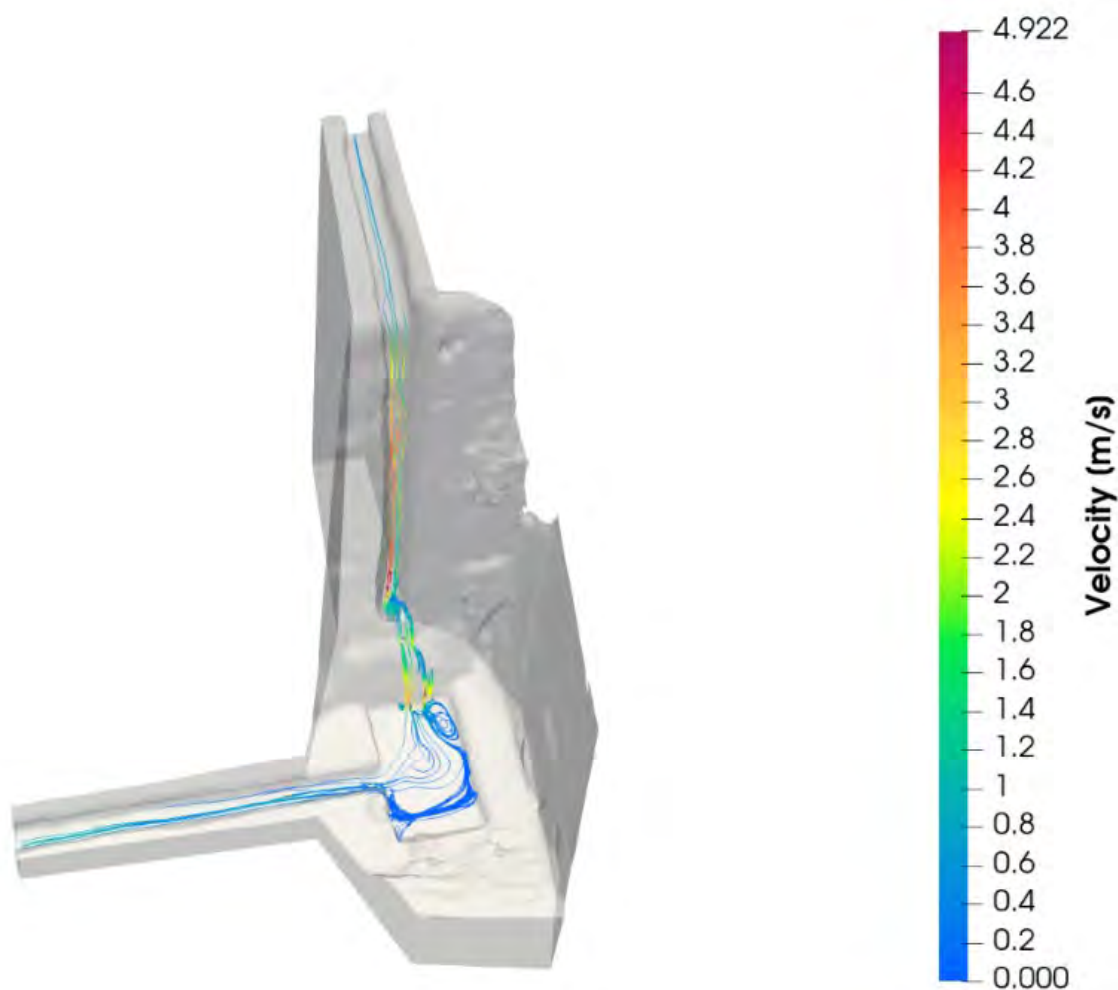


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 146** se ilustran las líneas de flujo obtenidas durante la simulación. Estas permiten analizar la trayectoria del fluido dentro del dissipador y detectar patrones de recirculación o turbulencia. La coherencia y continuidad del flujo se mantiene en la mayoría el dominio, aunque se evidencian perturbaciones localizadas asociadas a cambios geométricos.

Figura 146

Líneas de flujo del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

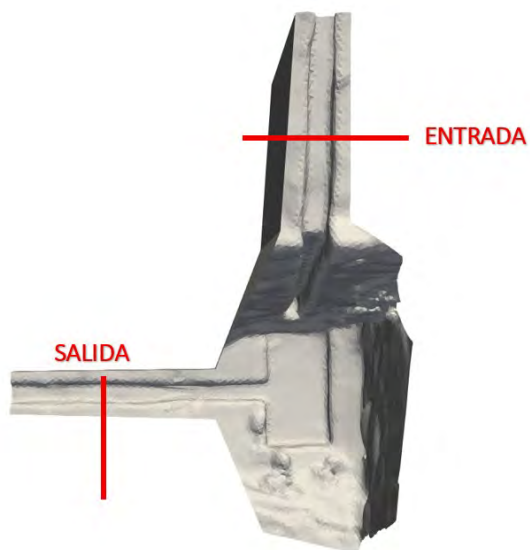


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 147** se muestran dos cortes seccionales transversales al canal y la ubicación de los cortes, cada corte ubicado uno aguas arriba y otros aguas abajo de la caída. Estas capturas permiten analizar el comportamiento del campo de velocidades en ambas regiones, evidenciándose una mayor magnitud de velocidad antes del descenso, seguida de una notoria disipación de energía en la sección posterior.

Figura 147

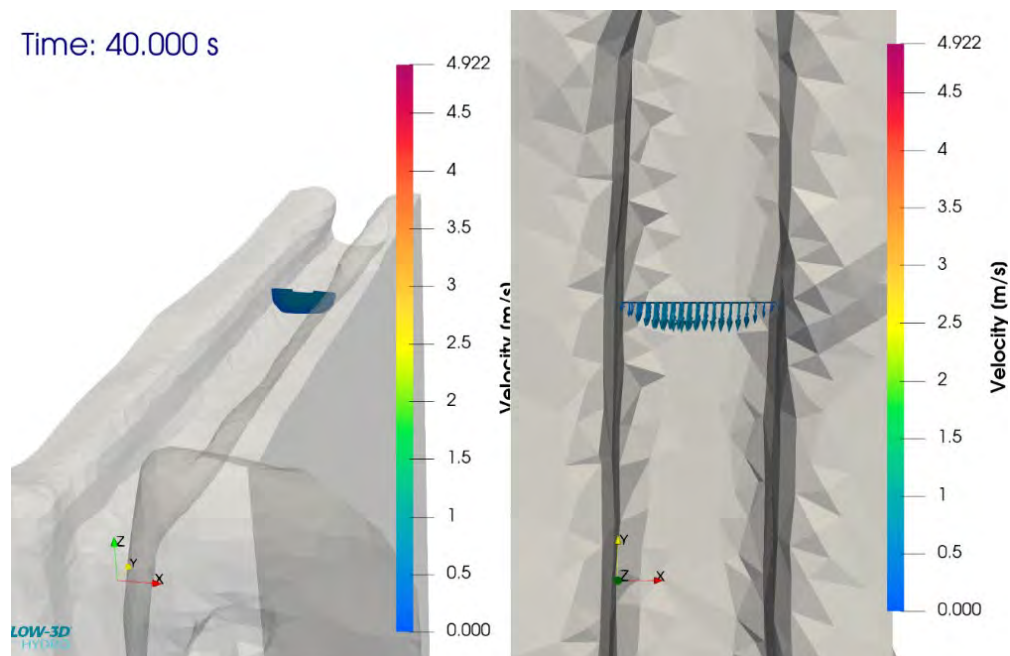
Puntos de comprobación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Figura 148

Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

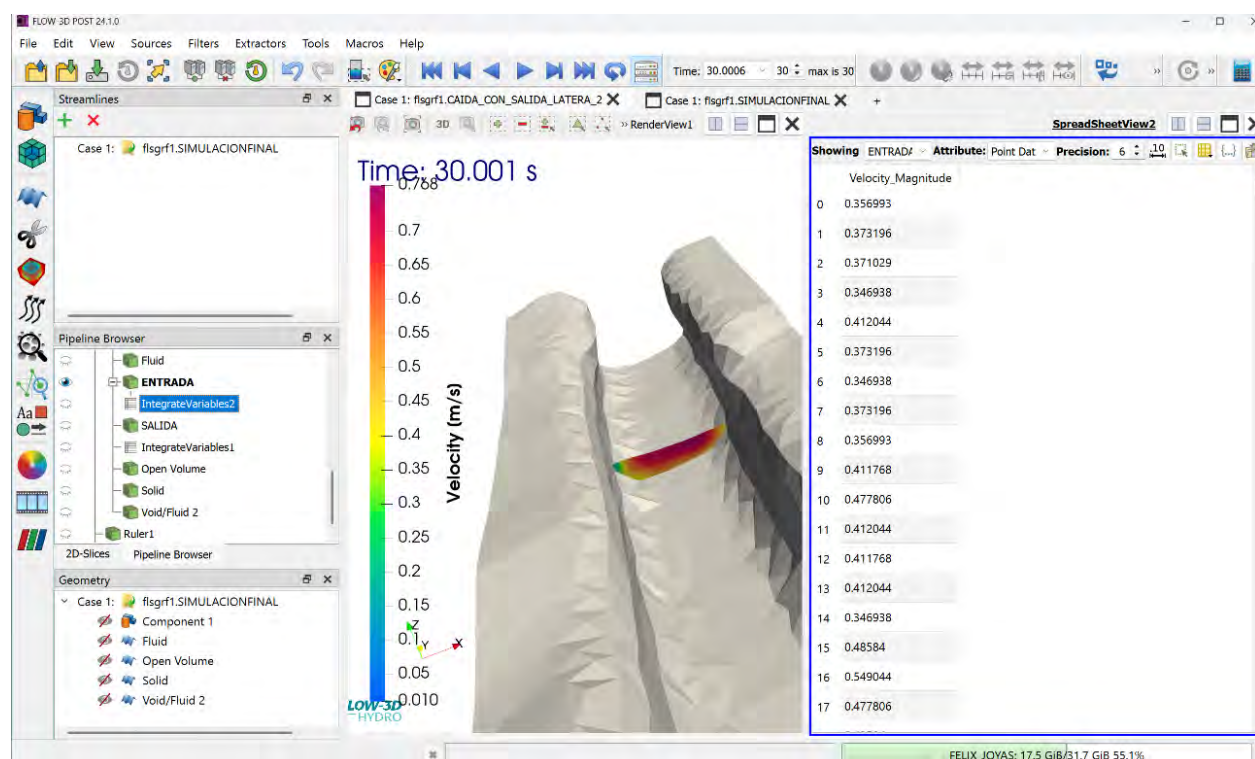


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 149** que la velocidad en el punto de entrada, donde nosotros obtuvimos los datos de campo, las velocidades en la sección en este caso son un total de 385 en cada punto de la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.58 m/s.

Figura 149

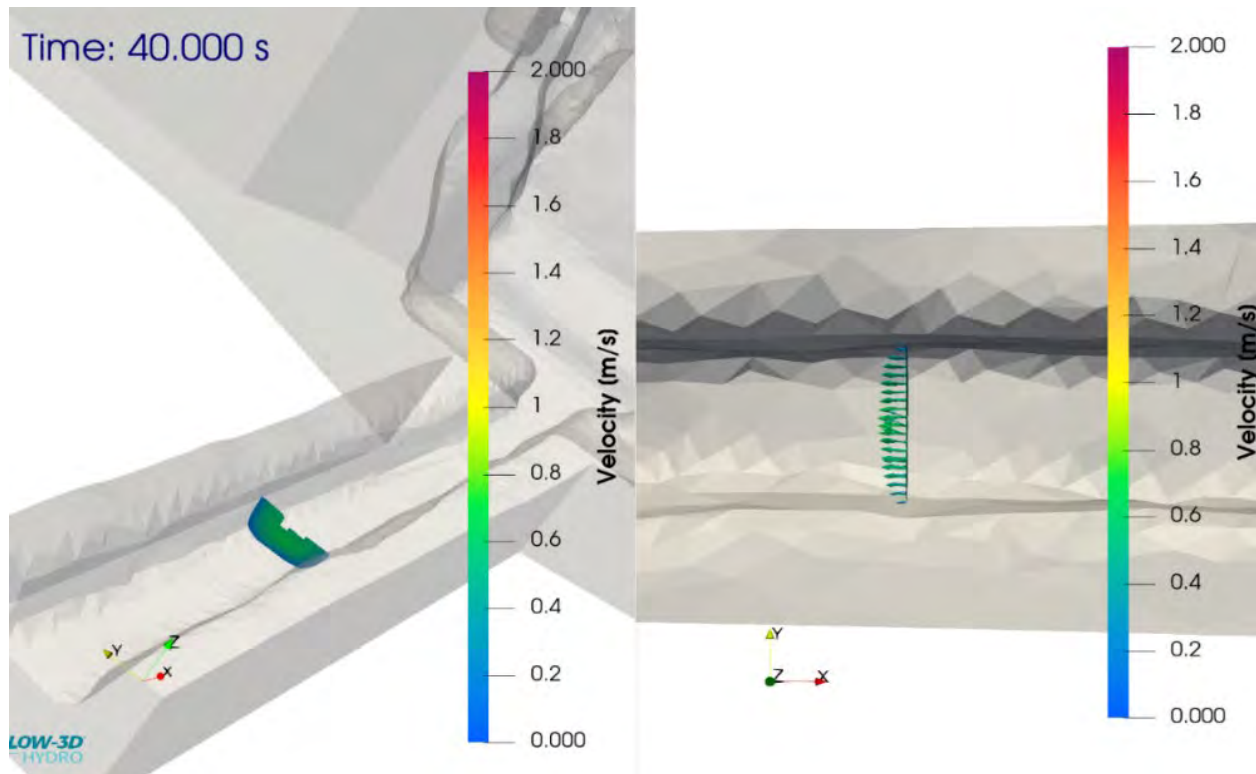
Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Figura 150

Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

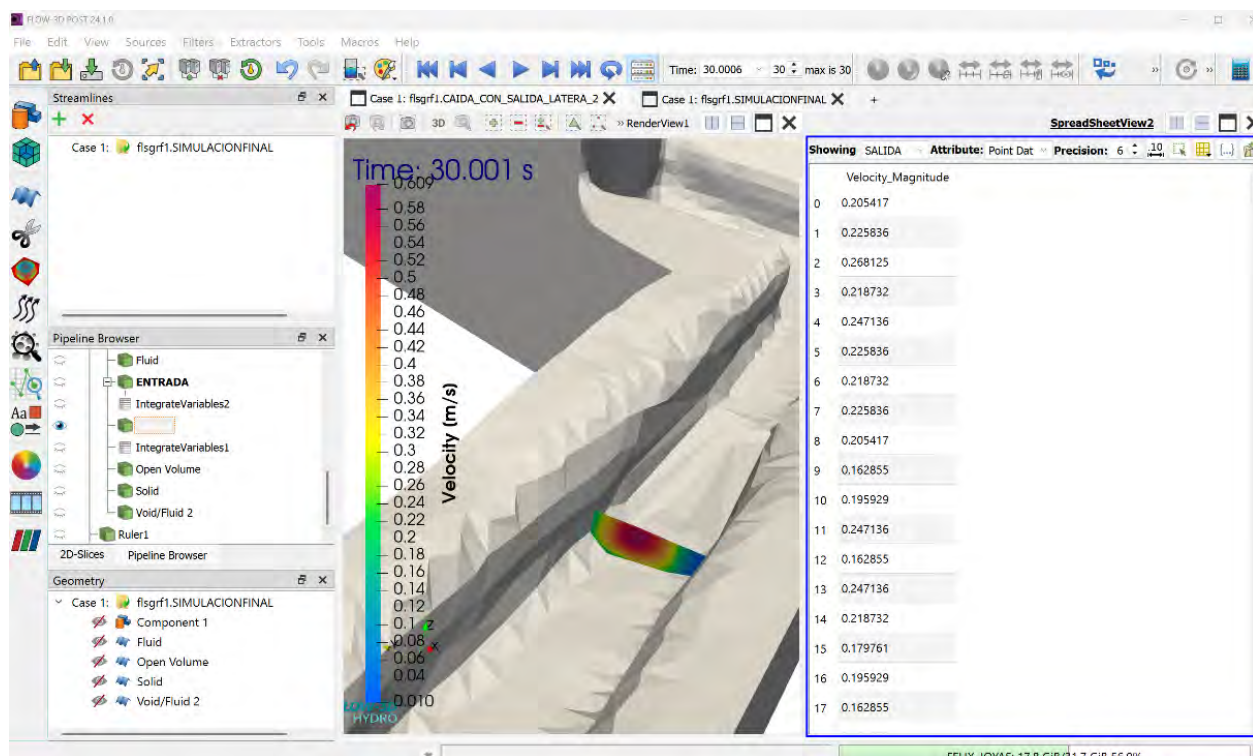


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 151** que la velocidad en el punto de salida es menor que en el punto de entrada, observando la disipación gracias a la estructura rocosa antes del pozo, aquí nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 622 puntos de velocidad en la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.32 m/s.

Figura 151

Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral



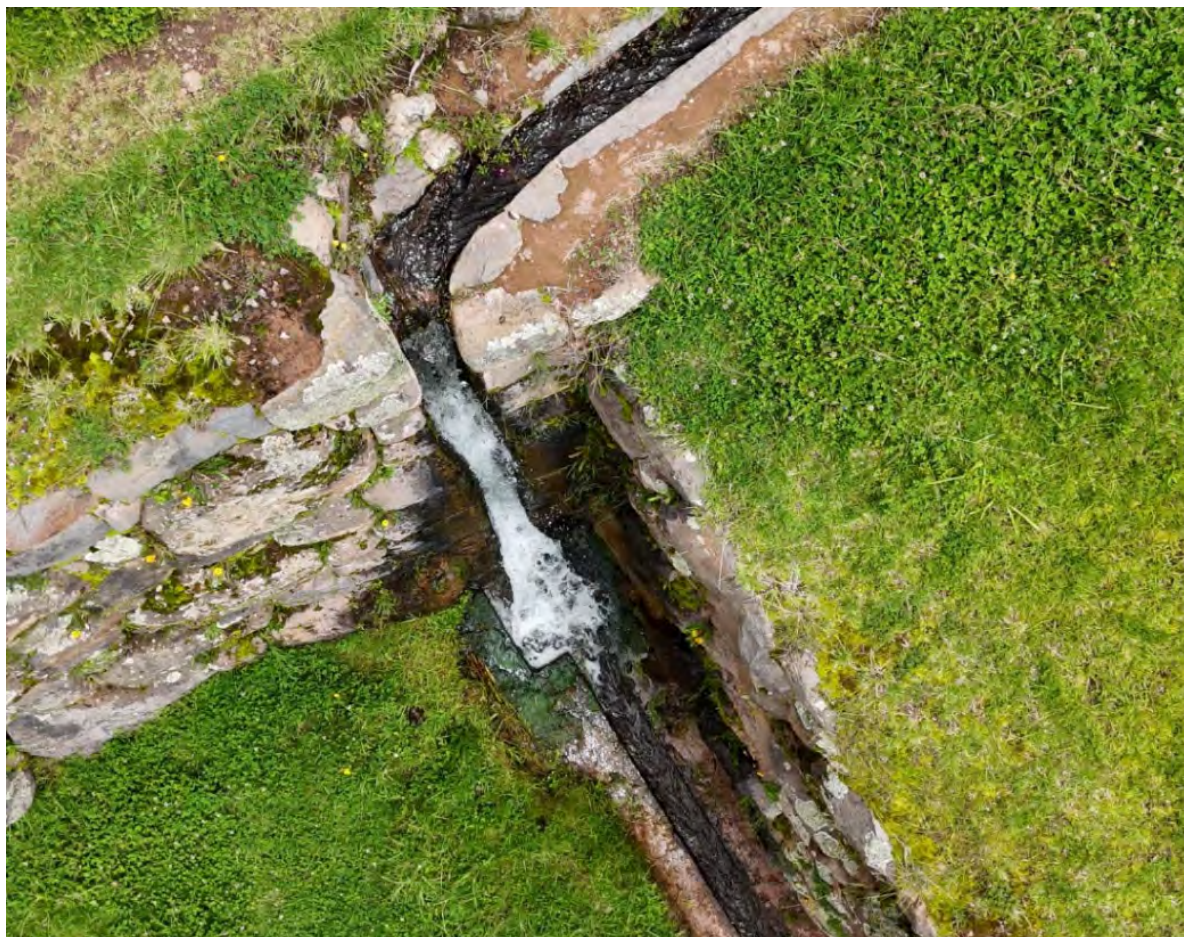
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.1.3.3.1. Simulación del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante un levantamiento topográfico utilizando tecnología LiDAR, complementado con un vuelo de dron a baja altura, con el objetivo de obtener registros visuales en video de la caída de agua con entrada lateral y salida lateral. A partir de la información recolectada, se generó el modelo tridimensional en formato STL, el cual fue empleado posteriormente para el análisis numérico en el software FLOW-3D.

Figura 152

Toma aérea con dron del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta

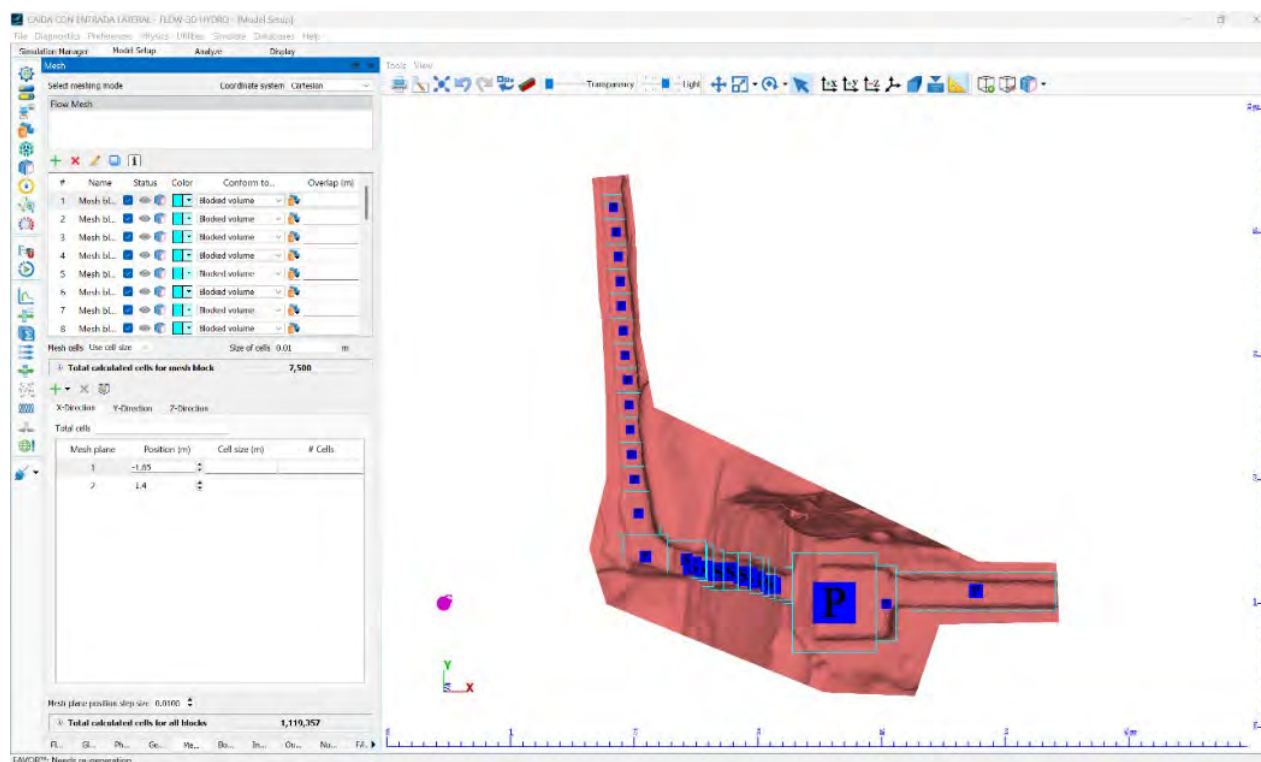


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se procedió a la creación de los MESH BLOCKS correspondientes, los cuales permitieron definir el dominio computacional necesario para el modelamiento hidrodinámico. En cada bloque de malla se establecieron las condiciones iniciales del fluido, así como las condiciones de frontera específicas según su ubicación y función dentro del modelo. El dominio total estuvo conformado por 1,119,357 celdas, con un tamaño uniforme de malla de 0.01 metros por celda, lo que permitió un nivel de detalle adecuado para el análisis en FLOW-3D.

Figura 153

Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta

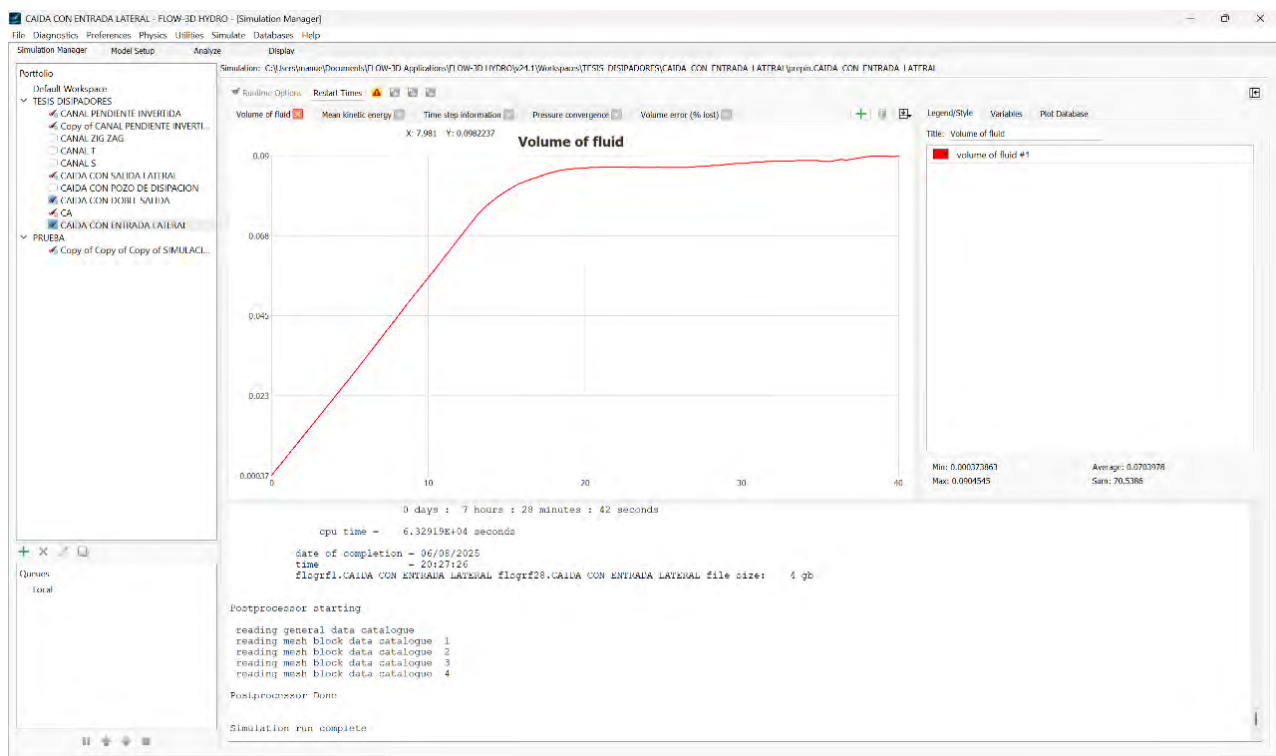


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Posteriormente, se llevó a cabo la simulación numérica con una duración total de 40 segundos. Para el registro de resultados visuales, se configuraron los parámetros SELECT y RESTART con un intervalo de salida de datos visual cada segundo, permitiendo así una resolución temporal suficiente para el análisis detallado del comportamiento del flujo durante el proceso simulado.

Figura 154

Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del disipador de caída con entrada lateral y salida recta



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 155** se muestra una vista general del modelo con la simulación concluida, utilizando una representación en color sólido del fluido. Esta visualización permite identificar únicamente el volumen ocupado por el flujo dentro del dominio, sin asociar ningún parámetro

físico específico. El objetivo de esta captura es proporcionar una percepción clara de la distribución espacial del fluido y su interacción con la geometría del disipador, al margen de los datos cuantitativos.

Figura 155

Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del disipador de caída con entrada lateral y salida recta



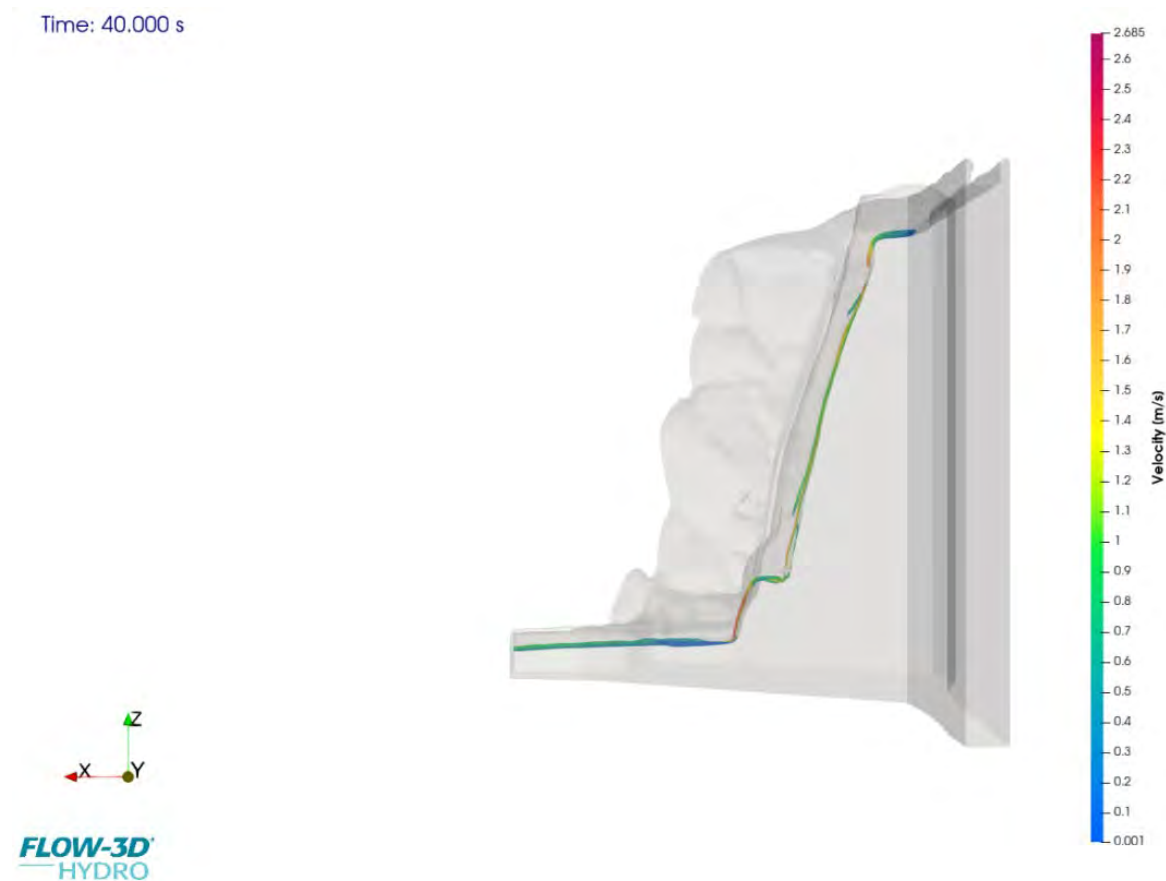
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 156** se presenta un corte longitudinal del modelo completo, donde se visualiza el comportamiento del fluido durante toda la simulación, representado mediante un mapa de velocidades. Esta captura permite observar la distribución espacial de la magnitud de la velocidad

en todo el dominio, identificando claramente las zonas de mayor y menor intensidad del flujo. La representación es útil para interpretar el desarrollo global del movimiento del fluido y su interacción con los elementos geométricos del dissipador a lo largo del tiempo simulado.

Figura 156

Perfil longitudinal del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta



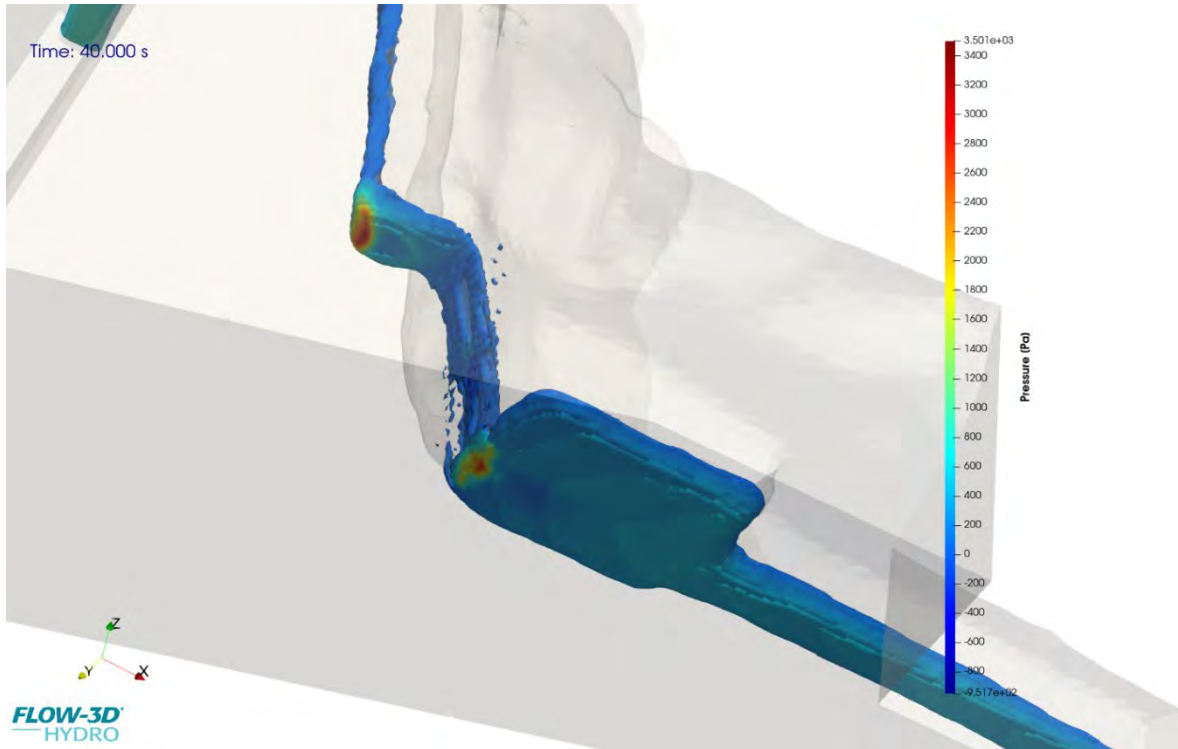
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

La **Figura 157** presenta la distribución de presión en la zona de impacto del flujo contra la estructura rocosa y el pozo receptor. Se aprecia un incremento notable de presión en el punto de

impacto directo, lo cual resulta relevante para el análisis estructural y la verificación del comportamiento hidráulico en dicha sección.

Figura 157

Distribución de presión del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta

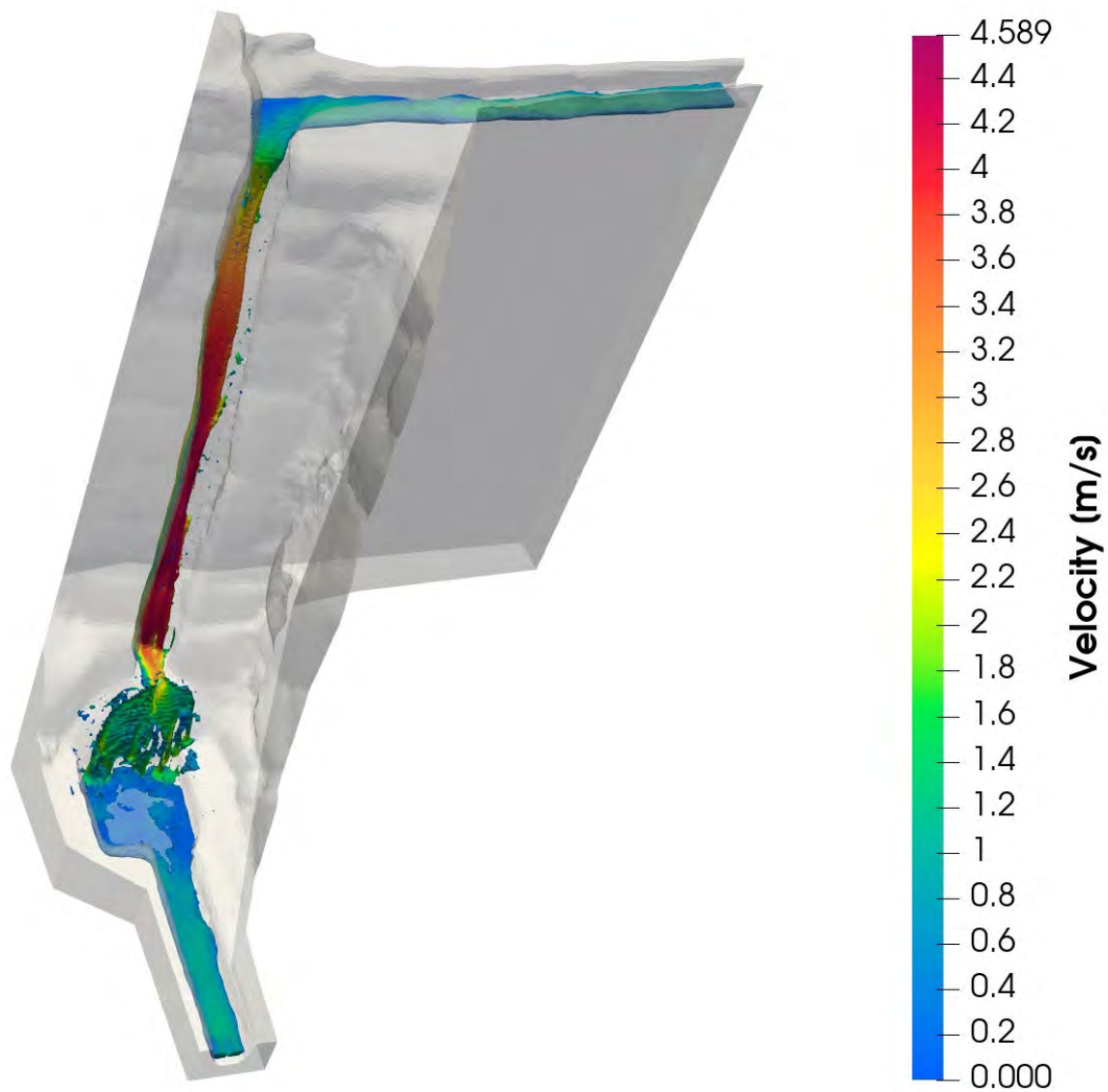


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 158** el resultado de la simulación con una gráfica de colores de acuerdo con la velocidad máxima y velocidad mínima en el canal, donde se observa que en la parte inicial del dissipador la velocidad es mucho menor que con la parte final, gracias a la caída y al cambio de dirección al inicio.

Figura 158

Distribución del campo de velocidades en el dissipador de caída con entrada lateral y salida recta

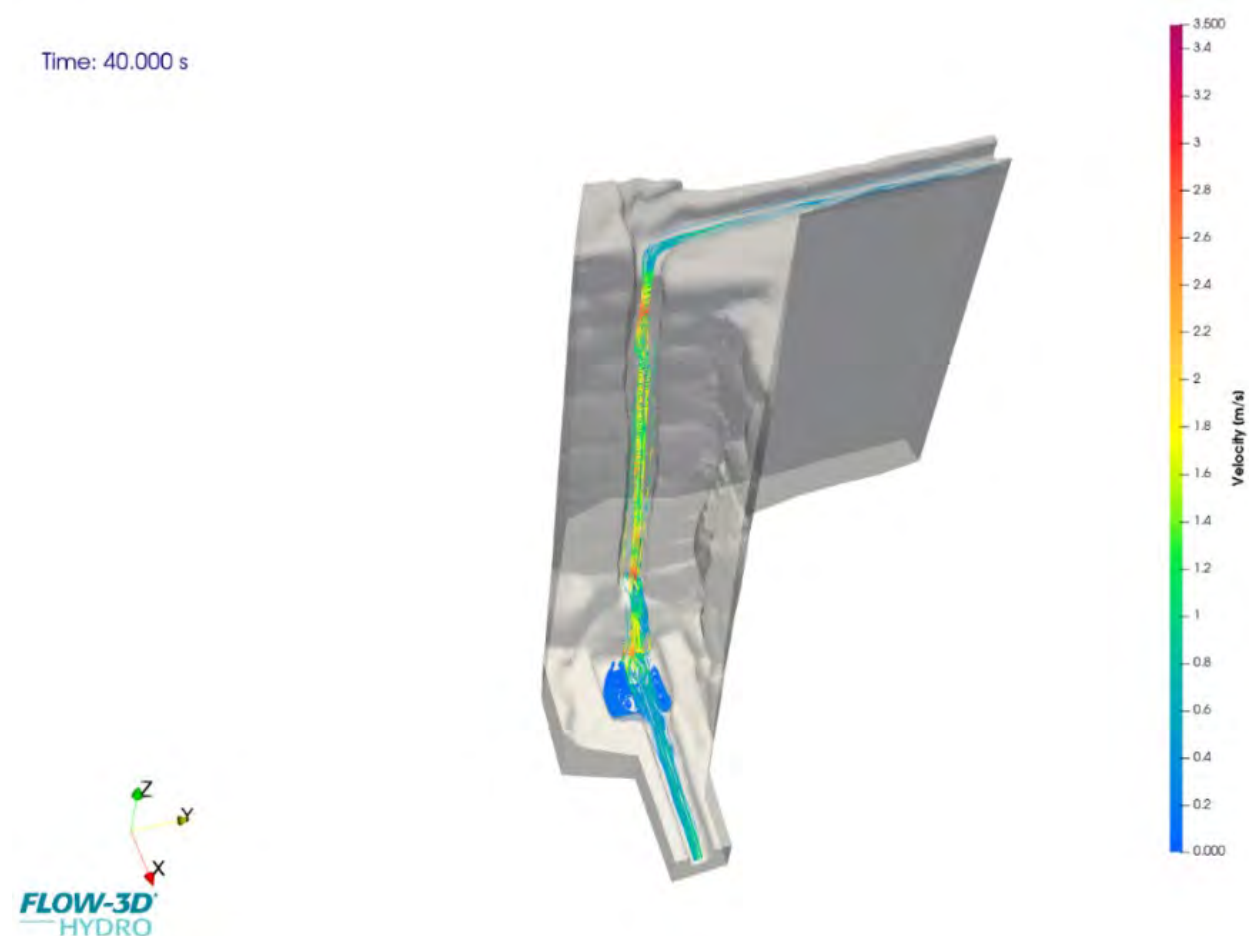


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 159** se ilustran las líneas de flujo obtenidas durante la simulación. Estas permiten analizar la trayectoria del fluido dentro del dissipador y detectar patrones de recirculación o turbulencia. La coherencia y continuidad del flujo se mantiene en la mayoría del dominio, aunque se evidencian perturbaciones localizadas asociadas a cambios geométricos.

Figura 159

Líneas de flujo del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta

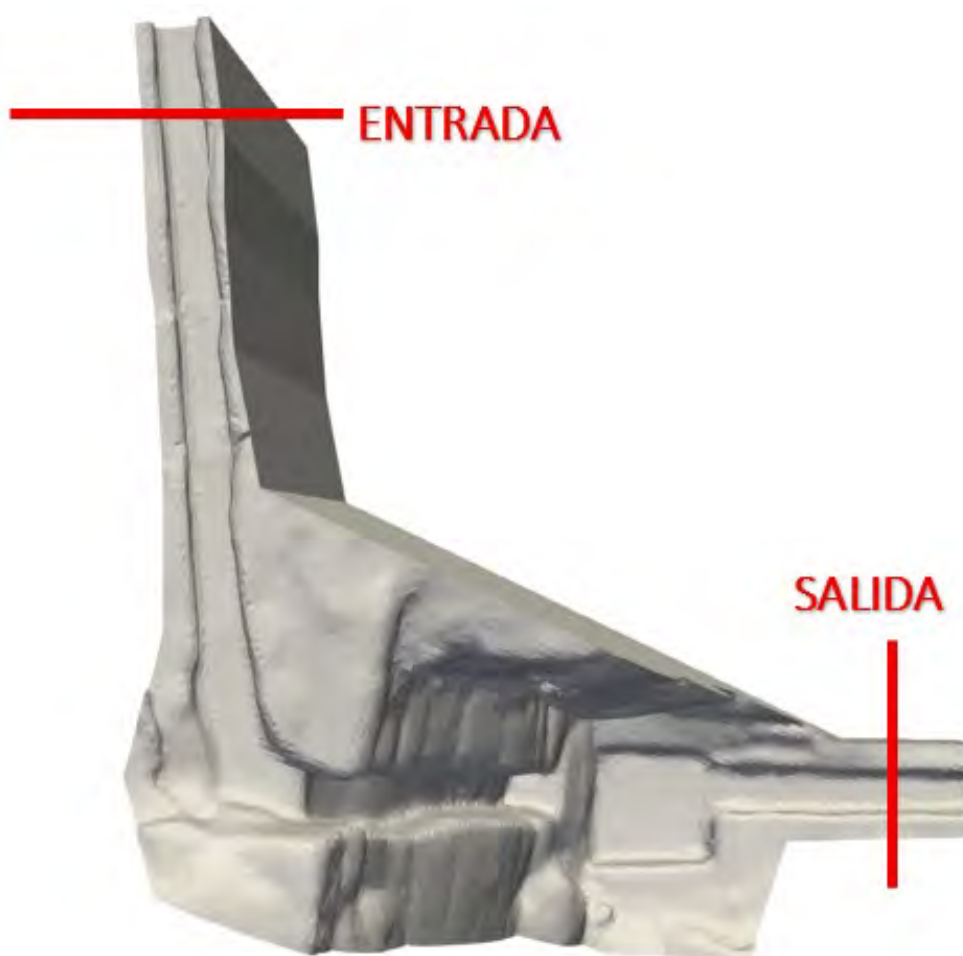


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 160** se muestran dos cortes seccionales transversales al canal y la ubicación de los cortes, cada corte ubicado uno aguas arriba y otro, aguas abajo de la caída. Estas capturas permiten analizar el comportamiento del campo de velocidades en ambas regiones, evidenciándose una mayor magnitud de velocidad antes del descenso, seguida de una notoria disipación de energía en la sección posterior.

Figura 160

Puntos de comprobación del dissipador de caída con entrada lateral y salida recta

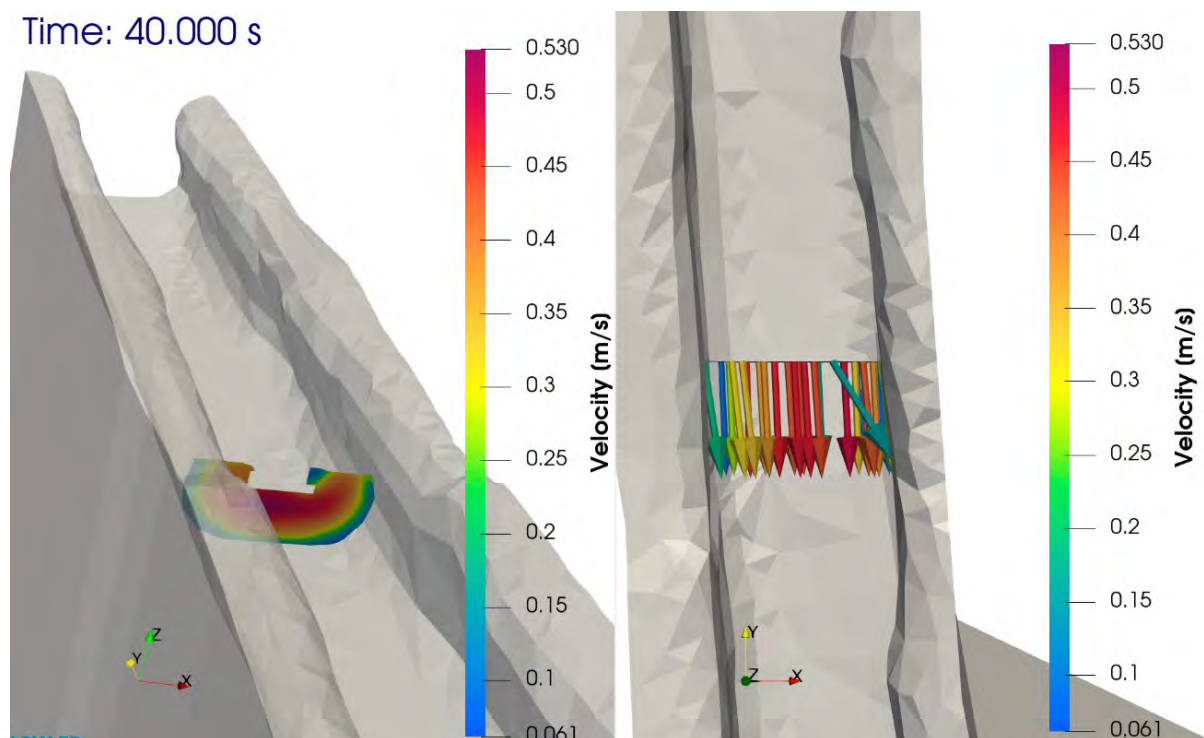


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 161** el corte transversal del P1, en el cual se representan los vectores de velocidad del flujo a lo largo del canal. En esta sección puede apreciarse la distribución del campo de velocidades, donde los vectores indican tanto la magnitud como la dirección del flujo en distintos puntos. Se evidencia una mayor concentración de velocidades en el centro del canal, lo que corresponde a la zona de mayor profundidad y menor fricción, mientras que hacia los bordes laterales y el fondo los vectores disminuyen en intensidad, reflejando la influencia del rozamiento con las paredes del canal. Esta visualización permite identificar patrones de comportamiento del flujo y es clave para el análisis de la eficiencia hidráulica y el transporte de energía a lo largo del tramo evaluado.

Figura 161

Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador de caída con entrada lateral y salida

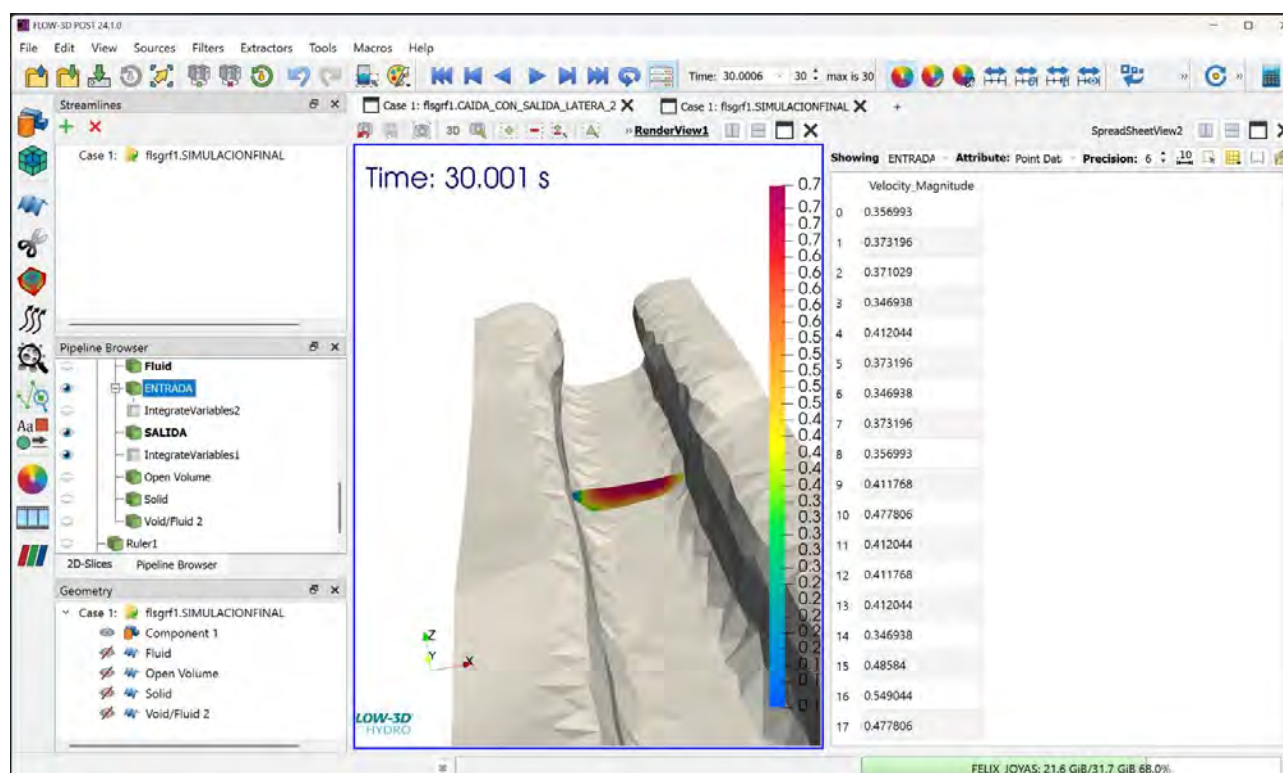


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 162** el procedimiento realizado en FLOW-3D Post para la extracción de datos de velocidad en la sección transversal del punto P1. Mediante esta herramienta, se seleccionó un plano de corte perpendicular al flujo, sobre el cual se visualizaron y exportaron los valores de velocidad registrados en cada celda de simulación. Esta información permitió calcular la velocidad promedio del flujo en dicha sección el cual fue de 0.80 m/s, considerando la distribución espacial de los vectores de velocidad. El análisis se realizó de forma detallada para asegurar que el valor obtenido represente fielmente el comportamiento hidráulico del canal en ese tramo.

Figura 162

Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador de caída con entrada lateral y salida

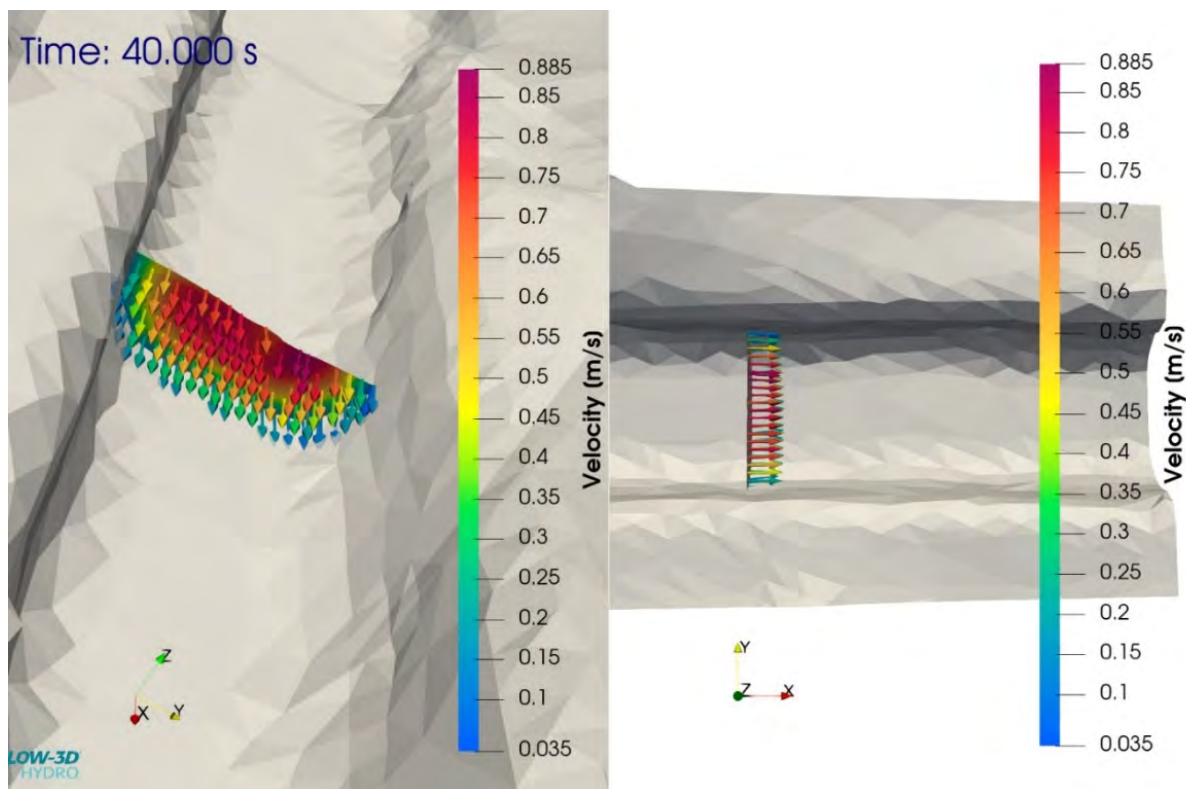


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se aprecia en la **Figura 163** el corte transversal correspondiente al punto P2, ubicado aguas abajo de la estructura de disipación. En esta sección se observa una disminución significativa en la magnitud de los vectores de velocidad en comparación con el punto anterior, lo cual evidencia el efecto del proceso de disipación de energía. Los vectores son más cortos y uniformes, indicando un flujo más estable y con menor energía cinética.

Figura 163

Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador de caída con entrada lateral y salida

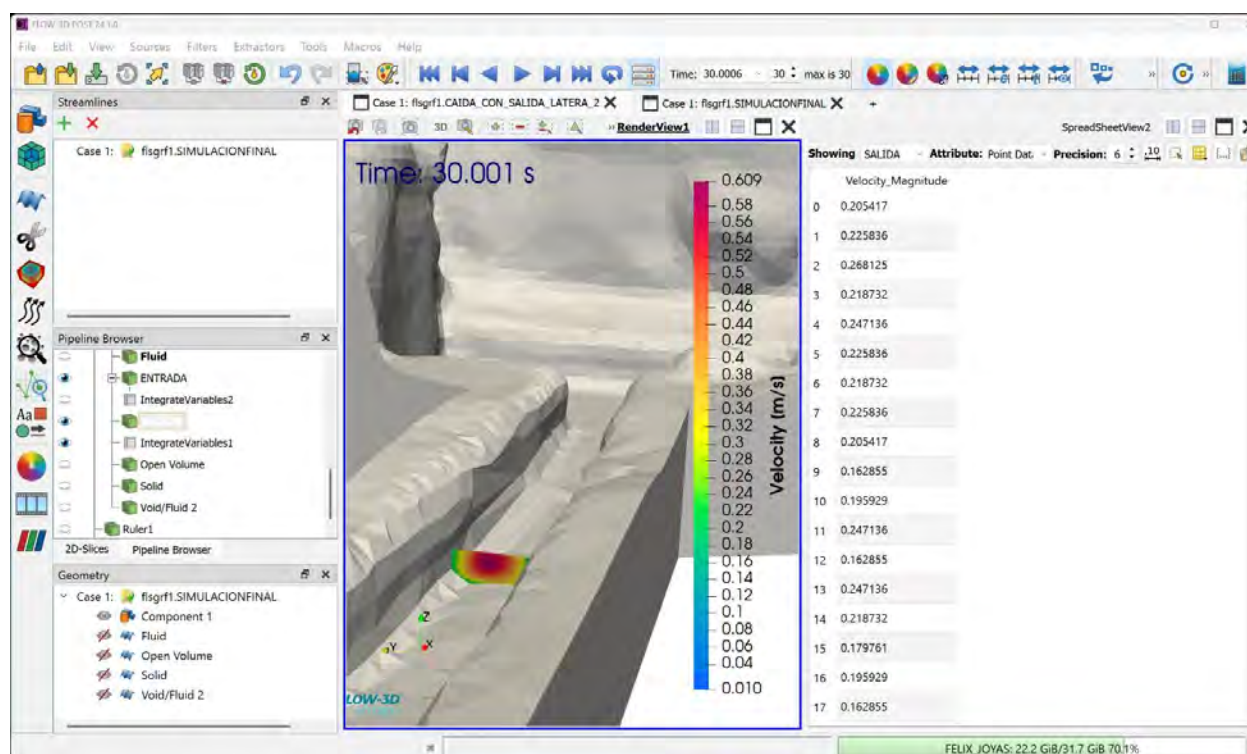


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 164** la extracción de datos correspondiente al punto P2, realizada en FLOW-3D Post. En esta etapa se definió un nuevo plano de corte transversal aguas abajo de la zona de disipación, con el fin de analizar el comportamiento del flujo luego de haber perdido parte de su energía cinética. A través de las herramientas del software, se exportaron los valores de velocidad registrados en cada celda de simulación, lo que permitió calcular la velocidad promedio en esta sección el cual fue 0.61m/s. Los datos obtenidos reflejan una notable reducción en la intensidad del flujo en comparación con P1, validando el efecto del proceso disipador.

Figura 164

Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador de caída con entrada lateral y salida



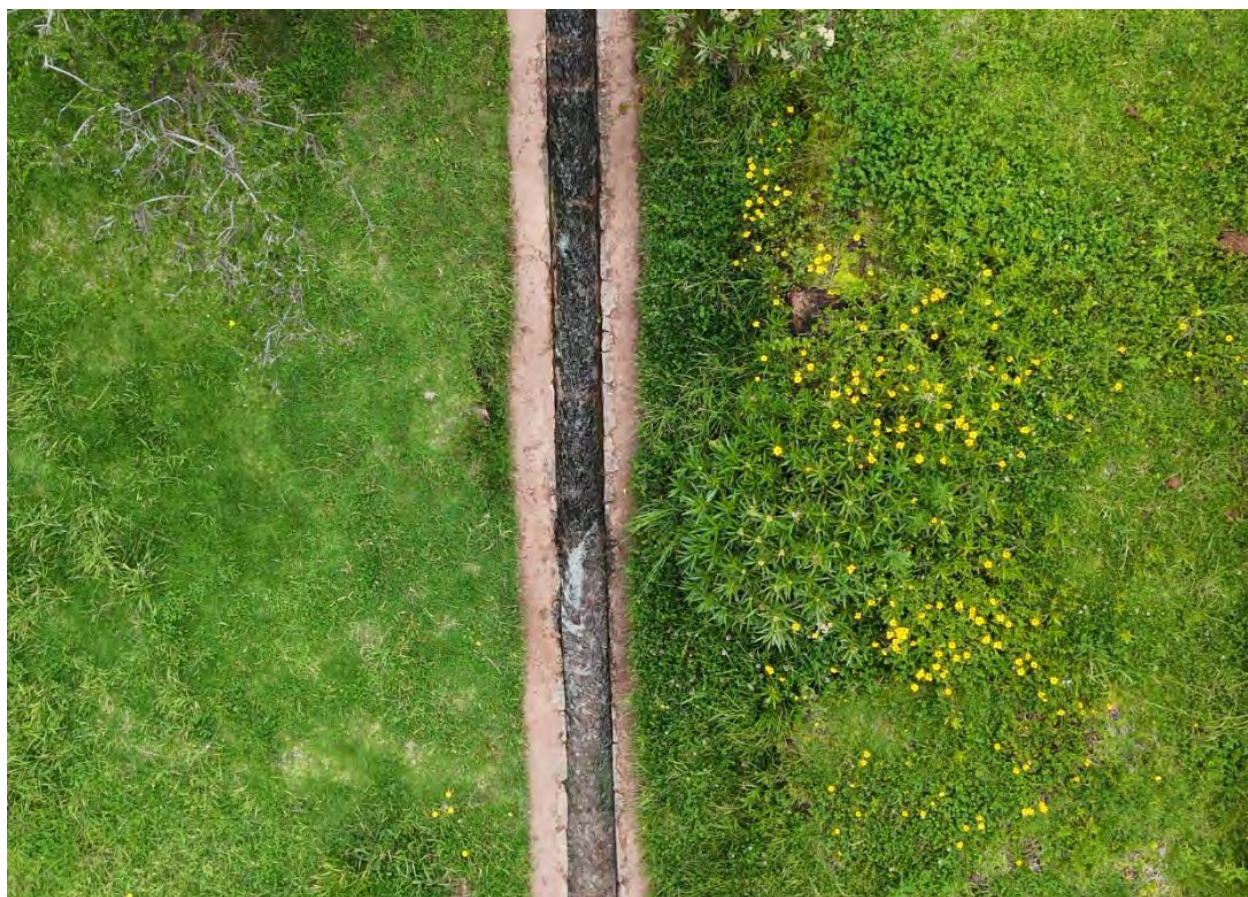
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.1.3.3.2. Simulación del dissipador con pendiente invertida

La recopilación de datos se llevó a cabo mediante un levantamiento topográfico utilizando tecnología LiDAR, complementado con un vuelo de dron a baja altura, con el objetivo de obtener registros visuales en video del canal con pendiente invertida. A partir de la información recolectada, se generó el modelo tridimensional en formato STL, el cual fue empleado posteriormente para el análisis numérico en el software FLOW-3D.

Figura 165

Toma aérea con dron del dissipador con pendiente invertida

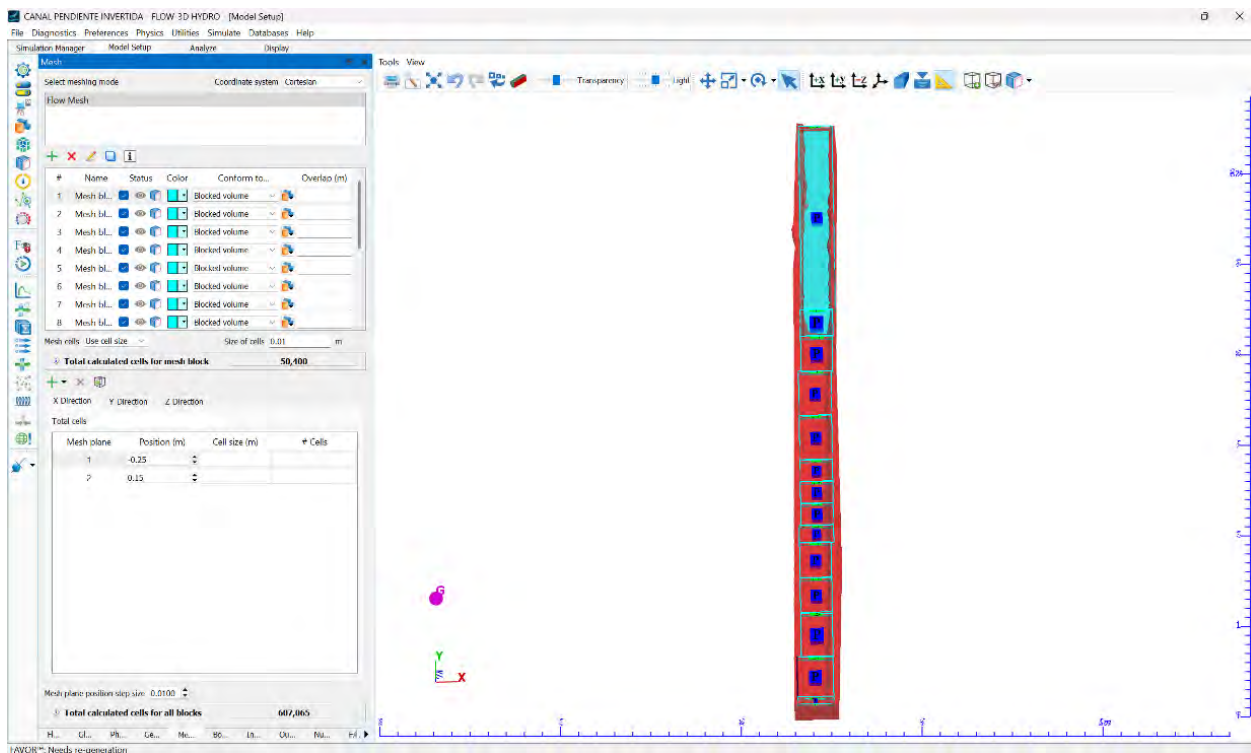


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se procedió a la creación de los MESH BLOCKS correspondientes, los cuales permitieron definir el dominio computacional necesario para el modelamiento hidrodinámico. En cada bloque de malla se establecieron las condiciones iniciales del fluido, así como las condiciones de frontera específicas según su ubicación y función dentro del modelo. El dominio total estuvo conformado por 807,065 celdas, con un tamaño uniforme de malla de 0.01 metros por celda, lo que permitió un nivel de detalle adecuado para el análisis en FLOW-3D.

Figura 166

Configuración del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador con pendiente invertida

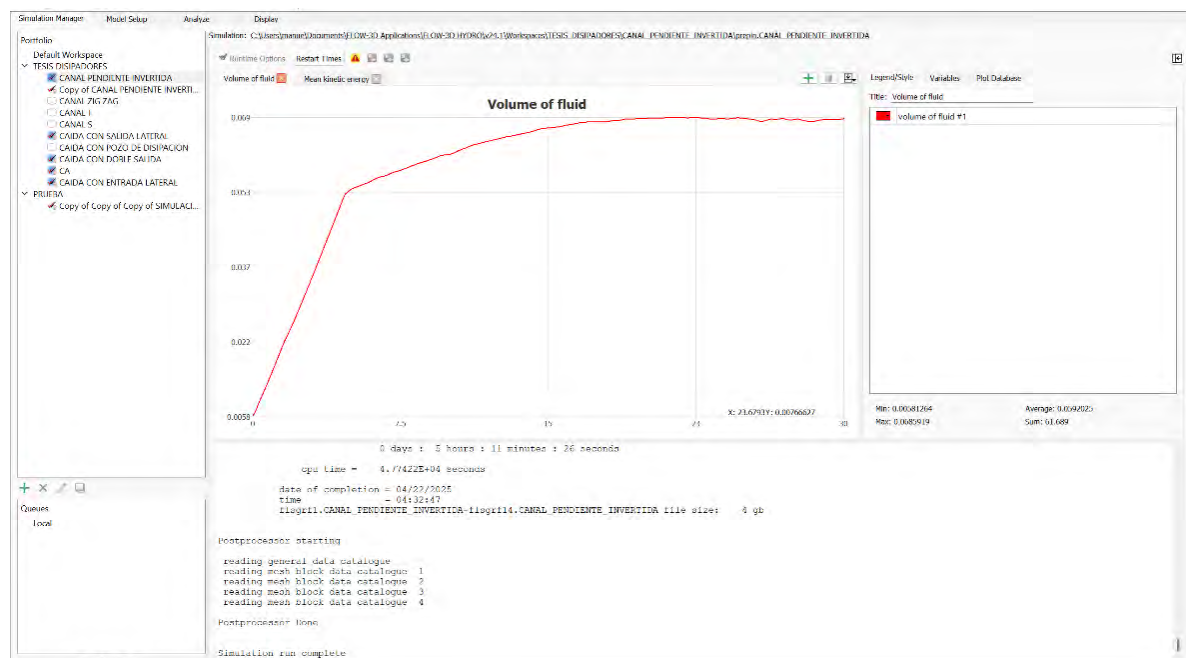


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Posteriormente, se llevó a cabo la simulación numérica con una duración total de 40 segundos. Para el registro de resultados visuales, se configuraron los parámetros **SELECT** y **RESTART** con un intervalo de salida de datos visual cada segundo, permitiendo así una resolución temporal suficiente para el análisis detallado del comportamiento del flujo durante el proceso simulado.

Figura 167

Ejecución del modelo numérico en FLOW-3D del dissipador con pendiente invertida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 168** se muestra una vista general del modelo con la simulación concluida, utilizando una representación en color sólido del fluido. Esta visualización permite identificar únicamente el volumen ocupado por el flujo dentro del dominio, sin asociar ningún parámetro físico específico. El objetivo de esta captura es proporcionar una percepción clara de la distribución espacial del fluido y su interacción con la geometría del dissipador, al margen de los datos cuantitativos.

Figura 168

Posprocesamiento de resultados en FLOW-3D POST del dissipador con pendiente invertida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 169** se presenta una vista paralela del modelo completo, donde se visualiza el comportamiento del fluido durante toda la simulación, representado mediante un mapa de velocidades. Esta captura permite observar la distribución espacial de la magnitud de la velocidad en todo el dominio, identificando claramente las zonas de mayor y menor intensidad del flujo. La

representación es útil para interpretar el desarrollo global del movimiento del fluido y su interacción con los elementos geométricos del dissipador a lo largo del tiempo simulado.

Figura 169

Perfil lateral del dissipador con pendiente invertida



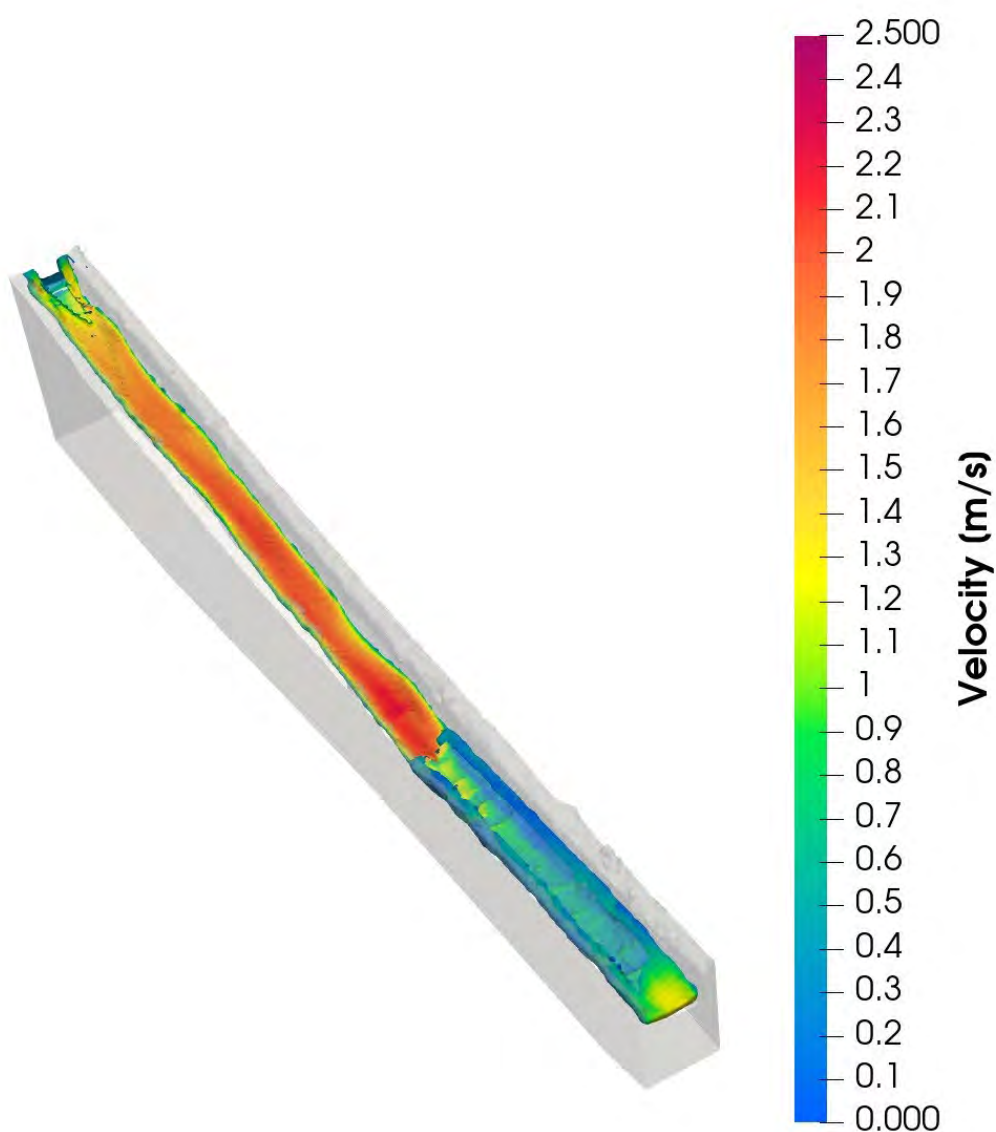
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 170** se observa los resultados obtenidos de la simulación de velocidades en el dissipador del canal de pendiente invertida, visualizándose mediante una gráfica con escalas de colores que representan los distintos rangos de velocidad del flujo. En esta representación se aprecia claramente cómo las velocidades más altas se concentran en la zona de entrada del

disipador, disminuyendo progresivamente hacia la parte final. Esta reducción de velocidad indica que el disipador cumple su función hidráulica, ya que se evidencia una disipación efectiva de energía cinética al final del tramo, lo cual es coherente con el comportamiento esperado de este tipo de estructuras.

Figura 170

Distribución del campo de velocidades en el disipador con pendiente invertida

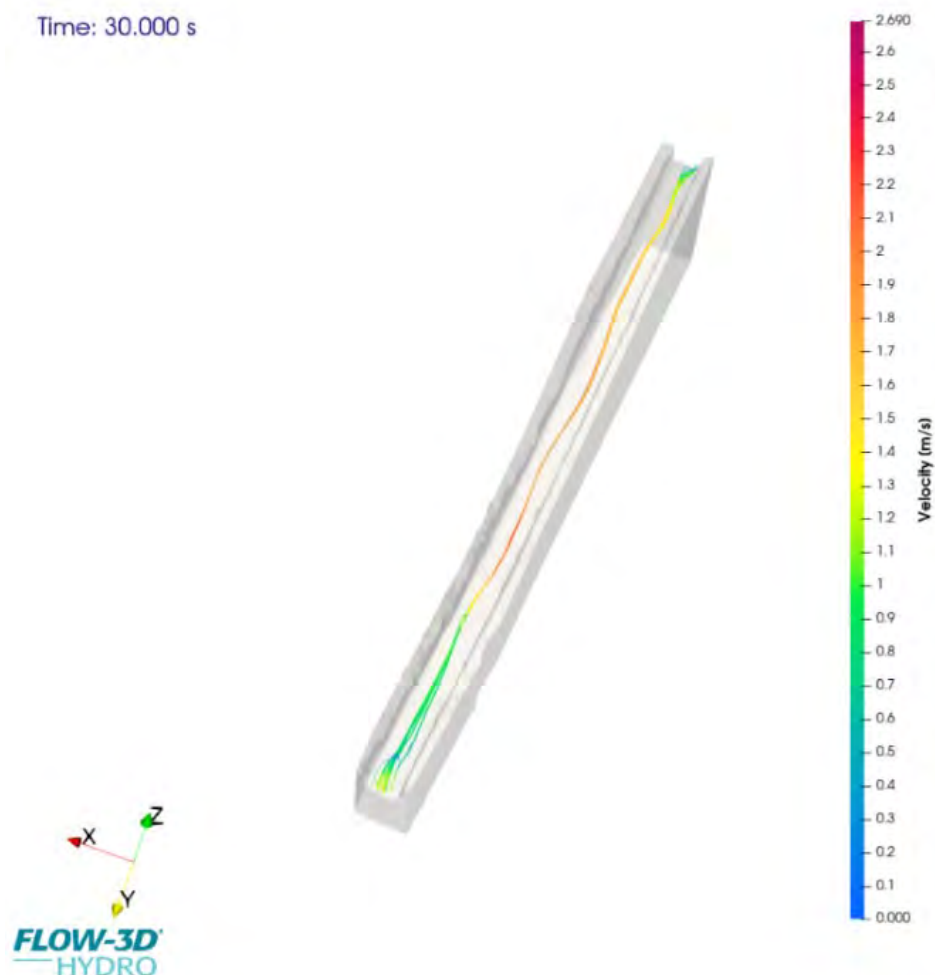


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 171** se ilustran las líneas de flujo obtenidas durante la simulación. Estas permiten analizar la trayectoria del fluido dentro del dissipador y detectar patrones de recirculación o turbulencia. La coherencia y continuidad del flujo se mantiene en la mayoría del dominio, aunque se evidencian perturbaciones localizadas asociadas a cambios geométricos.

Figura 171

Líneas de flujo del dissipador con pendiente invertida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

En la **Figura 172** se muestran dos cortes seccionales transversales al canal y la ubicación de los cortes, cada corte ubicado uno aguas arriba y otro, aguas abajo de la caída. Estas capturas permiten analizar el comportamiento del campo de velocidades en ambas regiones, evidenciándose una mayor magnitud de velocidad antes del descenso, seguida de una notoria disipación de energía en la sección posterior.

Figura 172

Puntos de comprobación del disipador con pendiente invertida



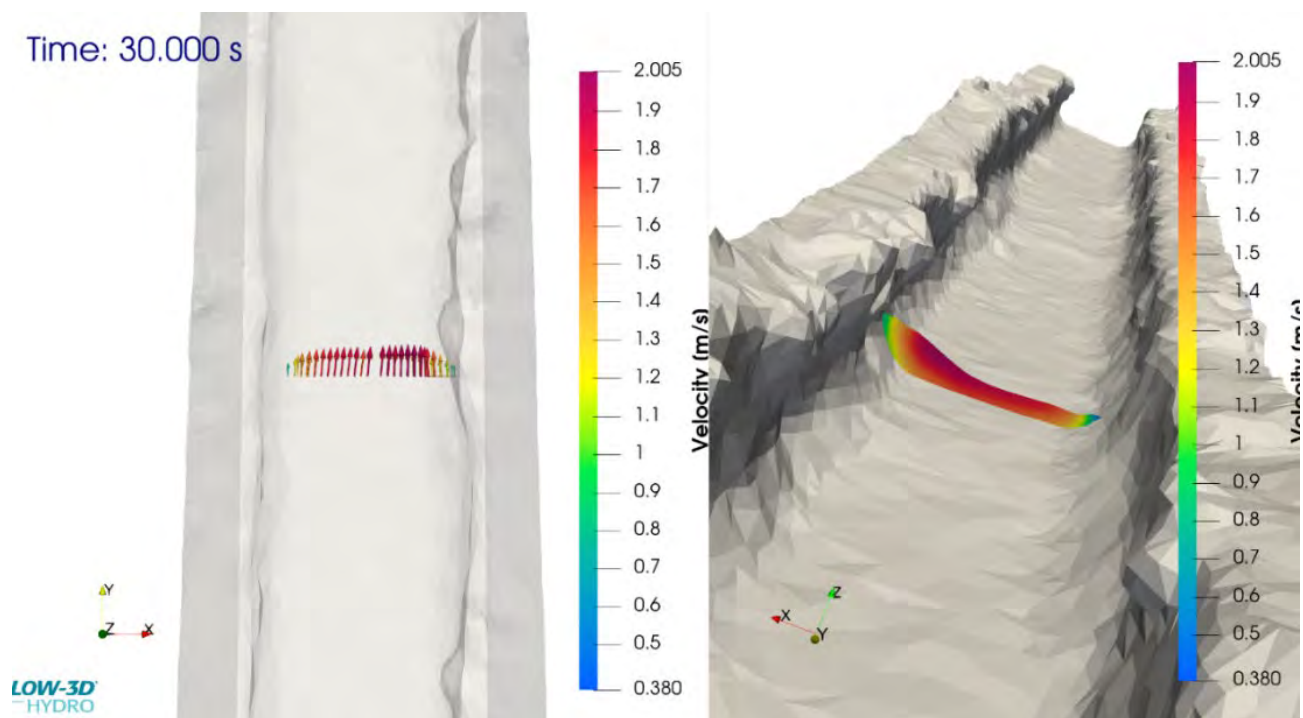
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

El corte de sección transversal en la entrada del disipador, ubicado antes del cambio de pendiente, permite observar con mayor detalle el comportamiento del flujo justo antes de que se inicie la disipación de energía. En esta sección se presentan vectores de velocidad que indican tanto la magnitud como la dirección del flujo, mostrando una distribución más uniforme y alineada

en el sentido del canal. La visualización de los vectores permite identificar que en esta zona aún predomina una alta energía cinética, producto de la pendiente previa del canal. Esta información es clave para comprender cómo el flujo se comporta antes de ingresar al tramo con pendiente invertida, donde comenzará el proceso de disipación.

Figura 173

Corte transversal del P1 de comprobación del dissipador con pendiente

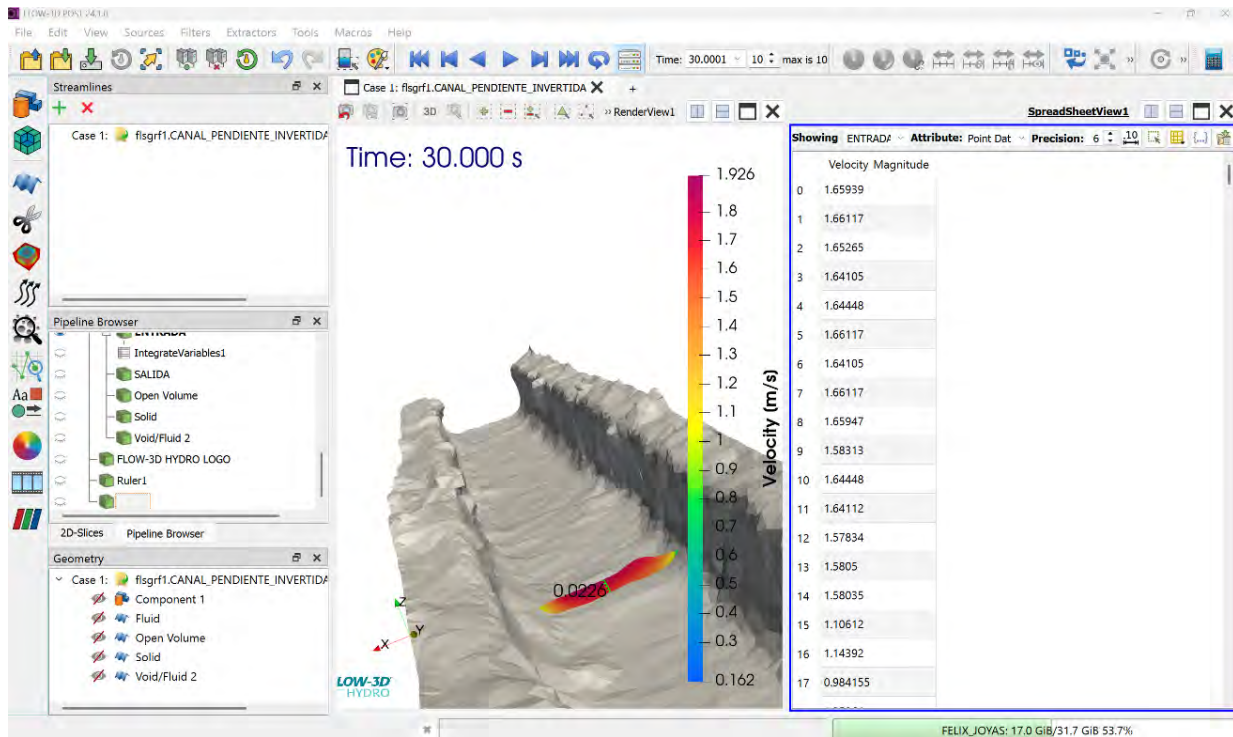


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 174** que la velocidad en el punto de entrada es mayor que en el punto de salida, aquí nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 628 puntos de velocidad en la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 1.52 m/s.

Figura 174

Extracción de velocidades del P1 del corte transversal del dissipador con pendiente invertida



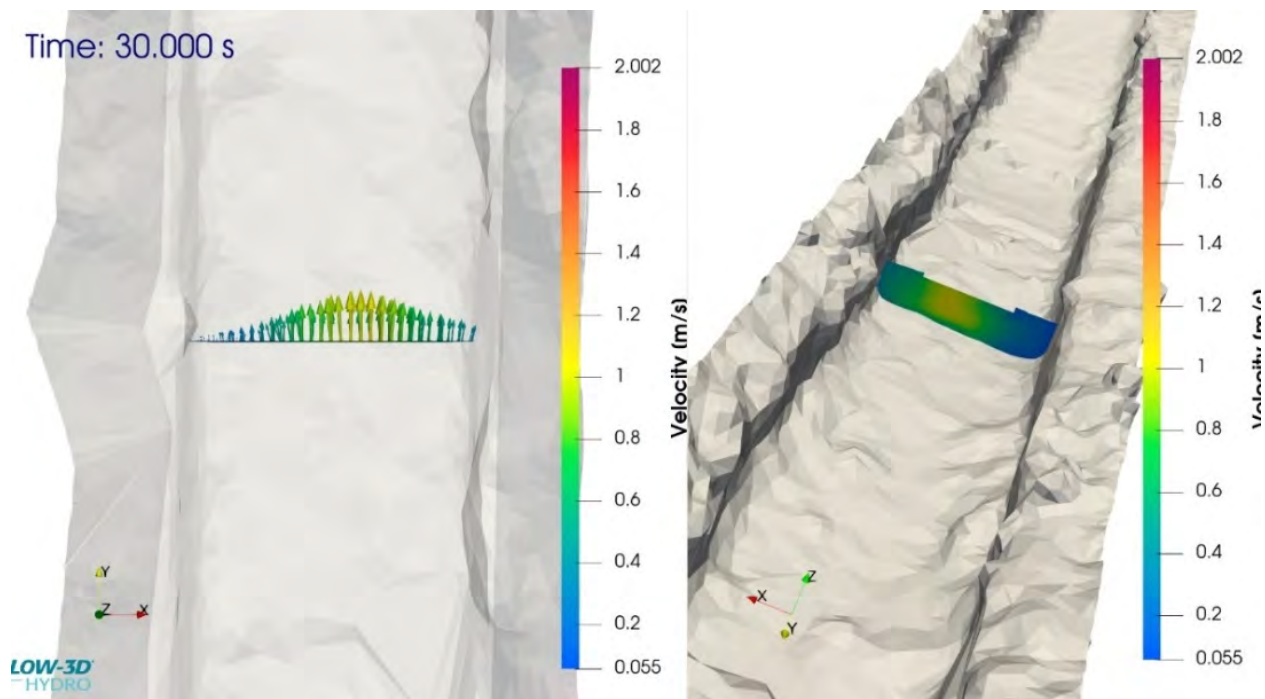
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

El corte de sección transversal en la salida del dissipador, ubicado después del cambio de pendiente, muestra claramente el efecto del proceso de disipación sobre el flujo. A través de los vectores de velocidad se puede observar una notable disminución en la magnitud de las velocidades, así como una mayor dispersión y desorden en la dirección del flujo, lo que evidencia la pérdida de energía cinética. Esta visualización confirma que el cambio de pendiente y la

geometría del dissipador han logrado modificar la estructura del flujo, reduciendo su velocidad y generando zonas de remolino o turbulencia que contribuyen al proceso de disipación hidráulica.

Figura 175

Corte transversal del P2 de comprobación del dissipador con pendiente



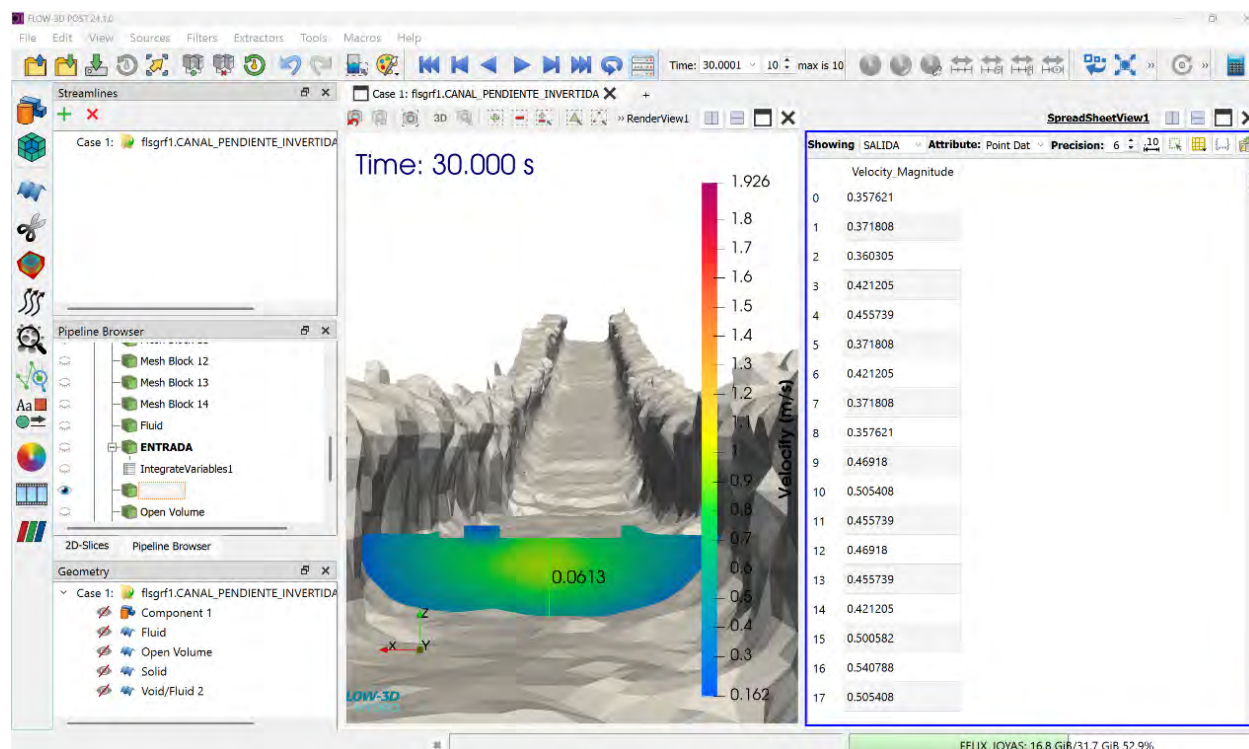
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Se observa en la **Figura 176** que la velocidad en el punto de salida es menor que en el punto de entrada, observando la disipación debido al cambio de pendiente, aquí nosotros obtuvimos la toma de datos de todas las velocidades en la sección en este caso son un total de 1261

puntos de velocidad en la sección de fluido, donde obtuvimos un resultado de la velocidad promedio de 0.56 m/s.

Figura 176

Extracción de velocidades del P2 del corte transversal del dissipador con pendiente invertida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.1.3.3.3. Validación del Modelo Numérico Mediante Comparación con Métodos

Experimentales

Con el objetivo de validar la confiabilidad de los resultados obtenidos en el modelamiento numérico, se realizó una comparación entre tres métodos distintos para la estimación del caudal: (1) medición experimental utilizando la técnica LSPIV (Large Scale Partidle Image Velocimetry), (2) cálculo del caudal mediante fórmula de vertedero de pared delgada, y (3) resultados de simulación obtenidos en FLOW-3D. Esta triangulación metodológica permite comprobar la precisión del modelo computacional frente a observaciones experimentales reales, resultando:

Dando como resultado el siguiente cuadro:

Tabla 60

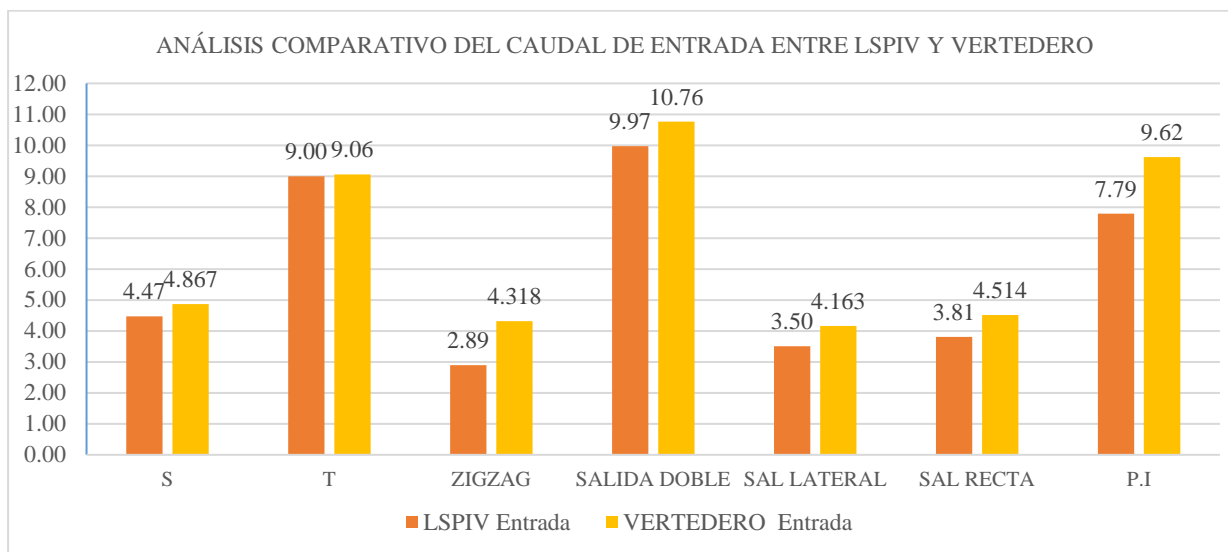
Resultados de la validación de los diferentes métodos usados

ANÁLISIS COMPARATIVO	LSPIV						VERTEDERO		FÓRMULA		SIMULACIÓN	
	CAUDAL		VELOCIDAD SUPERFICIAL		VELOCIDAD PROMEDIO		CAUDAL		VELOCIDAD AD		VELOCIDAD	
			Entrada	Salida	Entrada	Salida						
S	4.47	4.37	0.48	0.29	0.39	0.24	4.87	4.81	0.43	0.31	0.43	0.31
T	9.00	5.45	0.92	0.27	0.74	0.22	9.06	9.05	0.84	0.62	0.83	0.61
ZIGZAG	2.89	2.65	0.41	0.37	0.33	0.30	4.32	4.29	0.45	0.37	0.45	0.35
SALIDA DOBLE	9.97	4.13	0.44	0.47	0.35	0.38	10.76	4.04	0.52	0.42	0.52	0.43
SALIDA LATERAL	3.50	3.58	0.70	0.41	0.56	0.33	4.16	4.11	0.58	0.34	0.58	0.32
SALIDA RECTA	3.81	3.76	0.92	0.72	0.74	0.58	4.51	4.51	0.79	0.61	0.80	0.61
PENDIENTE INVERTIDA	7.79	7.84	1.72	0.58	1.38	0.47	9.62	9.54	1.52	0.55	1.52	0.56

Nota. Elaboración Propia

Figura 177

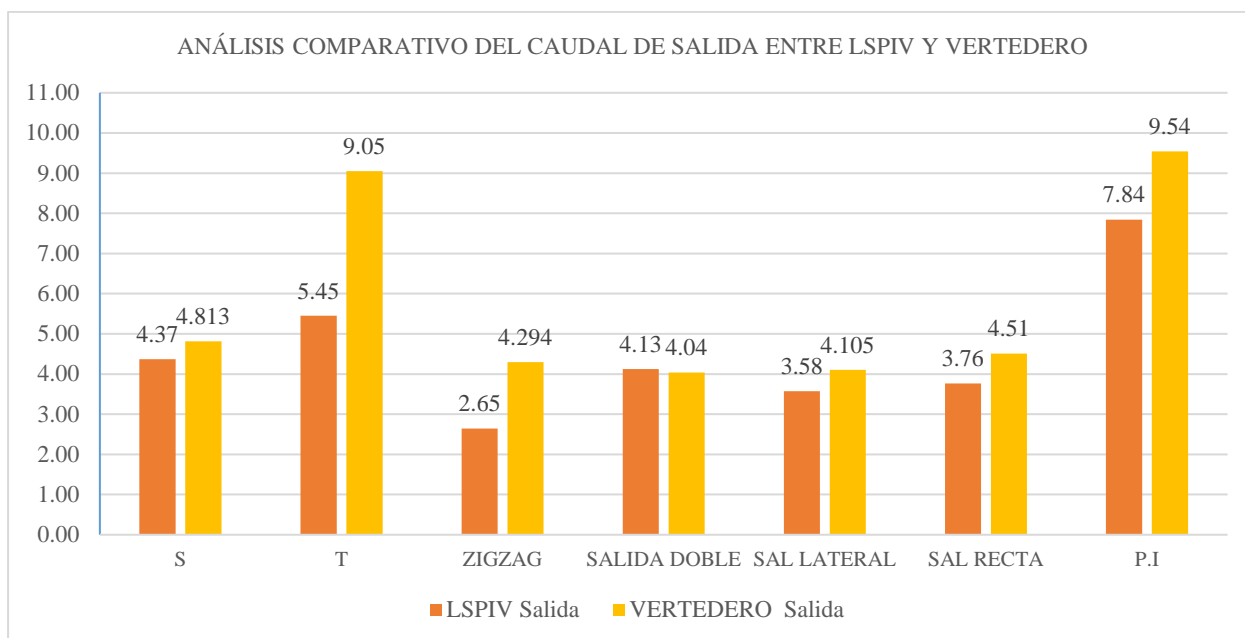
Gráfico del análisis comparativo del caudal de entrada entre LSPIV y Vertedero



Nota. Elaboración Propia

Figura 178

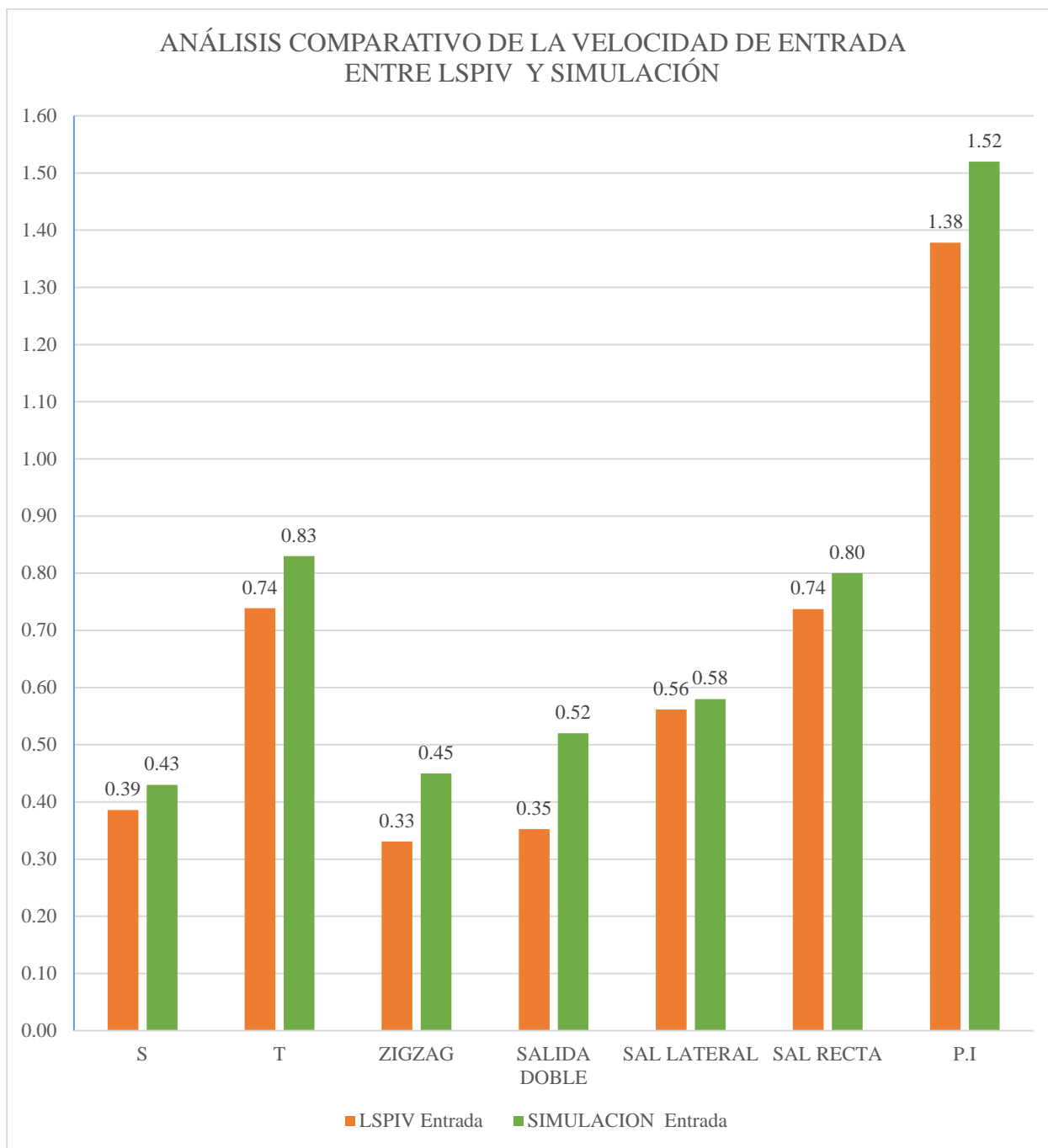
Gráfico del análisis comparativo del caudal de salida entre LSPIV y Vertedero



Nota. Elaboración Propia

Figura 179

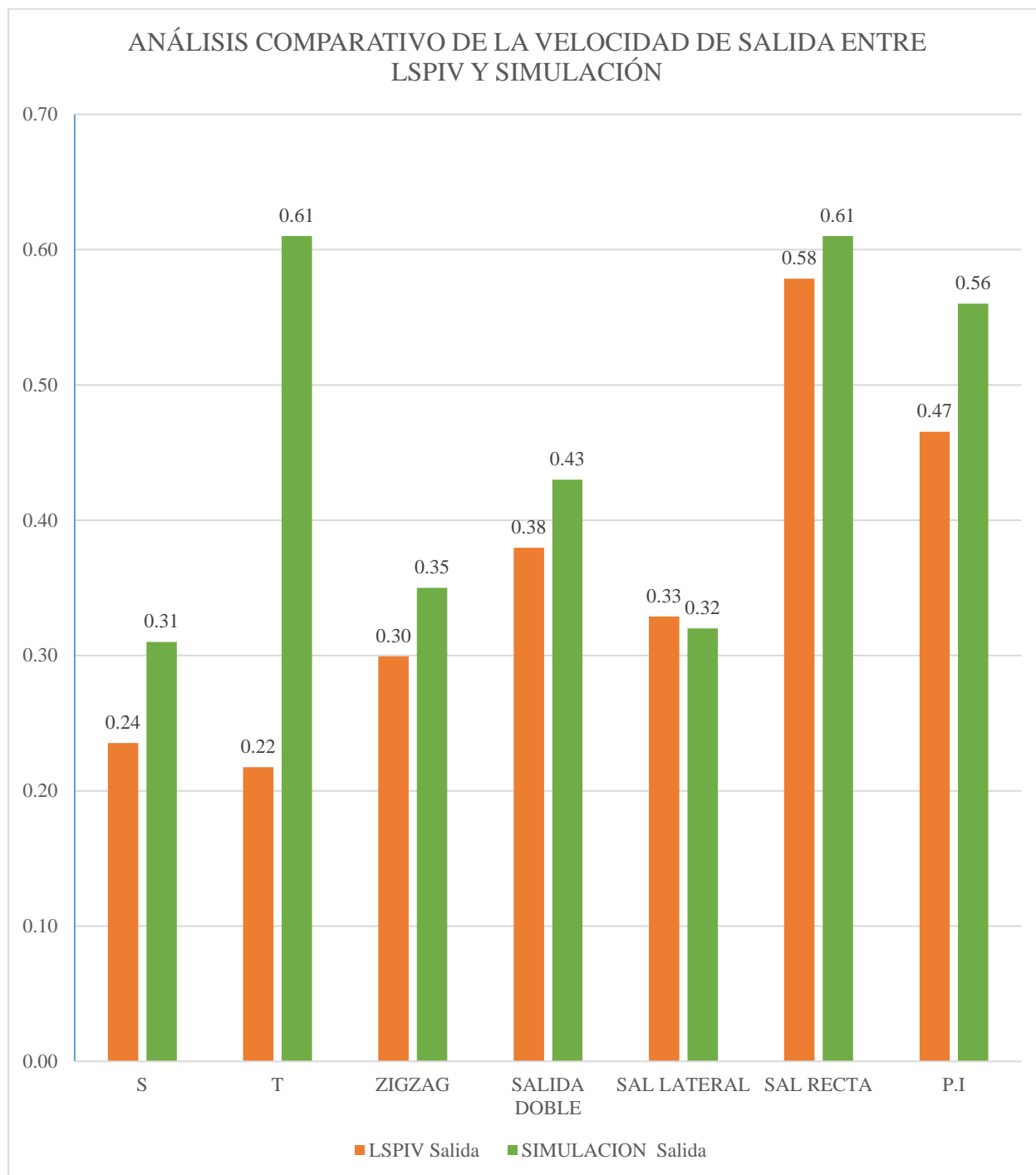
Gráfico del análisis comparativo de la velocidad de entrada entre LSPIV y Simulación



Nota. Elaboración Propia

Figura 180

Gráfico del análisis comparativo de la velocidad de salida entre LSPIV y Simulación



Nota. Elaboración Propia

Los resultados obtenidos en la comparación general muestran que el modelo numérico reproduce adecuadamente el comportamiento hidráulico observado en campo.

La validación del caudal, contrastado previamente entre el vertedero y el aforo directo, permitió contar con un valor de referencia confiable para evaluar el desempeño del modelo.

De igual manera, la velocidad superficial medida mediante LSPIV mostró una buena correspondencia con la velocidad estimada mediante la ecuación de continuidad, lo que respalda la consistencia del método experimental.

Al contrastar las velocidades obtenidas en la simulación con el LSPIV, se observó que las diferencias fueron mínimas en la mayoría de los disipadores, reflejando que el modelo FLOW-3D representa de forma realista las condiciones hidráulicas del sistema. Si bien en zonas con geometría compleja las variaciones fueron ligeramente mayores, no llegan a comprometer la tendencia global del flujo.

Adicionalmente, la comparación del caudal obtenido mediante LSPIV con el determinado por el vertedero mostró concordancia favorable y los errores permanecieron reducidos.

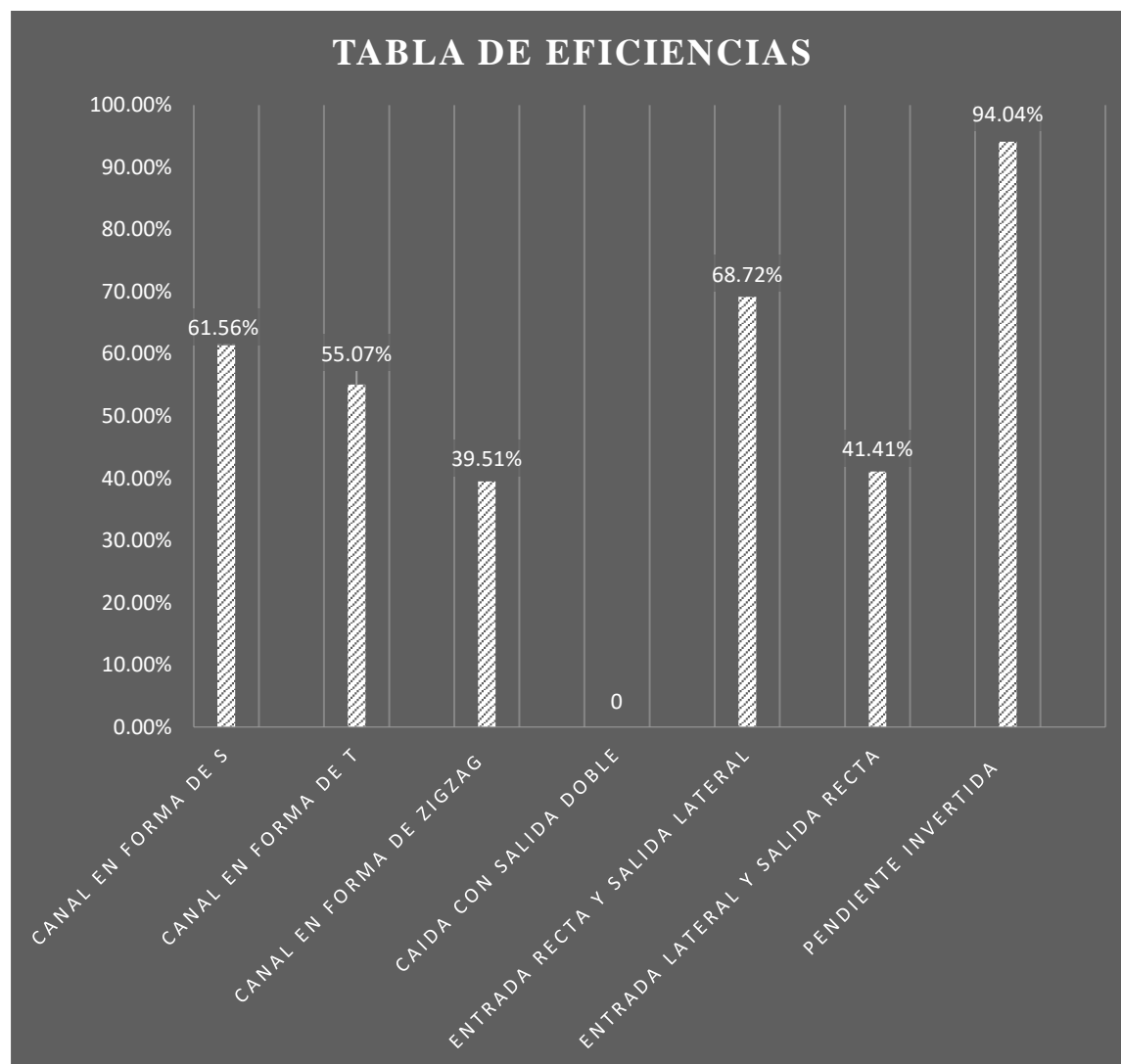
En conjunto, la coherencia observada entre los métodos experimentales (LSPIV y vertedero) y los resultados del modelo numérico confirma la fiabilidad de FLOW-3D (cuando se emplea con parámetros de entrada correctamente definidos) como herramienta para analizar los procesos de disipación y transporte de energía en las estructuras hidráulicas incaicas de Tipón.

4.1.4. Variación de la eficiencia de disipación de energía cinética entre los diferentes tipos de estructuras hidráulicas incas

El cumplimiento del cuarto objetivo específico se complementa con los resultados obtenidos en el objetivo general, donde se determinan las eficiencias individuales necesarias para realizar la comparación entre los distintos disipadores.

Figura 181

Variación de la eficiencia de energía cinética de disipación entre los disipadores



Nota. Elaboración Propia

A partir del análisis realizado, se pudo observar que la eficiencia de disipación de energía cinética varía notablemente entre los diferentes tipos de canales presentes en el Complejo Arqueológico de Tipón. Cada geometría evaluada responde de forma distinta ante el paso del agua, lo cual se refleja en los porcentajes de disipación obtenidos, que van desde valores bajos cercanos al 39 % hasta niveles muy altos por encima del 94 %.

En términos generales, los canales que presentan formas más abruptas o configuraciones que generan cambios fuertes en la dirección o comportamiento del flujo (como el canal con pendiente invertida o aquellos con caídas combinadas con salidas laterales) fueron los que mostraron mayores niveles de disipación. Esto indica que mientras mayor sea la alteración que sufre el flujo a lo largo del canal ya sea por curvas cerradas, pendientes acentuadas o cambios en la orientación de entrada y salida mayor es la cantidad de energía cinética que se disipa antes de la salida.

Por otro lado, los canales que si bien tienen cierta curvatura o complejidad, pero permiten que el flujo se estabilice rápidamente, presentaron valores intermedios o bajos de disipación. Este es el caso de los canales en forma de zigzag o con entrada lateral y salida recta, donde, aunque existen ciertos elementos que generan turbulencia, estos no son lo suficientemente agresivos como para provocar una pérdida considerable de energía.

En conjunto, se evidencia que no todos los canales tienen la misma capacidad para disipar energía, y que el diseño geométrico cumple un rol fundamental en ese proceso. Las diferencias entre ellos no solo responden a la forma visible del canal, sino también a cómo esa forma influye en el comportamiento del flujo, generando remolinos, choques internos o variaciones en la velocidad.

Este análisis permite concluir que en Tipón, los diferentes tipos de estructuras hidráulicas no fueron diseñados de forma aleatoria, sino que probablemente respondían a necesidades específicas de control del flujo y protección de las zonas agrícolas y constructivas.

4.2. Resultados respecto al objetivo general

4.2.1. Cálculo de la eficiencia de disipación de la energía cinética

Para el cálculo de eficiencia de energía del Complejo Arqueológico de Tipón, requiere analizar la variación de la energía del flujo entre la entrada y la salida de cada estructura. La energía total del flujo está compuesta por su componente potencial ($z + y$) y su componente cinética ($v^2/2g$), en la hidráulica de Tipón en lugar de calcular individualmente las pérdidas de energía por fricción de paredes o saltos hidráulicos en este estudio se opta por una metodología basada en el análisis directo de la variación de energía específica a partir de los resultados de simulación en FLOW-3D, ya que dicha simulación ya modela internamente las fuerzas de fricción en las paredes, generación de turbulencias, y los saltos hidráulicos.

$$E_T = z + y + \frac{v^2}{2 * g} \quad (53)$$

Sin embargo, en el presente estudio si bien se realizará el cálculo completo de la energía total del flujo considerando tanto la componente potencial como la cinética; no obstante, los resultados y el análisis se enfocarán únicamente en la energía cinética. Esto se debe a que la disipación observable en los disipadores se manifiesta principalmente a través de variaciones de velocidad, las cuales representan de manera directa el efecto hidráulico de cada estructura. En cambio, los cambios asociados a la energía potencial serán calculadas, pero no constituye el parámetro más representativo para evaluar la eficiencia hidráulica. Por ello, la evaluación final se orienta a la pérdida de energía cinética como indicador principal del desempeño de los disipadores.

$$E_k = \frac{v^2}{2 * g} \quad (54)$$

Entonces la energía cinética total disipada es:

$$D = E_{K,Entrada} - E_{K,Salida} \quad (55)$$

Y la eficiencia será:

$$\eta = \left(\frac{E_{K,entrada} - E_{K,salida}}{E_{K,entrada}} \right) * 100\% \quad (56)$$

Donde:

$$E_{K,inicial} = \frac{v_{entrada}^2}{2 * g} \quad (57)$$

$$E_{K,final} = \frac{v_{salida}^2}{2 * g} \quad (58)$$

Los puntos de entrada y salida se ubicaron considerando las condiciones hidráulicas locales del flujo, priorizando siempre zonas donde el régimen se encontrará estable y representativo.

En algunos casos, los puntos se tomaron cerca de los cambios de sección cuando el flujo ya estaba hidráulicamente desarrollado.

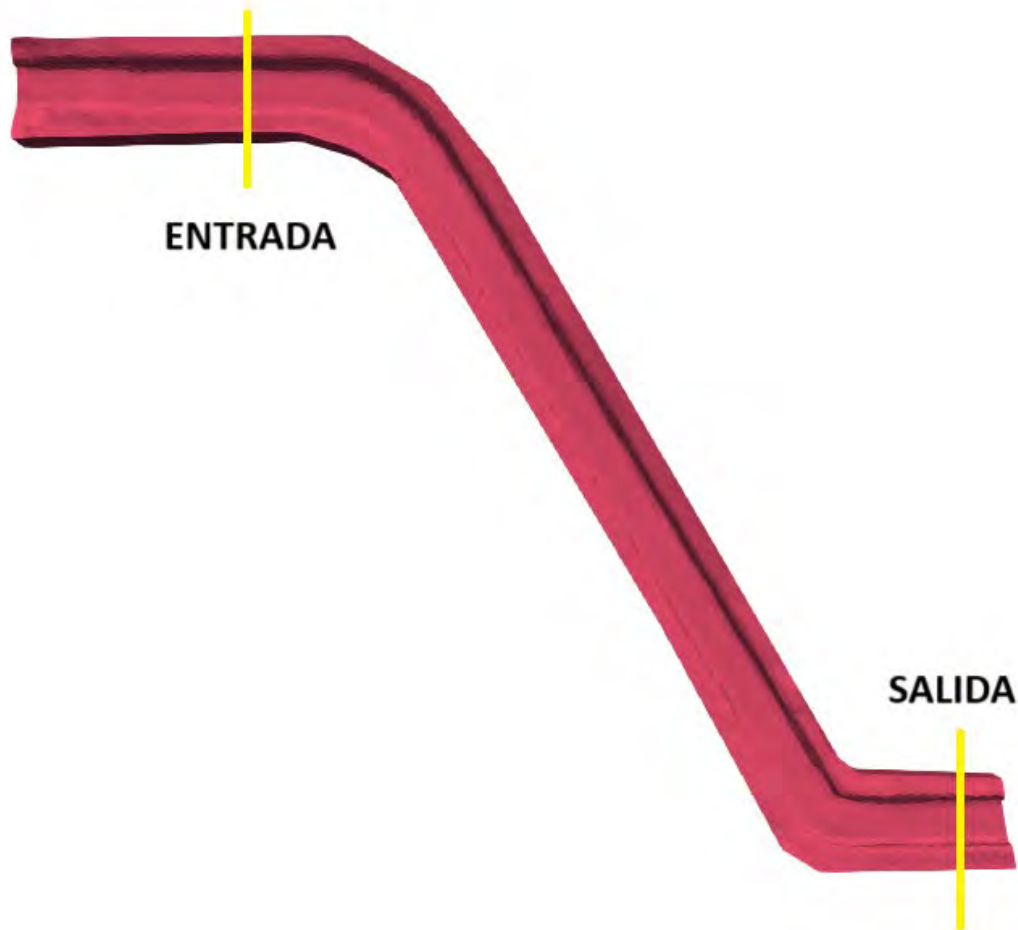
En otros casos, los puntos se ubicaron más alejados, debido a la presencia de perturbaciones locales como irregularidades geométricas, cambios de pendiente o saldos hidráulicos.

4.2.1.1. Resultados de la disipación en el canal en forma de S

Se procedió con la extracción de datos en los puntos estratégicos de entrada y salida del canal en forma de S, previamente determinados y calibrados en la simulación. Estos datos constituyen la base para el análisis de la disipación de energía cinética a lo largo del canal, permitiendo evaluar su eficiencia hidráulica.

Figura 182

Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador en forma de S

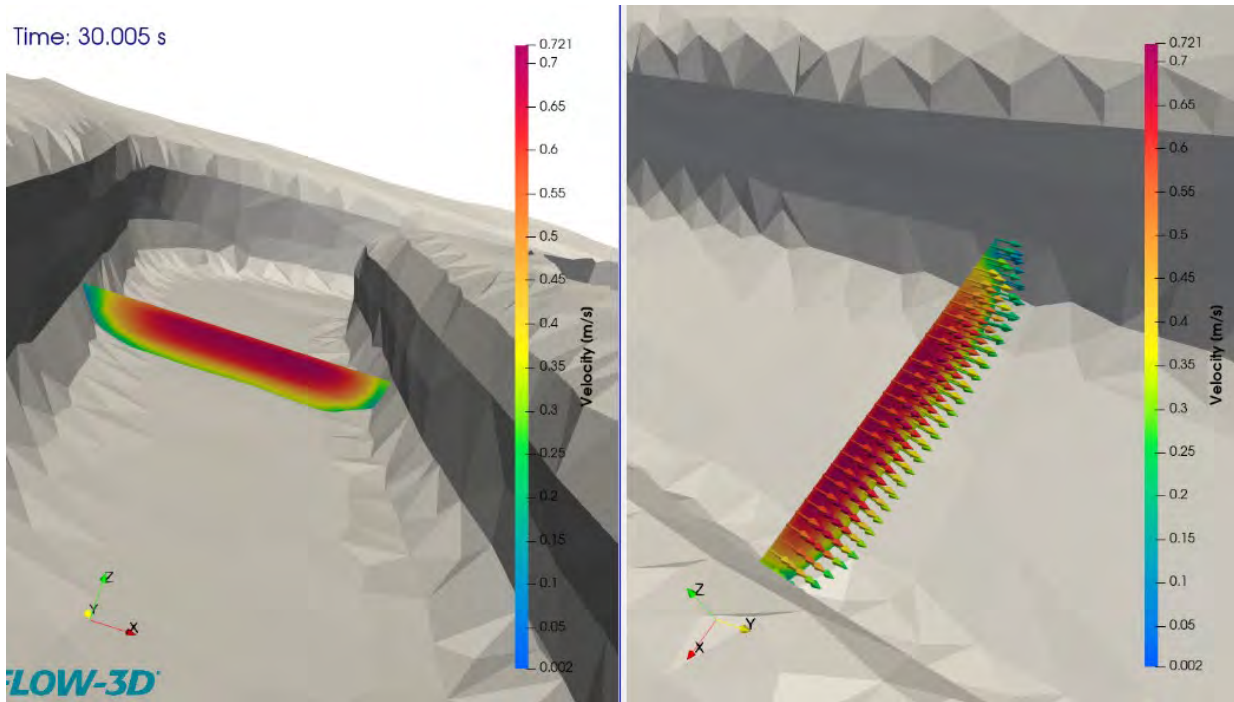


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Análisis en el punto de entrada:

Figura 183

Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del dissipador en forma de S



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.50 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K,entrada} = \frac{v_{entrada}^2}{2 * g} = \frac{0.50^2}{2 * 9.8} = 0.01277$$

Resumen:

Tabla 61

Energía Cinética en el punto de entrada del dissipador en forma de S

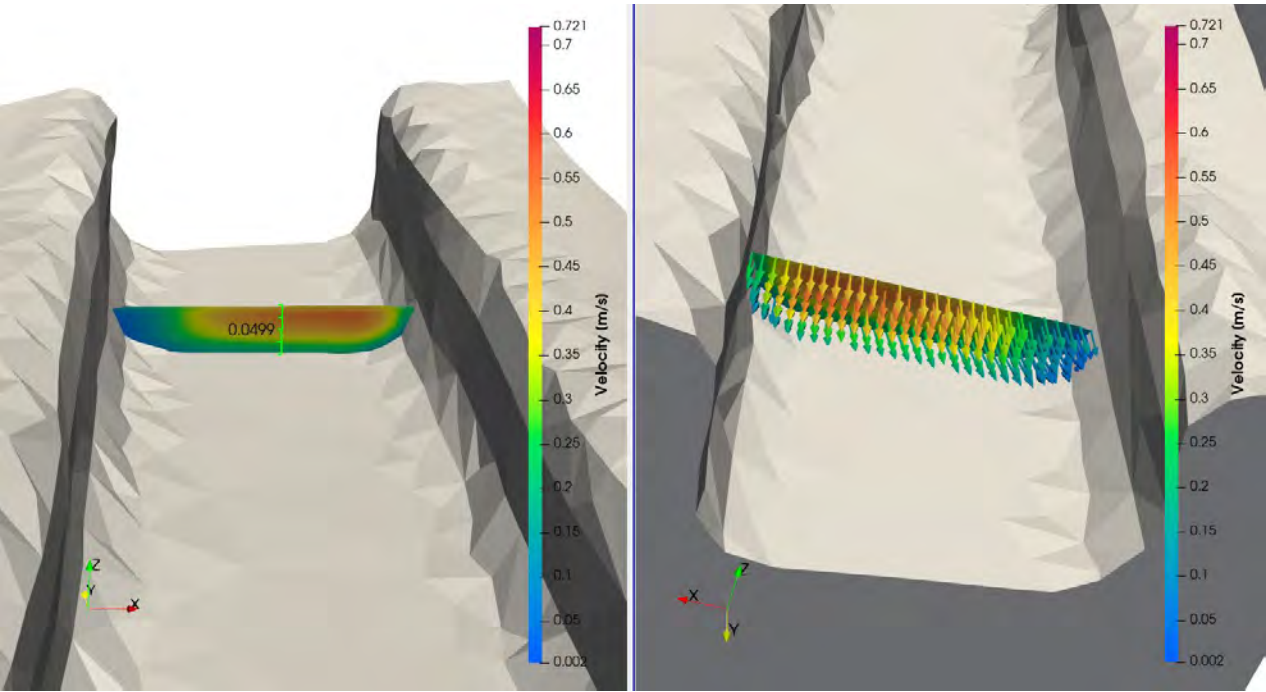
Canal en forma de S - Entrada			
Energía Cinetica Inicial	Ek inicial	0.01277	m
Velocidad Inicial	V inicial	0.50	m/s

Nota. Elaboración Propia

Análisis en el punto de salida:

Figura 184

Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del dissipador en forma de S



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.31 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la salida:

$$E_{K, \text{salida}} = \frac{v_{\text{salida}}^2}{2 * g} = \frac{0.31^2}{2 * 9.8} = 0.00491$$

Resumen:

Tabla 62

Energía Cinética en el punto de salida del dissipador en forma de S

Canal en forma de S - Salida			
Energía Cinética Final	Ek final	0.00491	m
Velocidad Final	V final	0.31	m/s

Nota. Elaboración Propia

Diferencia de energía cinética:

$$\Delta E_k = E_{k \text{ entrada}} - E_{k \text{ salida}} = 0.01277 - 0.00491 = 0.00786$$

Cálculo de la eficiencia

$$\eta = \frac{0.01277 - 0.00491}{0.01277} * 100\% = 61.56 \%$$

Se determinó que la estructura hidráulica en forma de canal en forma de “S” disipa aproximadamente el 61.56% de la energía cinética del flujo, lo cual representa una eficiencia hidráulica significativa en la reducción de la energía inicial del agua.

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total.

$$E_{T\text{ entrada}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0.045 + 0.035 + \frac{0.50^2}{2 * 9.8} = 0.09277$$

$$E_{T\text{ salida}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0 + 0.05 + \frac{0.31^2}{2 * 9.8} = 0.05491$$

Diferencia de energía total

$$\Delta E_T = E_{T\text{ entrada}} - E_{T\text{ salida}} = 0.09277 - 0.05491 = 0.03786$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total

$$\eta = \frac{0.09277 - 0.05491}{0.09277} * 100\% = 40.81 \%$$

Los resultados obtenidos muestran que la disipación de energía en la estructura analizada presenta una diferencia notable entre la componente cinética y la energía total del flujo. La variación de energía cinética es de 0.00786, mientras que la variación de energía total alcanza 0.03786; esto significa que aproximadamente el 20.75% de la energía disipada corresponde a energía cinética y el 79.25% se asocia a la componente potencial vinculada al desnivel hidráulico. La eficiencia de disipación de energía cinética obtenida es de 61.56%, mientras que la eficiencia calculada para la energía total alcanza un valor de 40.81%. En este sentido, nuestro análisis se centrará en la disipación de energía cinética, dado que es la componente que se manifiesta de forma directa y observable en el comportamiento hidráulico del Complejo Arqueológico de Tipón.

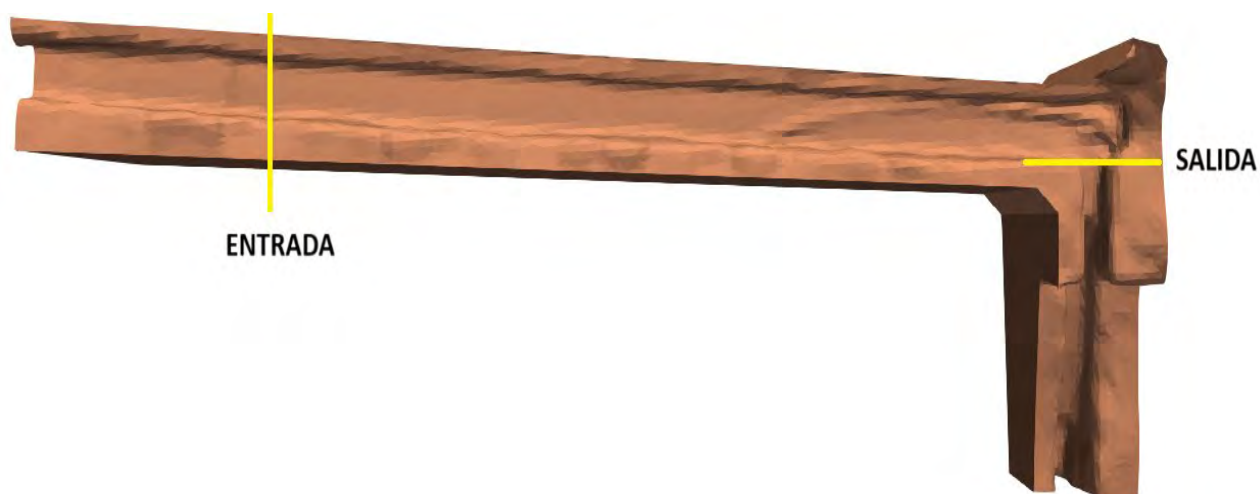
Por ende el **resultado final** de la eficiencia de disipación de energía cinética es de **61.56%**.

4.2.1.2. Resultados de disipación en el canal en forma de T

Para el caso del canal con geometría en forma de T, se seleccionaron y evaluaron los puntos de entrada y salida según los criterios definidos durante la etapa de calibración de la simulación. La información obtenida en estos tramos permitió realizar un análisis de la capacidad de disipación de energía del canal.

Figura 185

Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador en forma de T

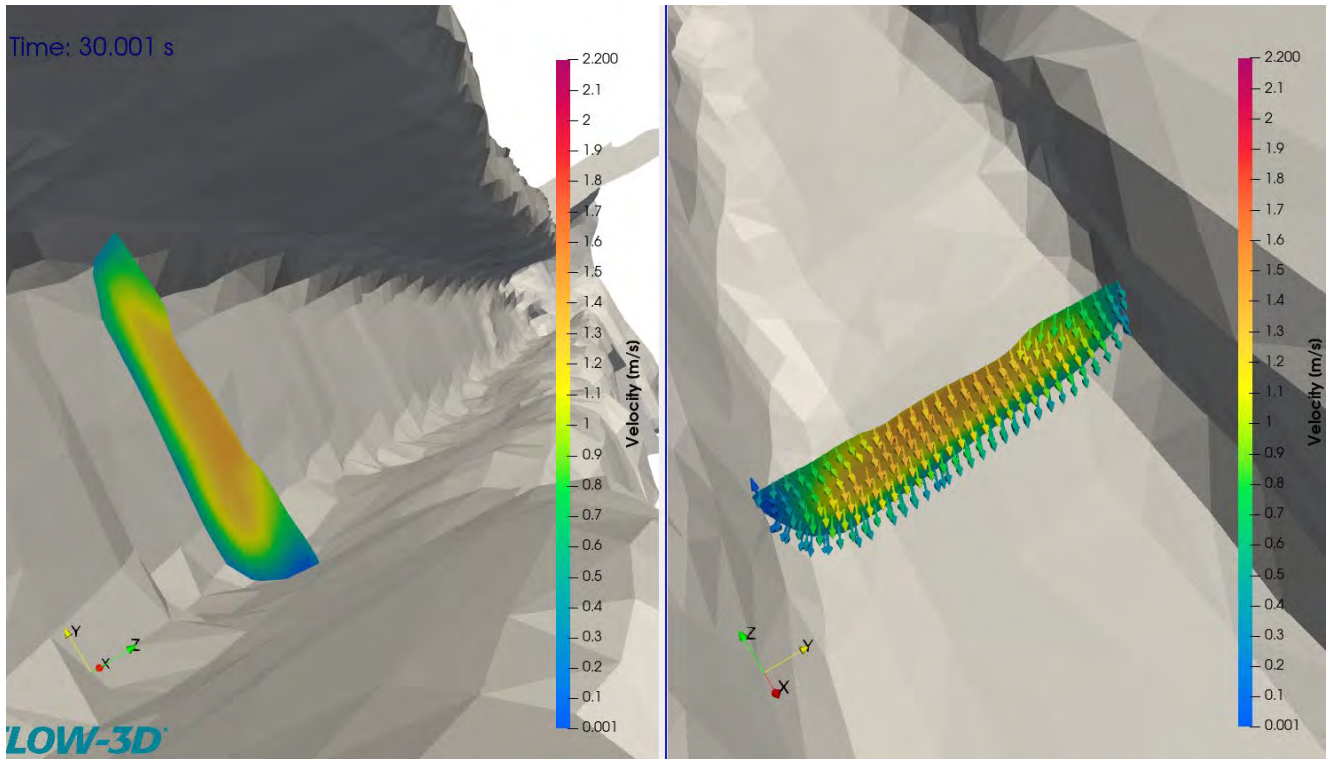


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Análisis en el punto de entrada:

Figura 186

Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del dissipador en forma de T



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.91 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K,entrada} = \frac{v_{entrada}^2}{2 * g} = \frac{0.91^2}{2 * 9.8} = 0.04229$$

Resumen:

Tabla 63

Energía Cinética en el punto de entrada del dissipador en forma de T

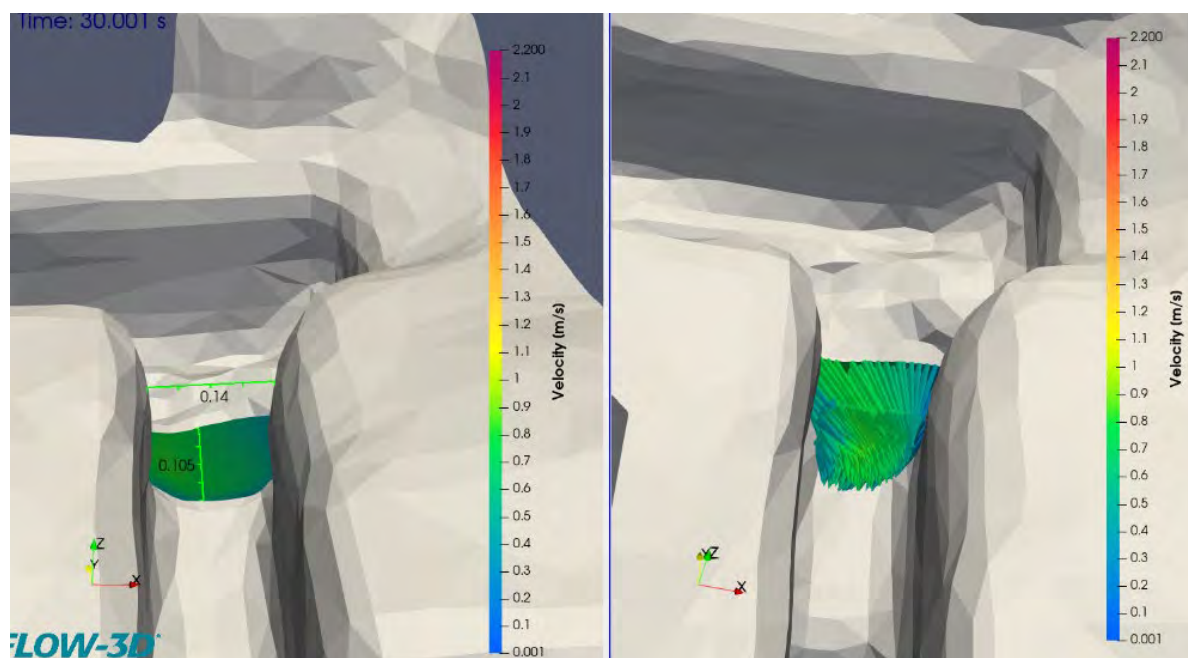
Canal en forma de T - Entrada			
Energía Cinética Inicial	Ek inicial	0.04229	m
Velocidad Inicial	V inicial	0.91	m/s

Nota. Elaboración Propia

Análisis en el punto de salida:

Figura 187

Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del dissipador en forma de T



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.61 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K, \text{salida}} = \frac{v_{\text{salida}}^2}{2 * g} = \frac{0.61^2}{2 * 9.8} = 0.01900$$

Resumen:

Tabla 64

Energía Cinética en el punto de salida del dissipador en forma de T

Canal en forma de T - Salida			
Energía Cinética Final	Ek final	0.01900	m
Velocidad Final	V final	0.61	m/s

Nota. Elaboración Propia

Diferencia de energía cinética:

$$\Delta E_k = E_{k \text{ entrada}} - E_{k \text{ salida}} = 0.04229 - 0.01900 = 0.02329$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía cinética.

$$\eta = \frac{0.04229 - 0.01900}{0.04229} * 100\% = 55.07 \%$$

El estudio hidráulico realizado evidenció que el canal con configuración en forma de T disipa un **55.07%** de la energía cinética del flujo. Este porcentaje representa una pérdida energética significativa producto de la interacción del agua con la geometría interna del canal.

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total.

$$E_{T \text{ entrada}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0.41 + 0.035 + \frac{0.91^2}{2 * 9.8} = 0.48729$$

$$E_{T \text{ salida}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0 + 0.105 + \frac{0.61^2}{2 * 9.8} = 0.12400$$

Diferencia de energía total

$$\Delta E_T = E_{T \text{ entrada}} - E_{T \text{ salida}} = 0.48729 - 0.12400 = 0.36329$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total

$$\eta = \frac{0.48729 - 0.12400}{0.48729} * 100\% = 74.55 \%$$

Los resultados muestran que la disipación de energía en la estructura hidráulica analizada proviene principalmente de la energía potencial, ya que la diferencia de energía total (0.36329) es muy superior a la diferencia de energía cinética (0.02329). Según los cálculos, solo el 6.41% de la pérdida total corresponde a energía cinética, mientras que el resto se debe a cambios en la altura del flujo, lo que indica que el sistema disipa mayormente energía a través del desnivel geométrico. La eficiencia de disipación de energía cinética es de 55.07%, mientras que la eficiencia de disipación de energía total alcanza 74.55%, lo cual es coherente: al incluir la variación de energía potencial, la estructura demuestra una mayor capacidad global para reducir la energía del flujo. Sin embargo, nuestro análisis se centrará en la disipación de energía cinética, ya que es la componente que se manifiesta de manera directa y observable en el comportamiento del flujo dentro del Complejo Arqueológico de Tipón.

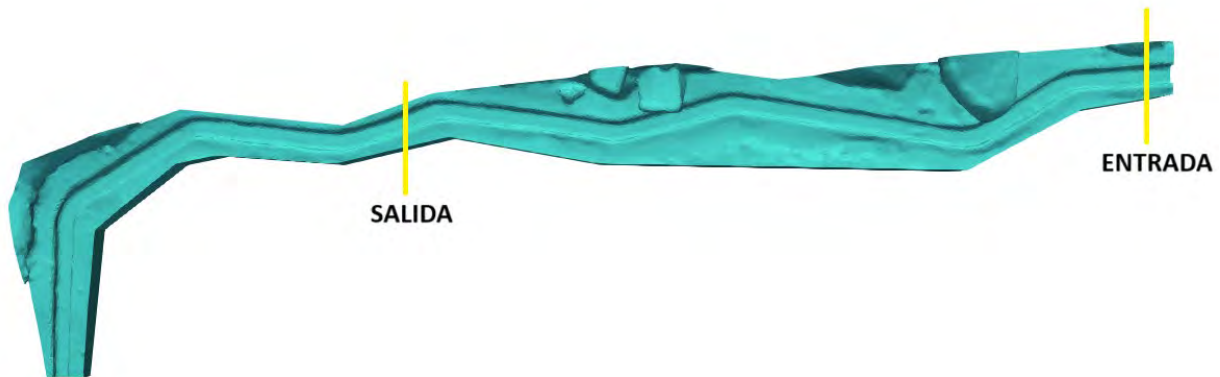
Por ende el **resultado final** de la eficiencia de disipación de energía cinética es de **55.07%**.

4.2.1.3. Resultados de la disipación en el canal en forma de Zigzag

En el canal con forma de zigzag, se identificaron los sectores representativos para el ingreso y salida del flujo, considerando las particularidades del trazado y los resultados de la simulación calibrada. A partir de estos datos, se llevó a cabo el análisis de la disipación de energía, con el fin de determinar la influencia de esta geometría en la eficiencia hidráulica del sistema.

Figura 188

Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador en forma de Zigzag

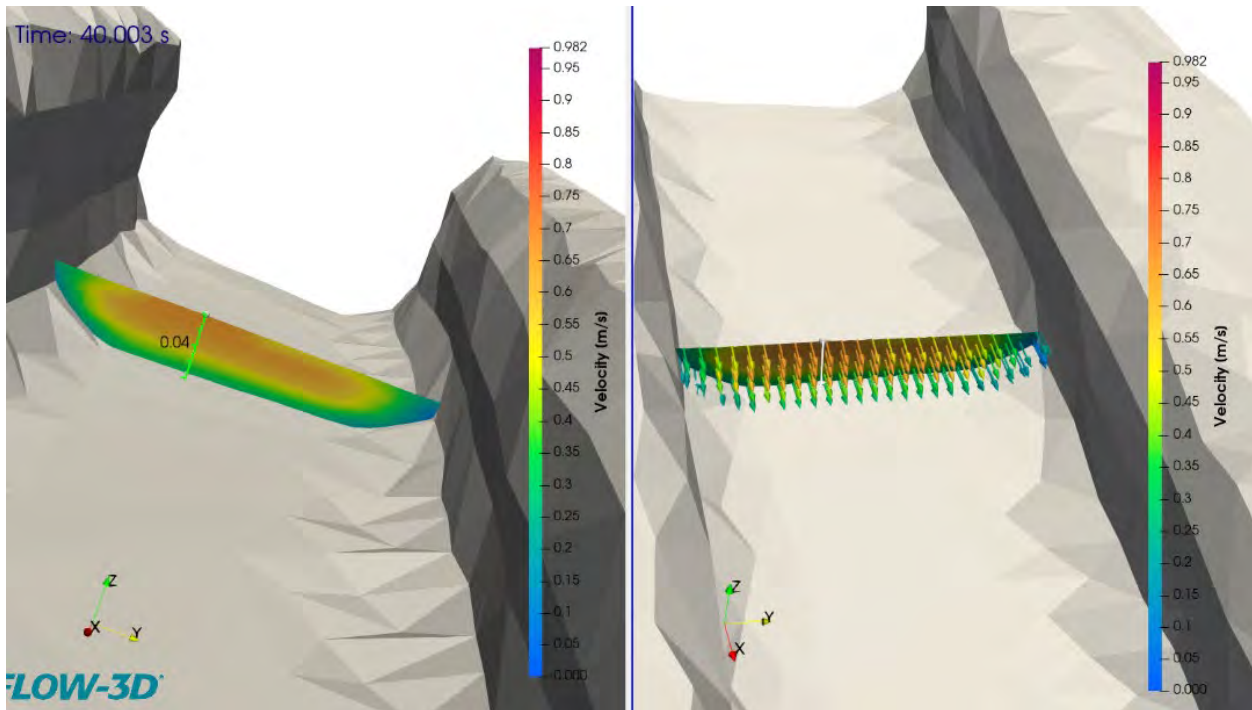


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Análisis en el punto de entrada:

Figura 189

Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del dissipador en forma de Zigzag



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.45 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K,entrada} = \frac{v_{entrada}^2}{2 * g} = \frac{0.45^2}{2 * 9.8} = 0.01034$$

Resumen:

Tabla 65

Energía Cinética en el punto de entrada del dissipador en forma de Zigzag

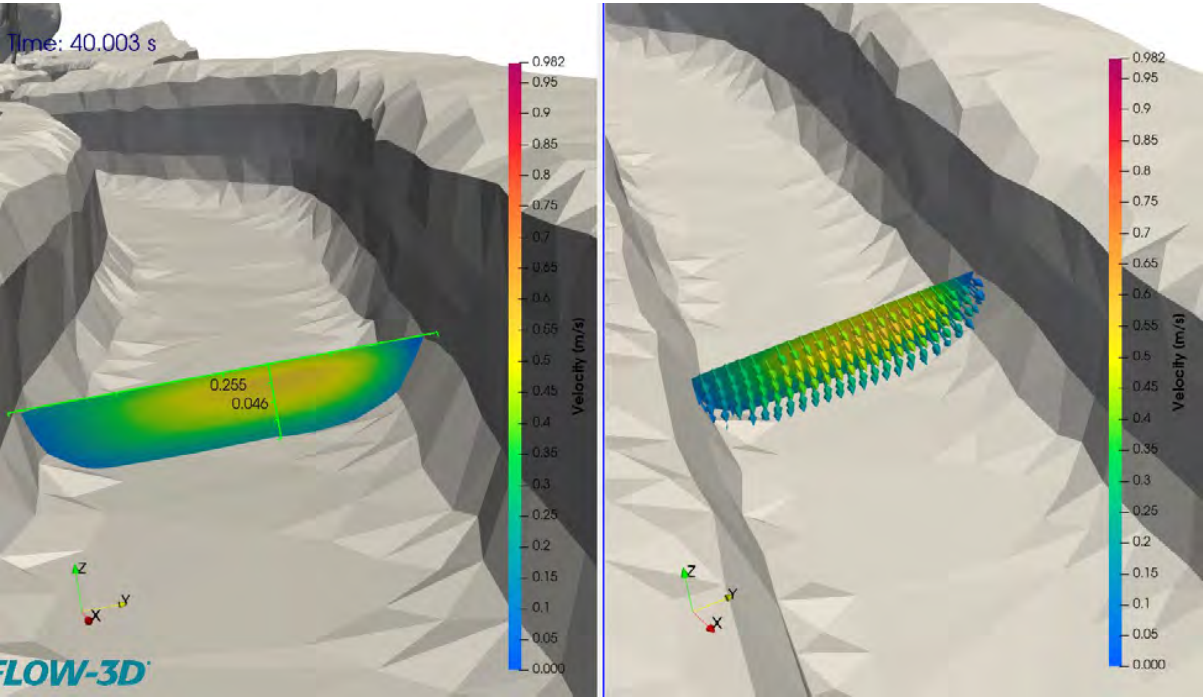
Canal en forma de Zigzag - Entrada			
Energía Cinetica Inicial	Ek inicial	0.0134	m
Velocidad Inicial	V inicial	0.45	m/s

Nota. Elaboración Propia

 Análisis en punto de salida:

Figura 190

Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del dissipador en forma de Zigzag



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.35 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K, \text{salida}} = \frac{v_{\text{salida}}^2}{2 * g} = \frac{0.35^2}{2 * 9.8} = 0.00626$$

Resumen:

Tabla 66

Energía Cinética en el punto de salida del dissipador en forma de Zigzag

Canal en forma de Zigzag - Salida			
Energía Cinética Final	Ek final	0.00626	m
Velocidad Final	V final	0.35	m/s

Nota. Elaboración Propia

Diferencia de energía cinética:

$$\Delta E_k = E_{k \text{ entrada}} - E_{k \text{ salida}} = 0.10125 - 0.06125 = 0.00409$$

Cálculo de la eficiencia

$$\eta = \frac{0.10125 - 0.06125}{0.10125} * 100\% = 39.51\%$$

El análisis hidráulico determinó que el canal en forma de zigzag logra una disipación de energía del **39.51%**. Esta pérdida energética refleja el efecto que tiene el recorrido sinuoso en la dinámica del flujo a lo largo de la estructura.

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total.

$$E_{T\text{ entrada}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0.204 + 0.04 + \frac{0.45^2}{2 * 9.8} = 0.25434$$

$$E_{T\text{ salida}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0 + 0.046 + \frac{0.35^2}{2 * 9.8} = 0.05226$$

Diferencia de energía total

$$\Delta E_T = E_{T\text{ entrada}} - E_{T\text{ salida}} = 0.25343 - 0.05226 = 0.20209$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total

$$\eta = \frac{0.25343 - 0.05226}{0.25343} * 100\% = 79.45 \%$$

Los resultados obtenidos muestran que la disipación de energía en la estructura analizada presenta una diferencia notable entre la componente cinética y la energía total del flujo. La variación de energía cinética es de 0.00409, mientras que la variación de energía total alcanza 0.20209; esto significa que aproximadamente el 2.02% de la energía disipada corresponde a energía cinética y el 97.98% se asocia a la componente potencial vinculada al desnivel hidráulico. La eficiencia de disipación de energía cinética obtenida es de 39.51%, mientras que la eficiencia calculada para la energía total alcanza un valor de 79.45%. En este sentido, nuestro análisis se centrará en la disipación de energía cinética, dado que es la componente que se manifiesta de forma directa y observable en el comportamiento hidráulico del Complejo Arqueológico de Tipón.

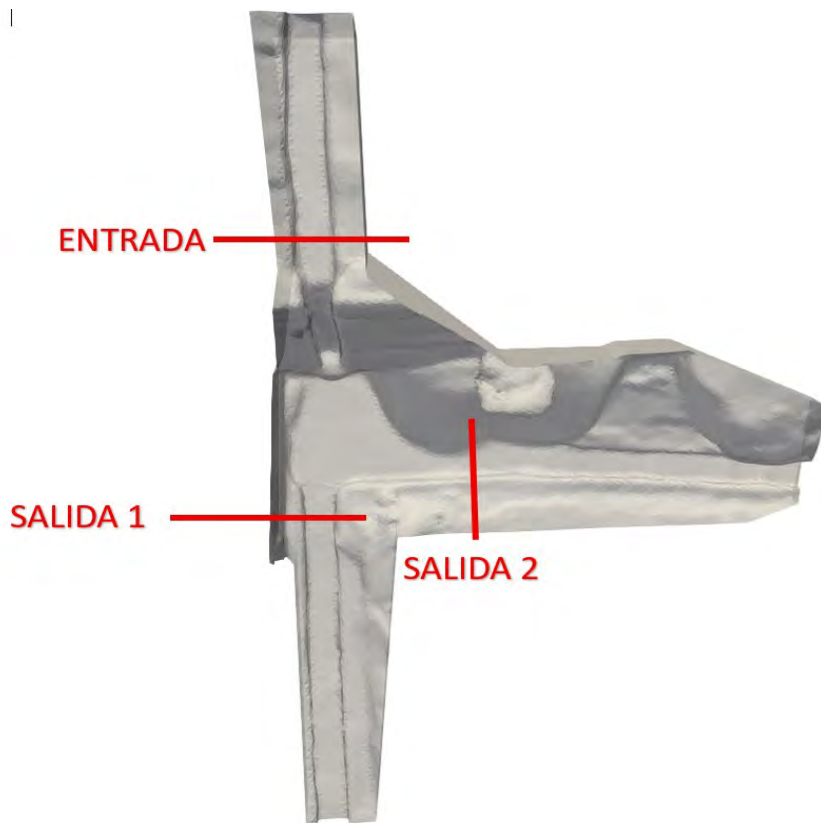
Por ende el **resultado final** de la eficiencia de disipación de energía cinética es de **39.51%**.

4.2.1.4. Resultados de la disipación en el canal con caída con doble salida

Para realizar el análisis de la eficiencia en la disipación de energía de la caída con doble salida, se compararon las condiciones energéticas del flujo en las secciones de ingreso y salida. Esta evaluación permitió cuantificar la proporción de energía cinética que es disipada a lo largo del recorrido, lo cual es fundamental para determinar la efectividad de la geometría del disipador. La eficiencia obtenida sirve como indicador clave del comportamiento hidráulico del sistema bajo las condiciones simuladas y considerando las características topográficas y constructivas del sitio.

Figura 191

Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador con caída con doble salida

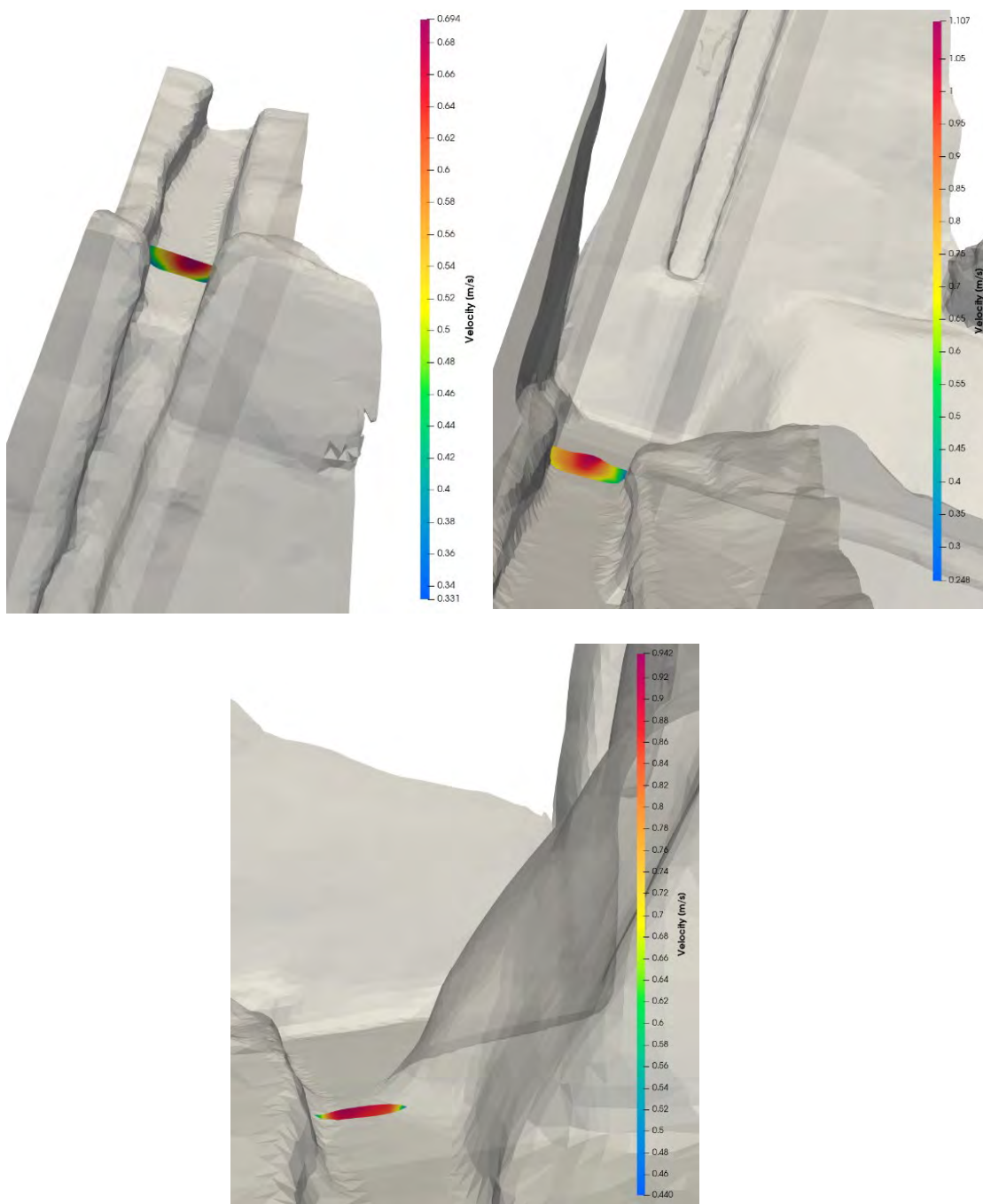


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Secciones de velocidad (entrada, salida 1 y salida 2)

Figura 192

Sección transversal de velocidad del dissipador de caída de doble caída (Entrada, Salida 1, Salida 2)



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.52 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K,entrada} = \frac{v_{entrada}^2}{2 * g} = \frac{0.52^2}{2 * 9.8} = 0.01381$$

Resumen:

Tabla 67

Energía Cinética en el punto de entrada del disipador de caída de doble salida

Canal con caída con Doble entrada			
Energía cinética Inicial	Ek inicial	0.01381	m
Velocidad Inicial	V inicial	0.52	m/s

Nota. Elaboración Propia

Dando como resultado las velocidades promedio de los puntos de salida 1 y 2 de la simulación:

$$V1 = 1.07 \text{ m/s.}$$

$$V2 = 1.21 \text{ m/s}$$

Cálculo de la energía cinética de la salida:

Considerando que el disipador presenta 2 salidas se debe de considerar el principio de conservación de energía.

$$E_{K,salida} = \frac{Q_{salida\ 1}}{Q_{entrada}} * \frac{1}{2} * v_{salida\ 1}^2 + \frac{Q_{salida\ 2}}{Q_{entrada}} * \frac{1}{2} * v_{salida\ 2}^2$$

Se consideran los caudales de cada una de las salidas:

Salida 1: 4.04 Salida 2: 6.72 Entrada: 10.76

$$E_{K,salida} = \frac{4.04}{10.76} * \frac{1.07^2}{2 * 9.8} + \frac{6.72}{10.76} * \frac{1.21^2}{2 * 9.8} = 0.0686$$

Resumen:

Tabla 68

Energía Cinética en el punto de salida del dissipador de caída de doble salida

Canal con Caída con Doble salida			
Energía cinética Final	Ek final	0.0686	m
Velocidad Final	V final	1.07 y 1.21	m/s

Nota. Elaboración Propia

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total.

$$E_{T\text{ entrada}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 3.3 + 0.09 + \frac{0.52^2}{2 * 9.8} = 3.40381$$

$$E_{T\text{ salida}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0 + 0.05 + 0.0686 = 0.11860$$

Diferencia de energía total

$$\Delta E_T = E_{T\text{ entrada}} - E_{T\text{ salida}} = 3.40381 - 0.11860 = 3.28521$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total

$$\eta = \frac{3.40381 - 0.11860}{3.40381} * 100\% = 96.52 \%$$

A pesar de que las velocidades en las dos salidas del dissipador de doble salida resultan mayores que la velocidad de entrada, este comportamiento no contradice la función hidráulica del dissipador. La aparente inconsistencia se explica porque la energía cinética no es el único componente relevante del balance energético: debido a la caída vertical de 3.3 metros, la energía potencial del flujo disminuye de manera significativa y se transforma parcialmente en energía cinética, mientras que el sistema disipa una fracción considerable mediante turbulencia, aireación, mezclado, recirculación interna en la poza y pérdidas locales asociadas a la bifurcación. El tirante reducido en las salidas produce una aceleración natural del flujo, lo cual incrementa la velocidad sin implicar una ganancia neta de energía del sistema. Cuando se evalúa la energía total, se evidencia que la energía específica de salida es significativamente menor que la de entrada, confirmando que el dissipador cumple su función hidráulica.

Además, aunque la eficiencia cinética obtenida sea prácticamente 0 %, esto no representa un desempeño deficiente del sistema; simplemente indica que la energía asociada a la velocidad es la que más se transforma y disipa durante el proceso. En contraste, la eficiencia potencial calculada en 96.52 % demuestra que la caída vertical domina el intercambio energético y que el nivel piezométrico aguas abajo disminuye casi en la misma proporción prevista por la geometría del dissipador. Esta diferencia entre ambas eficiencias es coherente con el número de Froude, que muestra un flujo supercrítico en el ingreso y un flujo más controlado en las salidas, donde la disipación se produce principalmente mediante turbulencia, mezclado y recirculación, sin requerir una reducción proporcional de la velocidad.

Figura 193

Número de froude del dissipador con caída de doble salida en perfil longitudinal



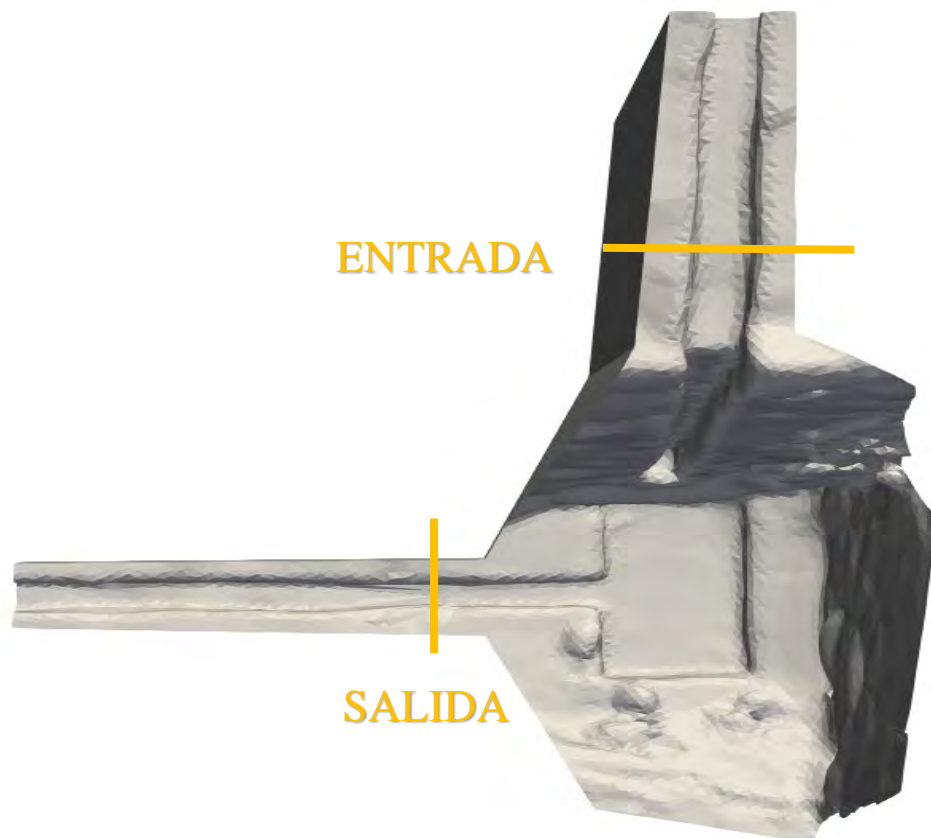
Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

4.2.1.5. Resultados de la disipación en el canal con caída con entrada recta y salida lateral

En la configuración con entrada recta y salida lateral, se identificaron las secciones representativas de ingreso y descarga, considerando tanto el trazado geométrico como las condiciones del flujo en estado permanente obtenidas mediante simulación calibrada. El flujo, al ingresar de manera frontal, conserva una alta componente de velocidad en el eje longitudinal, la cual se ve interrumpida abruptamente por el desvío lateral a la salida.

Figura 194

Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

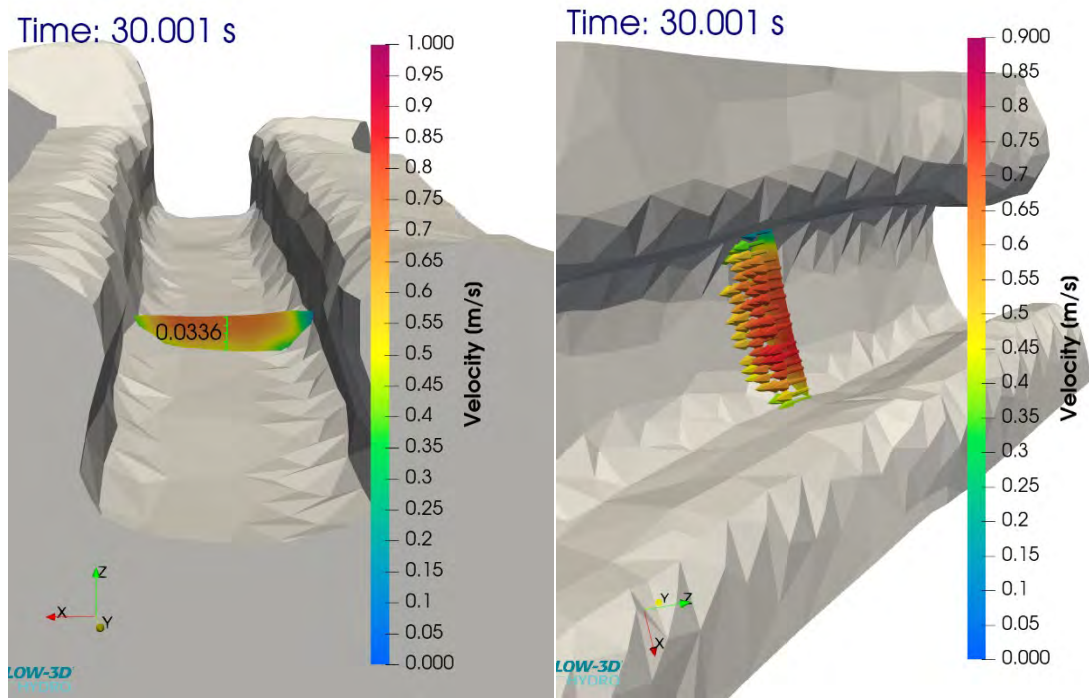


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Análisis del punto de entrada:

Figura 195

Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del disipador de caída con entrada recta y salida lateral



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.59 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K, \text{entrada}} = \frac{v_{\text{entrada}}^2}{2 * g} = \frac{0.59^2}{2 * 9.8} = 0.01778$$

Resumen:

Tabla 69

Energía Cinética en el punto de entrada del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

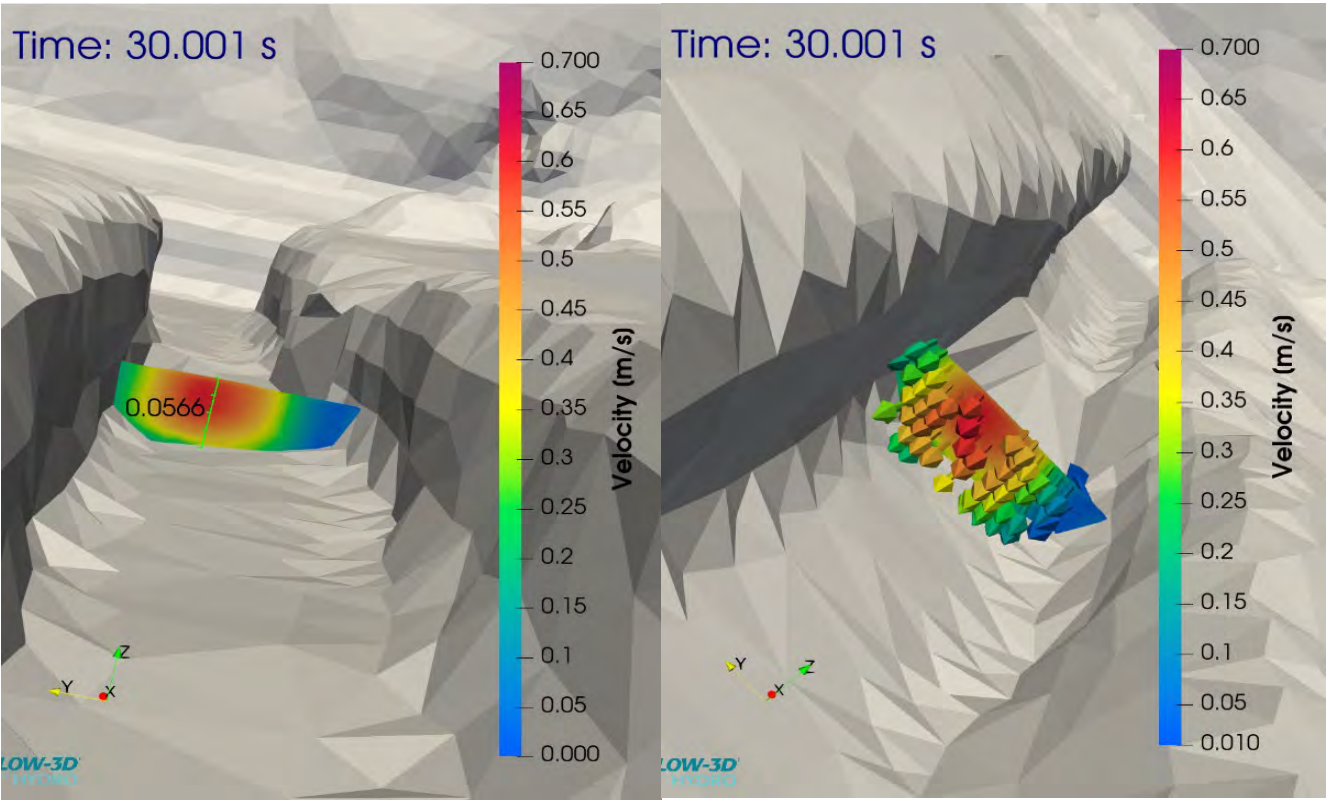
Canal con caída con entrada recta y salida lateral - Entrada			
Energía Cinetica Inicial	Ek inicial	0.01778	m
Velocidad Inicial	V inicial	0.59	m/s

Nota. Elaboración Propia

Análisis del punto de salida:

Figura 196

Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de salida de la simulación:

$$V = 0.33 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K, \text{salida}} = \frac{v_{\text{salida}}^2}{2 * g} = \frac{0.33^2}{2 * 9.8} = 0.00556$$

Resumen:

Tabla 70

Energía Cinética en el punto de salida del dissipador de caída con entrada recta y salida lateral

Canal con caída con entrada recta y salida lateral - Salida			
Energía Cinética Final	Ek final	0.00556	m
Velocidad Final	V final	0.33	m/s

Nota. Elaboración Propia

Diferencia de energía cinética:

$$\Delta E_k = E_{k \text{ entrada}} - E_{k \text{ salida}} = 0.01778 - 0.00556 = 0.01222$$

Cálculo de la eficiencia

$$\eta = \frac{0.01778 - 0.00556}{0.01778} * 100\% = 68.72\%$$

El análisis hidráulico determinó que la caída con entrada recta y salida lateral logra una disipación de energía del 68.72%. Esta pérdida energética refleja el efecto que tiene la estructura rocosa colocada antes de la poza de disipación.

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total.

$$E_{T\text{ entrada}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 3.5 + 0.031 + \frac{0.59^2}{2 * 9.8} = 3.54778$$

$$E_{T\text{ salida}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0 + 0.057 + \frac{0.33^2}{2 * 9.8} = 0.06256$$

Diferencia de energía total

$$\Delta E_T = E_{T\text{ entrada}} - E_{T\text{ salida}} = 3.54778 - 0.06256 = 3.48522$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total

$$\eta = \frac{3.54778 - 0.06256}{3.54778} * 100\% = 98.24 \%$$

Los resultados obtenidos muestran que la disipación de energía en la estructura analizada presenta una diferencia notable entre la componente cinética y la energía total del flujo. La variación de energía cinética es de 0.01222, mientras que la variación de energía total alcanza 3.48522; esto significa que aproximadamente el 0.35% de la energía disipada corresponde a energía cinética y el 99.65% se asocia a la componente potencial vinculada al desnivel hidráulico. La eficiencia de disipación de energía cinética obtenida es de 68.72%, mientras que la eficiencia calculada para la energía total alcanza un valor de 98.24%. En este sentido, nuestro análisis se centrará en la disipación de energía cinética, dado que es la componente que se manifiesta de forma directa y observable en el comportamiento hidráulico del Complejo Arqueológico de Tipón.

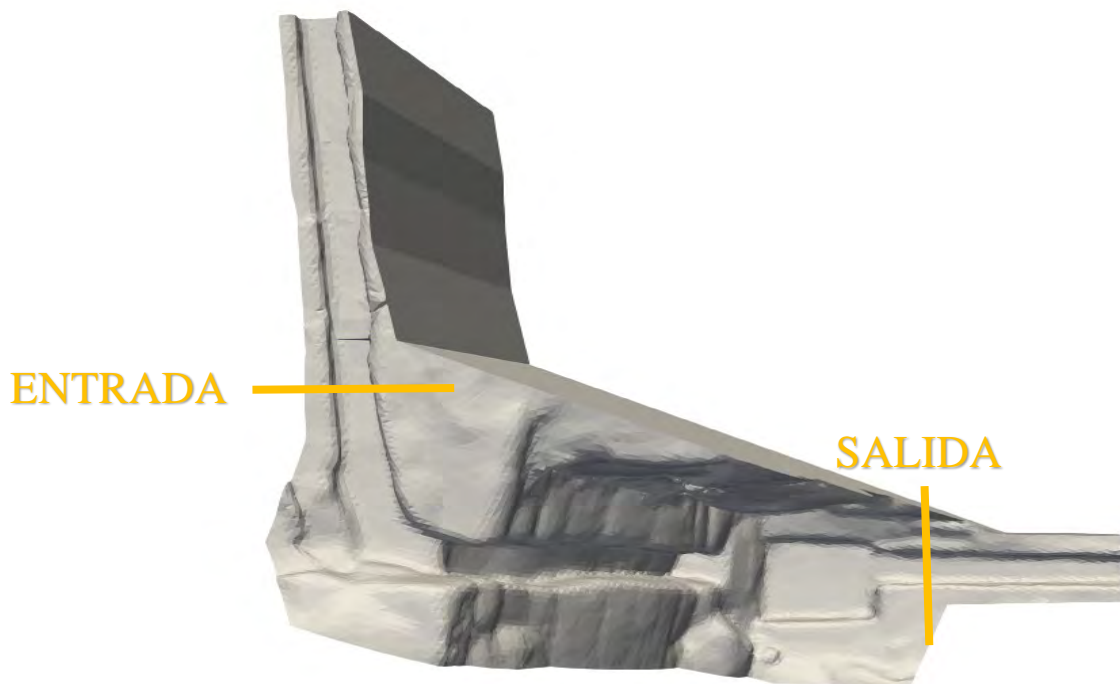
Por ende el **resultado final** de la eficiencia de disipación de energía cinética es de **68.72%**.

4.2.1.6. Resultados de la disipación en el canal con caída con entrada lateral y salida recta

En la configuración con entrada lateral y salida recta, se identificaron las secciones representativas de ingreso y descarga, considerando tanto el trazado geométrico como las condiciones del flujo en estado permanente obtenidas mediante simulación calibrada. El flujo, al ingresar de manera lateral antes de la caída se observa una pequeña recirculación en el borde opuesto, igualmente conserva una alta componente de velocidad. La presencia de una entrada no alineada demostró contribuir de forma relevante a la generación de turbulencia y, por ende, a la eficiencia hidráulica del sistema.

Figura 197

Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador de caída con entrada lateral y salida recta

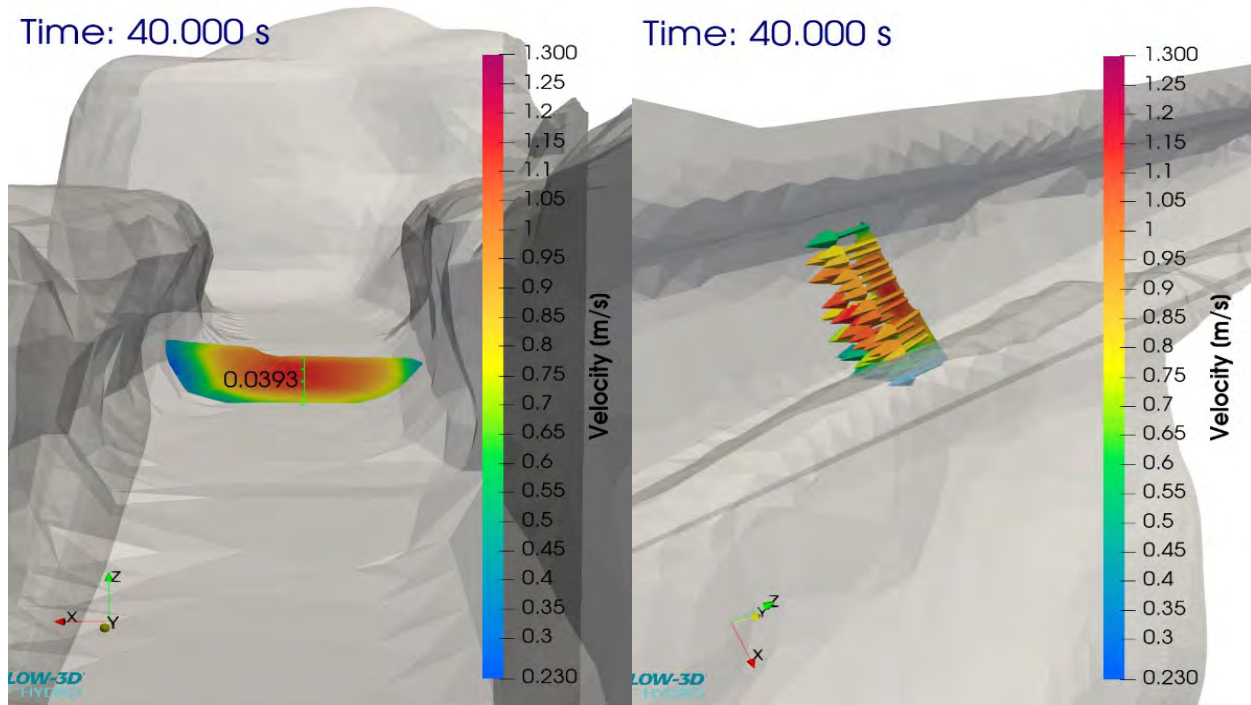


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Análisis en el punto de entrada:

Figura 198

Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.81 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K,entrada} = \frac{v_{entrada}^2}{2 * g} = \frac{0.81^2}{2 * 9.8} = 0.03351$$

Resumen:

Tabla 71

Energía Cinética en el punto de entrada del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta

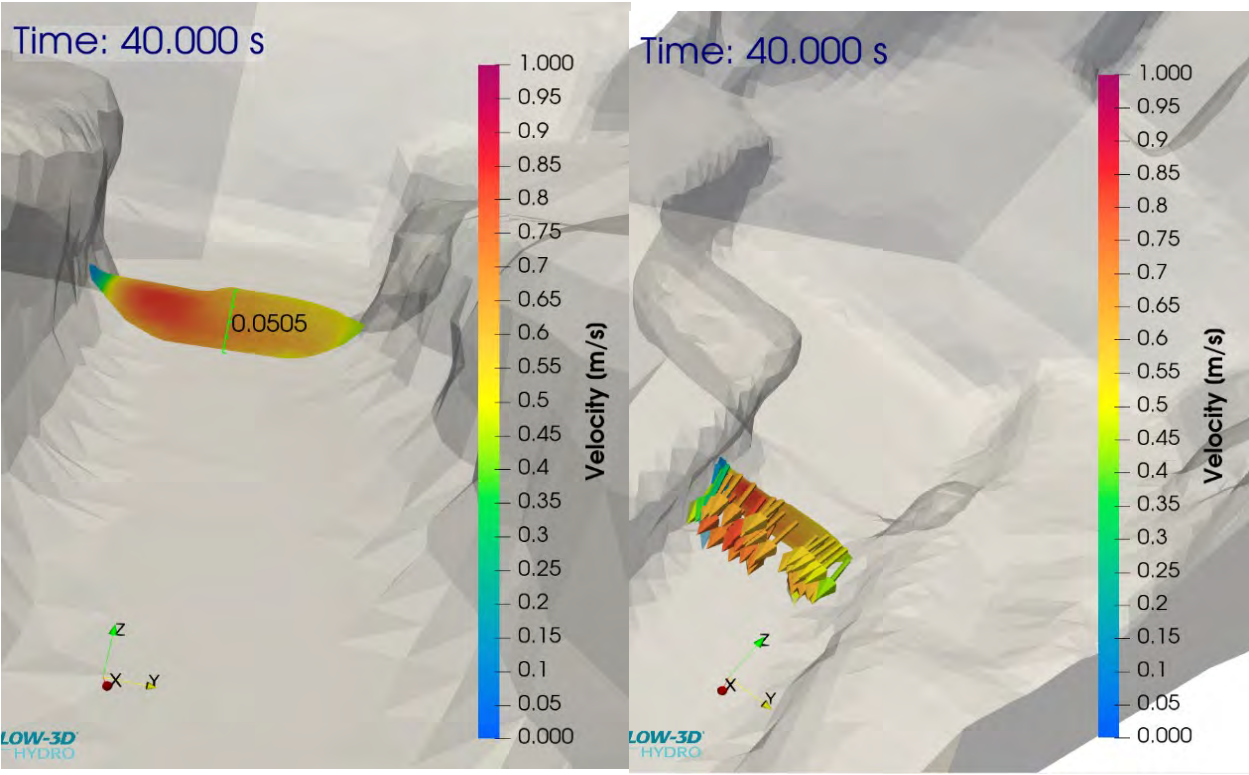
Canal con caída con entrada lateral y salida recta - Entrada			
Energía Cinetica Inicial	Ek inicial	0.03351	m
Velocidad Inicial	V inicial	0.81	m/s

Nota. Elaboración Propia

 Análisis en el punto de salida:

Figura 199

Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.62 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K, \text{salida}} = \frac{v_{\text{salida}}^2}{2 * g} = \frac{0.62^2}{2 * 9.8} = 0.01963$$

Resumen:

Tabla 72

Energía Cinética en el punto de salida del dissipador con caída con entrada lateral y salida recta

Canal con caída con entrada lateral y salida recta - Salida			
Energía Cinética Final	Ek final	0.01963	m
Velocidad Final	V final	0.62	m/s

Nota. Elaboración Propia

Diferencia de energía cinética:

$$\Delta E_k = E_{k \text{ entrada}} - E_{k \text{ salida}} = 0.03351 - 0.01963 = 0.01388$$

Cálculo de la eficiencia

$$\eta = \frac{0.03351 - 0.01963}{0.03351} * 100\% = 41.41\%$$

El análisis hidráulico determinó que la caída con entrada lateral y salida recta logra una disipación de energía del 41.41%. Esta pérdida energética refleja el efecto que tiene la estructura rocosa colocada antes de la poza de disipación.

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total.

$$E_{T\text{ entrada}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 3.37 + 0.03 + \frac{0.81^2}{2 * 9.8} = 3.42851$$

$$E_{T\text{ salida}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0 + 0.04 + \frac{0.62^2}{2 * 9.8} = 0.05963$$

Diferencia de energía total

$$\Delta E_T = E_{T\text{ entrada}} - E_{T\text{ salida}} = 3.42851 - 0.05963 = 3.36888$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total

$$\eta = \frac{3.42851 - 0.05963}{3.42851} * 100\% = 98.26 \%$$

Los resultados obtenidos muestran que la disipación de energía en la estructura analizada presenta una diferencia notable entre la componente cinética y la energía total del flujo. La variación de energía cinética es de 0.01388, mientras que la variación de energía total alcanza 3.36888; esto significa que aproximadamente el 0.41% de la energía disipada corresponde a energía cinética y el 99.59% se asocia a la componente potencial vinculada al desnivel hidráulico. La eficiencia de disipación de energía cinética obtenida es de 41.41%, mientras que la eficiencia calculada para la energía total alcanza un valor de 98.26%. En este sentido, nuestro análisis se centrará en la disipación de energía cinética, dado que es la componente que se manifiesta de forma directa y observable en el comportamiento hidráulico del Complejo Arqueológico de Tipón.

Por ende el **resultado final** de la eficiencia de disipación de energía cinética es de **41.41%**.

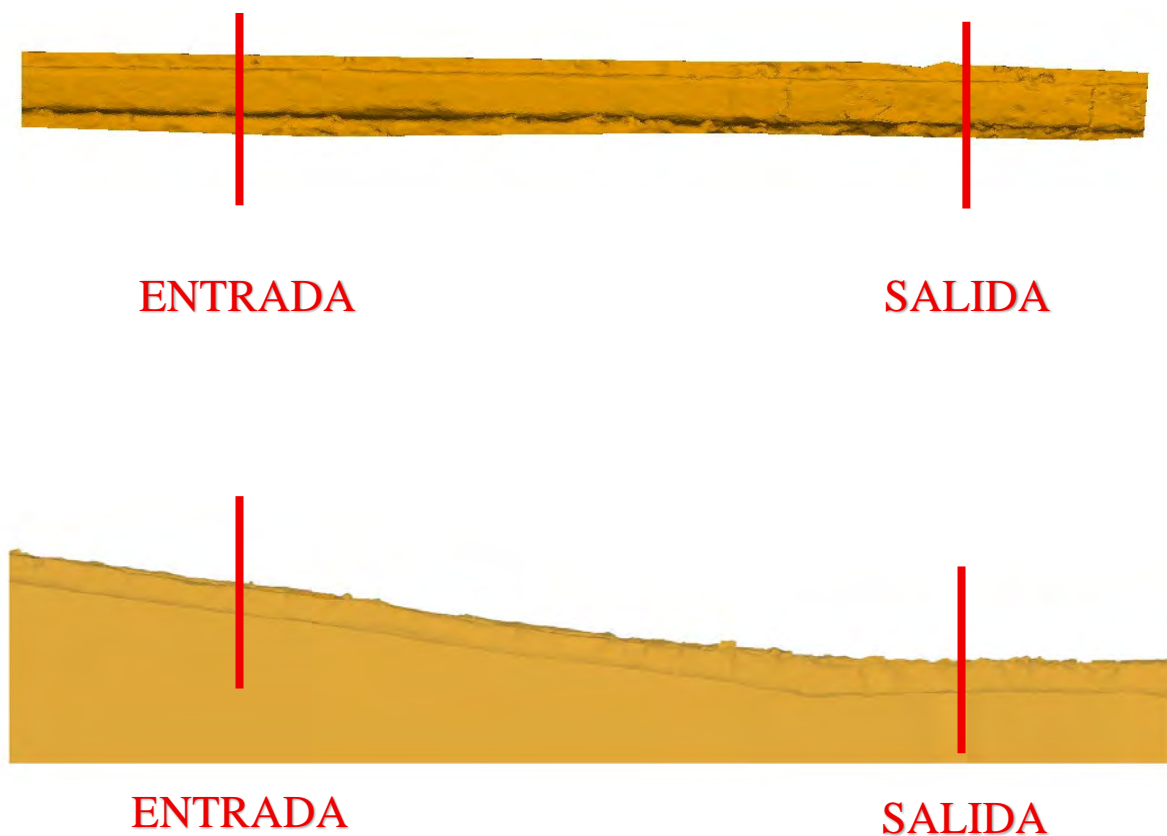
4.2.1.7. Disipación en el canal con pendiente invertida

Para el caso del canal con pendiente invertida, se seleccionaron y evaluaron los puntos de entrada y salida según los criterios definidos durante la etapa de calibración de la simulación. La geometría propia del cambio de pendiente entre dos secciones continuas de un canal representa una pérdida de disipación.

Puntos de toma de datos de velocidades

Figura 200

Ubicación de puntos de entrada y salida para el análisis de eficiencia de disipación del disipador con pendiente invertida

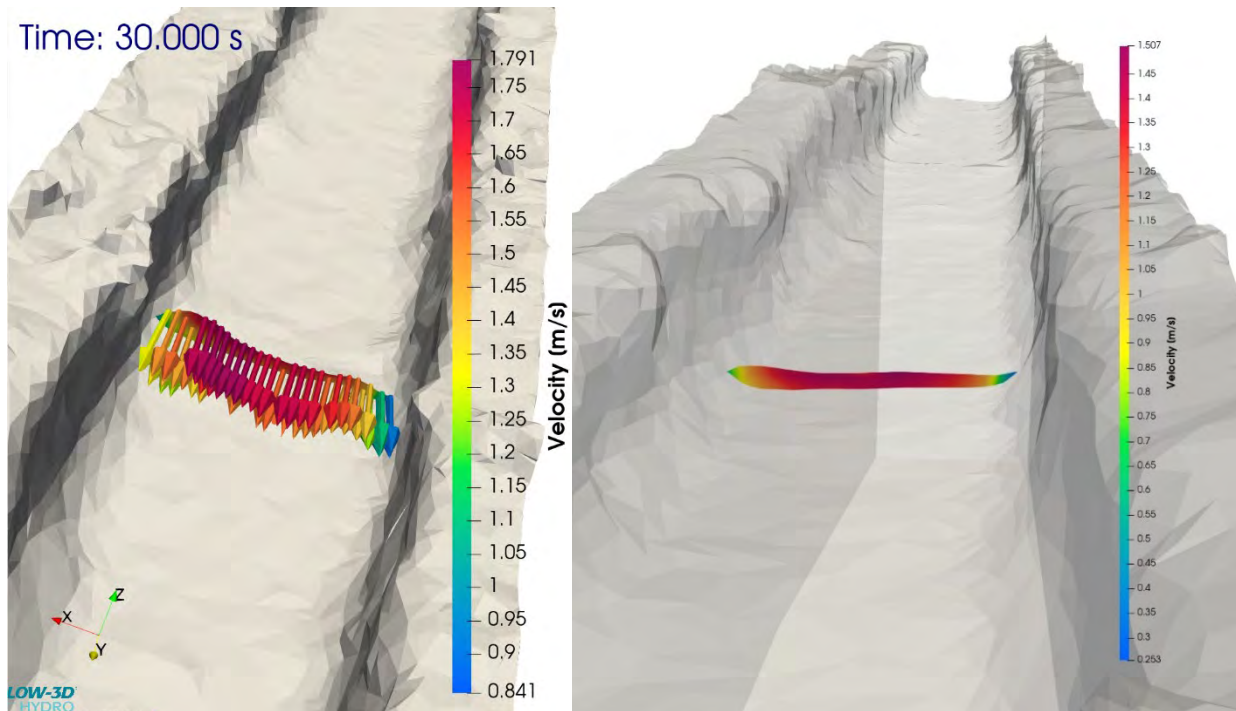


Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Análisis en el punto de entrada:

Figura 201

Corte transversal en el punto de entrada para el cálculo de la eficiencia del dissipador con pendiente invertida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 1.27 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la entrada:

$$E_{K,entrada} = \frac{v_{entrada}^2}{2 * g} = \frac{1.27^2}{2 * 9.8} = 0.08237$$

Resumen:

Tabla 73

Energía Cinética en el punto de entrada del dissipador con pendiente invertida

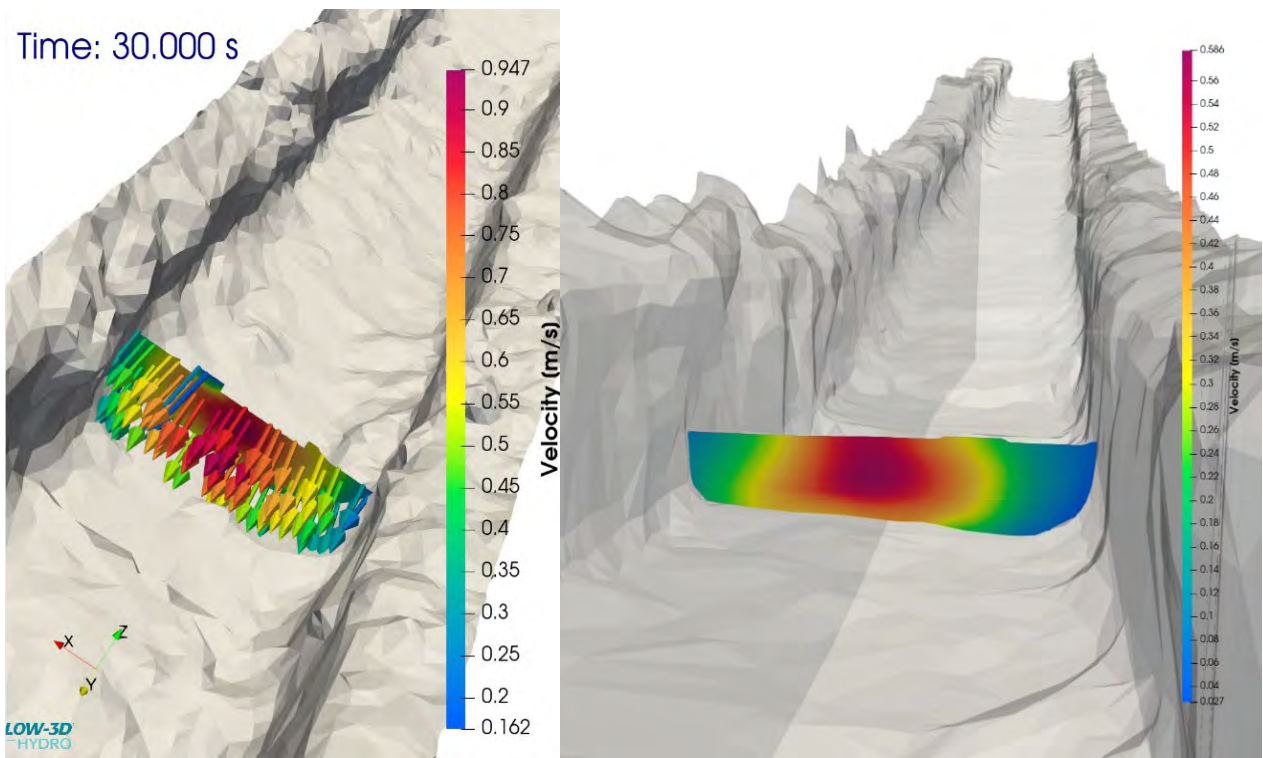
Canal con pendiente invertida - Entrada			
Energía Cinetica Inicial	Ek inicial	0.08237	J/s
Velocidad Inicial	V inicial	1.27	m/s

Nota. Elaboración Propia

Análisis en el punto de salida:

Figura 202

Corte transversal en el punto de salida para el cálculo de la eficiencia del dissipador con pendiente invertida



Nota. Elaboración propia con FLOW-3D® POST (Versión 2024R1).

Dando como resultado la velocidad promedio del punto de entrada de la simulación:

$$V = 0.31 \text{ m/s.}$$

Cálculo de la energía cinética de la salida:

$$E_{K, \text{salida}} = \frac{v_{\text{salida}}^2}{2 * g} = \frac{0.31^2}{2 * 9.8} = 0.00491$$

Resumen:

Tabla 74

Energía Cinética en el punto de salida del dissipador con pendiente invertida

Canal con pendiente invertida - Salida			
Energía Cinética Final	Ek final	0.00491	J/s
Velocidad Final	V final	0.31	m/s

Nota. Elaboración Propia

Diferencia de energía cinética:

$$\Delta E_k = E_{k \text{ entrada}} - E_{k \text{ salida}} = 0.08237 - 0.00491 = 0.07747$$

Cálculo de la eficiencia

$$\eta = \frac{0.08237 - 0.00491}{0.08237} * 100\% = 94.04 \%$$

Se determinó que la estructura hidráulica en forma de canal de pendiente invertida disipa aproximadamente el 94.04% de la energía cinética del flujo, lo cual representa una eficiencia hidráulica significativa en la reducción de la energía inicial del agua debido al cambio repentino de pendiente.

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total.

$$E_{T\text{ entrada}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0.59 + 0.022 + \frac{1.27^2}{2 * 9.8} = 0.69437$$

$$E_{T\text{ salida}} = z + y + \frac{V^2}{2 * g} = 0 + 0.061 + \frac{0.31^2}{2 * 9.8} = 0.06591$$

Diferencia de energía total

$$\Delta E_T = E_{T\text{ entrada}} - E_{T\text{ salida}} = 0.69437 - 0.06591 = 0.62847$$

Cálculo de la eficiencia de disipación de energía total

$$\eta = \frac{0.69437 - 0.06591}{0.69437} * 100\% = 90.51 \%$$

Los resultados obtenidos muestran que la disipación de energía en la estructura analizada presenta una diferencia notable entre la componente cinética y la energía total del flujo. La variación de energía cinética es de 0.07747, mientras que la variación de energía total alcanza 0.62847; esto significa que aproximadamente el 12.33% de la energía disipada corresponde a energía cinética y el 87.67% se asocia a la componente potencial vinculada al desnivel hidráulico. La eficiencia de disipación de energía cinética obtenida es de 94.04%, mientras que la eficiencia calculada para la energía total alcanza un valor de 90.51%. En este sentido, nuestro análisis se centrará en la disipación de energía cinética, dado que es la componente que se manifiesta de forma directa y observable en el comportamiento hidráulico del Complejo Arqueológico de Tipón.

Por ende el **resultado final** de la eficiencia de disipación de energía cinética es de **94.04%**.

CAPITULO V: DISCUSIÓN

Se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones hidrodinámicas realizadas en FLOW-3D para cada una de las estructuras hidráulicas modeladas. El análisis se basa en la determinación de la eficiencia de disipación de energía cinética a través de los registros de velocidad en las secciones de entrada y salida, considerando el comportamiento del flujo, las zonas de recirculación y los cambios de régimen hidráulico.

5.1. Descripción de los hallazgos más relevantes y significativos

El análisis hidrodinámico tridimensional realizado en las estructuras hidráulicas incas analizadas del complejo arqueológico de Tipón permitió determinar los valores de eficiencia de disipación de energía cinética y comprender los mecanismos de pérdida de energía presentes en cada una de ellas. Las simulaciones se desarrollaron bajo condiciones controladas, considerando un flujo permanente de agua a 14 °C considerando caudales medidos en cada estructura y aplicando el modelo de turbulencia RNG $k-\epsilon$, reconocido por su capacidad para representar regímenes con alta variación de energía. Los resultados evidencian diferencias notables en el comportamiento hidráulico de las estructuras, determinadas principalmente por su geometría, y características de transición del flujo.

5.1.1. *Canal en forma de S*

En el canal en forma de “S”, se obtuvo una eficiencia de disipación de energía del 61.56%. Esta configuración se caracteriza por la presencia de tres curvas amplias que inducen una trayectoria sinuosa del flujo, generando efectos de recirculación y turbulencia a lo largo del tramo.

Durante la simulación se observó una leve transformación del régimen de flujo en las zonas curvas, con una transición de condiciones subcríticas a supercríticas, especialmente en la parte media de la estructura. Este cambio de régimen provocó una reducción progresiva de la energía

cinética a medida que el flujo atravesaba las curvas, lo cual se traduce en una pérdida de energía hidráulica.

Las curvas tienen una inclinación promedio de 90° , lo que favorece la desviación del flujo sin provocar estancamientos significativos. Se evidenció una ligera acumulación de agua en las zonas posteriores a las curvas, aunque sin generar retrocesos marcados. La rugosidad se modeló de forma homogénea en todo el sistema, representando las condiciones observadas en campo. La geometría del canal, sumada a su pendiente y rugosidad, permite una disipación de energía relativamente eficiente, aunque no tan marcada como en configuraciones más abruptas.

5.1.2. Canal en forma de T

El canal en forma de “T” presentó una eficiencia de disipación de energía del 55.07%. En esta geometría, el flujo ingresa por uno de los brazos horizontales de la “T”, mientras que el otro brazo está cerrado, generando una zona de recirculación. El flujo finalmente se encamina por el vástago vertical de la “T”, donde se produce la mayor disipación.

En la entrada del canal se observó un tirante corto y alta velocidad, mientras que en la salida se incrementó el tirante y disminuyó la velocidad, lo que indica una pérdida efectiva de energía cinética. La zona del brazo cerrado funcionó como un amortiguador hidráulico, albergando una región de recirculación sin burbujeo, donde parte del flujo se desacelera y reorienta.

La bifurcación ocurre en un ángulo de 90° , y la rugosidad fue modelada de forma constante en toda la estructura. Se identificó que el ancho del canal a la entrada era ligeramente mayor que en el tramo de salida, sin que esto implicara un estrangulamiento marcado. Esta estructura funcionó adecuadamente como disipador debido al choque del flujo contra la zona cerrada y su posterior

reorganización hacia el vástago de salida, lo que genera una pérdida significativa de energía, aunque no tan eficiente como en geometrías más irregulares o de mayor longitud.

5.1.3. Canal en forma de Zigzag

En el caso del canal en forma de zigzag, la eficiencia de disipación de energía obtenida fue del 39.51%, la más baja entre las estructuras analizadas. Esta geometría se caracteriza por su trazado sinusoidal con múltiples quiebres a lo largo del recorrido del flujo. Aunque la estructura presenta un total de siete quiebres, el análisis se centró en el tramo comprendido desde el ingreso hasta el quinto cambio de dirección, debido a que a partir de ese punto la pendiente se incrementa considerablemente, ocasionando un aumento en la velocidad del flujo que contrarresta el efecto disipador acumulado en la sección previa.

Durante la simulación, no se evidenció un cambio de régimen significativo dentro del canal, manteniéndose un comportamiento hidráulico relativamente uniforme a lo largo del tramo evaluado. No obstante, en cada uno de los quiebres se observó una leve generación de turbulencia localizada, efecto atribuido al cambio en la dirección del flujo, sin llegar a producir zonas de estancamiento o recirculación. Las pérdidas de energía registradas se asociaron principalmente a estas pequeñas turbulencias.

La geometría del canal presenta quiebres con ángulos similares y un ancho constante en todo su recorrido, lo cual otorga continuidad a la trayectoria del flujo. La rugosidad del sistema se modeló de manera homogénea en toda la estructura, en concordancia con las observaciones realizadas en campo. Si bien el trazado sinuoso introduce cierta perturbación en la trayectoria del flujo, esta no fue suficiente para inducir una disipación significativa, lo cual explicaría la baja eficiencia obtenida en comparación con otras configuraciones más abruptas o con mecanismos de choque hidráulico más marcados.

5.1.4. Caída con doble salida

En el caso de la estructura tipo caída con doble salida, se identificó una configuración vertical del flujo, la cual conduce el agua desde un canal de ingreso hacia una poza de disipación mediante una caída libre. La geometría de esta estructura incluye una bifurcación en la salida: el flujo, luego de impactar contra una formación rocosa ubicada estratégicamente al pie de la caída, se distribuye hacia dos salidas laterales, cada una con pendiente y comportamiento hidráulico ligeramente distinto. La estructura rocosa cumple un rol fundamental, pues genera una zona de alta turbulencia y favorece la disipación inicial de la energía cinética antes de que el flujo alcance la poza.

Durante la simulación se evidenció un cambio significativo en la naturaleza de la energía del flujo. A la entrada del sistema, el flujo presentó un tirante aproximado de 10 cm y una velocidad reducida, con una energía cinética de aproximadamente $0.13 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Tras la caída y el impacto, el tirante disminuyó a valores entre 2 y 3 cm en las salidas, mientras que la energía cinética aumentó hasta alrededor de $0.63 \text{ m}^2/\text{s}^2$. Este comportamiento indica una transformación clara de energía potencial en cinética, esperada en caídas verticales, pero que, gracias a la interacción con la estructura rocosa y la geometría de la poza, permitió una considerable disipación de la energía total.

El análisis del régimen de flujo mediante cortes transversales y el cálculo del número de Froude reflejó un paso de régimen subcrítico en la entrada a supercrítico en la zona de caída y salidas, confirmando una aceleración del flujo y una disminución del tirante. En la distribución del flujo hacia las salidas, si bien ambas presentan características geométricas similares, una de ellas cuenta con una pendiente mayor, generando una velocidad de egreso más alta y un tirante inferior.

Esta diferencia favorece un patrón de salida asimétrico, pero no compromete la función disipadora de la estructura.

La rugosidad se mantuvo constante en todo el sistema, y no se registraron zonas extensas de estancamiento, aunque se apreció una leve recirculación previa a la bifurcación del flujo. En conjunto, esta estructura mostró un comportamiento eficiente en la disipación de energía, aprovechando la interacción del flujo con la geometría y los elementos rocosos para reducir la energía antes de su salida.

5.1.5. *Caída con entrada recta y salida lateral*

En esta estructura, el flujo ingresa por un canal recto que desemboca en una caída vertical, conformando geométricamente una disposición en forma de "L". Antes de llegar a la poza de disipación, el chorro impacta directamente sobre una estructura rocosa dispuesta frente a la caída. Esta condición provoca un cambio abrupto en la trayectoria del flujo, generando zonas de alta presión en el punto de impacto y una posterior recirculación parcial en la poza, observable en la simulación numérica.

La energía cinética inicial, calculada a partir de las condiciones de entrada, se estimó en aproximadamente 0.01778 m. En contraste, en la zona de salida del canal, el valor disminuyó y la energía cinética de salida llegó a 0.00556m. Lo que representa una eficiencia de disipación del 68.72 %. Este resultado evidencia una reducción significativa de la energía cinética, atribuida tanto a las pérdidas por impacto con la roca como al proceso de remanso y disipación en la poza.

El análisis del régimen hidráulico evidenció que el flujo se encontraba en condición supercrítica antes de la caída, con un número de Froude mayor a 1. Esta condición se mantuvo hasta el impacto con la roca dispuesta antes de la poza, donde el chorro altamente energético generó

un patrón turbulento localizado. Posteriormente, al ingresar a la poza, el flujo experimentó una desaceleración progresiva que favoreció la disipación de energía. Aunque se observaron pequeñas zonas de turbulencia secundaria, no se identificaron estancamientos ni recirculaciones importantes, indicando una disipación eficiente y un restablecimiento ordenado del flujo hacia el canal de salida.

5.1.6. *Caída con entrada lateral y salida recta*

En este caso, el canal de ingreso presenta una configuración lateral respecto a la caída, formando un ángulo aproximado de 90 grados antes de llegar al borde de la caída. A diferencia del caso anterior, existe un pequeño tramo recto de aproximadamente 10 cm entre el giro del canal y el inicio del descenso vertical, lo que permite un alineamiento parcial del flujo antes de impactar en la roca dispuesta en la base de la caída, previo a la poza de disipación.

La energía cinética del flujo en la sección de entrada fue de aproximadamente 0.03351 m. A la salida, luego del paso por la poza, este valor se redujo a 0.01963 m. Lo que corresponde a una eficiencia de disipación del 41.41 %. Este resultado evidencia una disipación menos efectiva en comparación con la caída con salida lateral, lo cual puede atribuirse a la menor estabilidad del chorro durante su caída vertical y a un impacto más centrado sobre la estructura rocosa.

El análisis del régimen hidráulico indica que el flujo mantiene un comportamiento subcrítico en la zona de entrada, pero la aceleración generada por el corto tramo recto y la caída libre genera una zona localizada de mayor velocidad en el impacto con la roca. Posteriormente, en la poza, el flujo desacelera notablemente, contribuyendo al proceso de disipación. No se observaron zonas de estancamiento ni remolinos persistentes, lo que sugiere un flujo relativamente limpio y eficiente en su reacomodación hacia el canal de salida.

5.1.7. Canal con pendiente invertida

El canal con pendiente invertida presentó una eficiencia de disipación de energía del 94.04%, valor que, aunque elevado, está relacionado con el comportamiento hidráulico particular de esta estructura hidráulica. En esta estructura se evidenció una significativa transformación de la energía potencial en cinética hacia la parte media del tramo, seguida de una disipación súbita por la formación de un régimen supercrítico con caída abrupta. Este fenómeno generó una marcada pérdida de energía total, justificada por el gran salto de velocidad y el aumento significativa del tirante en esa sección específica.

El canal presenta una trayectoria recta con una pendiente moderada, sin curvas acentuadas. A lo largo de su extensión, no se identificaron cambios sustanciales en el régimen de flujo. La geometría no generó zonas de estancamiento ni recirculación, y la rugosidad se consideró constante en toda la longitud del canal. A pesar de no haberse producido estrangulamientos significativos, la pérdida de energía se relaciona directamente con el efecto del desnivel en la pendiente, que concentró el cambio de energía en una región puntual. Este comportamiento sugiere que la eficiencia calculada no responde únicamente a mecanismos de disipación tradicionales, sino también a un fenómeno de conversión energética altamente localizado.

5.2. Limitaciones del estudio

Como en toda investigación de campo y modelamiento numérico, los resultados obtenidos en el presente estudio estuvieron condicionados por diversas limitaciones técnicas, logísticas y conceptuales. Si bien estos aspectos no comprometen la validez general del análisis, es importante reconocerlos para definir el alcance real de los hallazgos y orientar futuras investigaciones hacia una mayor precisión experimental y numérica.

5.2.1. Limitaciones en la toma de datos de campo

Durante la fase de levantamiento de información en el complejo arqueológico de Tipón, se presentaron ciertas restricciones operativas. Los horarios disponibles para la toma de datos debieron realizarse en horas muy tempranas de la mañana, debido al ingreso posterior de turistas que dificultaban la instalación de los equipos y la estabilidad de las mediciones. Asimismo, en el levantamiento LiDAR se requirió realizar dos vuelos, ya que en la primera se obtuvo una nube de puntos con una separación promedio de 50 cm, lo cual no representaba adecuadamente el relieve superficial. En la segunda campaña se logró mejorar la resolución a aproximadamente 5 cm por punto. Sin embargo, el agua presente en los canales produjo reflexiones en los rayos láser, lo que obligó a secar los tramos por un periodo de 2 a 3 horas y complementar el registro con un escaneo manual y mediante el sensor LiDAR del iPhone.

Durante la medición de velocidades con el método LSPIV también se presentaron limitaciones, pues los resultados iniciales no mostraban una identificación clara del patrón de flujo. Para mejorar la precisión de las mediciones, fue necesario incorporar aserrín como marcador superficial durante la filmación de los videos. De igual manera, la medición de caudales con vertederos presentó dificultades debido a las secciones irregulares de los canales, lo que redujo la exactitud de los valores obtenidos.

5.2.2. Limitaciones técnicas del modelamiento numérico

En el modelamiento 3D realizado con el programa FLOW-3D, se presentaron restricciones relacionadas con la representación geométrica y el procesamiento computacional. El modelo sólido reconstruido a partir de la nube de puntos no reproduce con exactitud absoluta la superficie real, ya que la distancia promedio entre puntos fue de aproximadamente 1 cm. Además, al aumentar la cantidad de celdas por encima de los 10 millones, el tiempo de cómputo

se volvía excesivo y la simulación se tornaba inestable, por lo que fue necesario limitar la resolución espacial a cerca de 3 millones de celdas.

En cuanto al modelo de turbulencia, se evaluaron distintas alternativas; sin embargo, el modelo RNG $k-\varepsilon$ ofreció los resultados más estables y coherentes, por lo que se adoptó para todas las simulaciones. No obstante, este modelo no permite representar micro fluctuaciones ni efectos locales asociados a la porosidad de las piedras, ya que el programa considera las superficies sólidas como impermeables y no porosas.

Para la validación de los resultados, las velocidades obtenidas numéricamente se compararon con las medidas en campo en puntos de entrada y salida de los disipadores. Aunque los valores fueron consistentes en tendencia, pequeñas diferencias se atribuyen a las simplificaciones geométricas y a las condiciones ideales consideradas en el modelo.

5.2.3. Limitaciones conceptuales y de alcance

El estudio se centró exclusivamente en siete estructuras representativas del conjunto hidráulico de Tipón, seleccionadas por su relevancia y por evidenciar a simple vista una pérdida apreciable de velocidad. En ese sentido, los resultados no abarcan la totalidad del sistema hidráulico ni las posibles variaciones estacionales del caudal. Asimismo, las simulaciones asumieron propiedades físicas constantes del fluido temperatura, viscosidad y densidad, sin considerar cambios debidos a variaciones térmicas o de concentración. Tampoco se incluyeron factores externos como erosión, infiltración o crecimiento biológico, que podrían modificar la eficiencia hidráulica en condiciones reales a largo plazo.

A pesar de las limitaciones descritas, los resultados obtenidos en este trabajo constituyen una aproximación robusta y técnicamente válida al comportamiento hidráulico de las estructuras

incas de Tipón. Las restricciones metodológicas y numéricas no impidieron identificar las tendencias generales de disipación de energía ni comprender los mecanismos físicos involucrados.

5.3. Comparación crítica con la literatura existente

Los resultados obtenidos en la presente investigación son coherentes con estudios previos relacionados con la disipación de energía en estructuras hidráulicas, los cuales indican que geometrías con cambios bruscos de dirección, pendientes invertidas y elementos generadores de turbulencia producen mayores pérdidas de energía. En este sentido, las estructuras hidráulicas incas analizadas evidencian un conocimiento empírico avanzado del comportamiento del flujo, comparable con criterios empleados en el diseño hidráulico moderno. Este contraste permite evaluar la coherencia de los hallazgos, así como identificar las diferencias metodológicas y geométricas que explican las variaciones en la eficiencia de disipación obtenida.

Por otro lado, la influencia de la resolución de malla en los resultados numéricos analizada por López Fry & Chung Benites (2023) respalda parcialmente las limitaciones encontradas durante el presente trabajo, donde el incremento del número de celdas por encima de los 10 millones dificultó la estabilidad del cálculo numérico. Dicho estudio demuestra que un tamaño de celda inadecuado puede generar pérdidas de masa y errores acumulativos en la simulación, lo cual concuerda con las observaciones obtenidas al ajustar el tamaño de malla en FLOW-3D durante el modelamiento de las estructuras incas.

En cuanto a los estudios comparativos sobre estructuras modernas, (Díaz Vilca & Morales Pino, 2021) evaluaron vertederos tipo Creager con geometrías similares a las empleadas en Tipón, reportando valores de disipación de energía cercanos al 70 %, lo cual se encuentra por debajo de los valores obtenidos en el presente estudio. Esta diferencia podría explicarse por la rugosidad

natural de las superficies líticas incas, que favorece la generación de turbulencia y la pérdida de energía cinética del flujo.

Asimismo, Cantaro Fabian (2024), al analizar aliviaderos escalonados, concluyó que una disposición variable de los escalones mejora la eficiencia del proceso de disipación. Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos en las estructuras tipo caída de Tipón, donde las irregularidades geométricas generaron mayores pérdidas de energía y una notable reducción de la velocidad a la salida.

De manera complementaria, los resultados de Ayala Rojas et al. (2020), quien evaluó disipadores hidráulicos fabricados con diferentes materiales y obtuvo una eficiencia promedio del 20 %, contrastan significativamente con las eficiencias superiores al 50 % alcanzadas en las estructuras incas modeladas. Este contraste refuerza la hipótesis de que las características geométricas y constructivas del material pétreo utilizado en Tipón desempeñan un papel fundamental en la disipación energética, superando el efecto del material en sí.

Finalmente, los estudios de Ortloff (2022) sobre el complejo arqueológico de Tipón, centrados en la descripción de las secciones de canal y las obras hidráulicas, aportan un marco interpretativo histórico que coincide con los resultados del presente estudio. El comportamiento hidráulico evidenciado en las simulaciones confirma la funcionalidad y el diseño eficiente de los canales incas, tal como lo propuso Ortloff en su caracterización del sistema.

En primer lugar, los resultados obtenidos en la estructura con pendiente invertida, que alcanzó una eficiencia de disipación del 94.04 %, evidencian un comportamiento hidráulico altamente eficiente. Si bien este valor es numéricamente similar al 94 % de eficiencia general reportado por ARANGOITIA VALDIVIA (2022) para el sistema de riego de Tipón, ambos

resultados responden a escalas de análisis diferentes. En el caso del presente estudio, la eficiencia corresponde al proceso local de disipación de energía cinética dentro de una estructura específica, mientras que en la investigación de Arangoitía, dicho valor representa la eficiencia global del sistema hidráulico ancestral. No obstante, la coincidencia de ambos porcentajes refleja la solidez del diseño hidráulico inca y la funcionalidad integral de sus obras, en las cuales la pérdida de energía cumple un papel esencial en la regulación del flujo.

En síntesis, los resultados obtenidos en el presente trabajo muestran una alta coherencia con las investigaciones previas, particularmente en lo referente a la eficiencia global del sistema y la influencia de la geometría sobre la disipación de energía. Las discrepancias observadas se explican principalmente por las diferencias en la metodología de modelamiento, la escala de análisis y las condiciones de superficie, lo que refuerza el valor del modelamiento tridimensional como herramienta para el estudio cuantitativo de la hidráulica incaica.

5.4. Implicancias del estudio

Los resultados obtenidos en la presente investigación tienen implicancias relevantes tanto desde el punto de vista hidráulico como científico y patrimonial. En primer lugar, la aplicación del modelamiento tridimensional mediante FLOW-3D demostró ser una herramienta eficaz para analizar el comportamiento del flujo en estructuras hidráulicas patrimoniales, permitiendo cuantificar la eficiencia de disipación de energía cinética con un nivel de precisión no alcanzable mediante métodos tradicionales. Esta aproximación metodológica evidencia el potencial del modelamiento computacional para la revalorización y conservación de la ingeniería hidráulica incaica, brindando una base técnica que puede complementar los estudios arqueológicos y estructurales existentes.

Desde el punto de vista hidráulico, los resultados confirman que las geometrías irregulares y las transiciones abruptas presentes en las estructuras incas desempeñan un papel fundamental en la disipación de energía, generando flujos turbulentos que reducen significativamente la velocidad del agua. Este hallazgo respalda la hipótesis de que las obras de Tipón no solo tenían fines funcionales de transporte y distribución, sino también de control energético y estabilidad hidráulica, aspecto que refleja una comprensión avanzada de la dinámica de los fluidos por parte de los constructores incas.

A nivel científico y metodológico, el estudio aporta evidencia sobre la validez del uso combinado de tecnologías modernas como el escaneo LiDAR, la medición de velocidad mediante LSPIV y el modelamiento CFD tridimensional, aplicadas al análisis de estructuras históricas. La integración de estas herramientas no solo permite obtener resultados más representativos del comportamiento real del flujo, sino que también abre la posibilidad de replicar la metodología en otros sitios arqueológicos con características similares.

Finalmente, desde una perspectiva práctica y patrimonial, los resultados pueden servir como base técnica para futuros proyectos de conservación, restauración o puesta en valor de sistemas hidráulicos prehispánicos, proporcionando criterios para el diseño de obras modernas inspiradas en la eficiencia de las estructuras incas. El estudio demuestra que la ingeniería ancestral de Tipón no solo mantiene su relevancia histórica, sino que también ofrece lecciones aplicables a la hidráulica contemporánea, especialmente en lo relativo al manejo del flujo y la disipación de energía en entornos naturales.

CONCLUSIONES

1. La integración de tecnologías avanzadas como el escaneo LiDAR, el análisis de velocidad superficial mediante LSPIV y la simulación numérica con FLOW-3D permitió evaluar de manera precisa la eficiencia hidráulica de las estructuras incas del Complejo Arqueológico de Tipón. Los resultados confirman que estos sistemas poseen una significativa capacidad de disipación de energía cinética, evidenciando el dominio técnico y conocimiento hidráulico alcanzado por los antiguos constructores. A pesar de las mínimas discrepancias entre los métodos aplicados, las eficiencias obtenidas en campo y en simulación confirman que las estructuras incaicas fueron diseñadas con criterios hidráulicos avanzados, orientados al control del flujo y la estabilidad del sistema.

2. Los resultados evidencian que la geometría influye de manera determinante en la eficiencia de disipación de energía cinética, ya que controla la intensidad de la turbulencia, la recirculación y el modo en que el flujo interactúa con el fondo y las paredes. El canal con pendiente invertida, aunque es un trazado recto y no una caída, presenta la mayor eficiencia (94.04 %) gracias al impacto pronunciado del flujo contra el fondo, lo que genera turbulencias concentradas y pérdidas elevadas. En las estructuras de caída, la salida lateral (68.72 %) induce un cambio brusco de dirección que favorece la formación de remolinos y zonas recirculatorias amplias, mientras que la salida recta obtiene una eficiencia menor (41.41 %) debido a la alineación del chorro, que reduce la generación de turbulencia. En los trazados curvos, la disipación depende más de la fricción progresiva y de la turbulencia distribuida, registrándose eficiencias diferenciadas: 61.56 % en el canal tipo S, 55.07 % en el tipo T y 39.51 % en el zigzag. En conjunto, se demuestra que la geometría condiciona el mecanismo dominante de pérdida de energía impacto, desvío lateral o fricción acumulativa, determinando así el desempeño hidráulico de cada estructura.

3. Las propiedades físicas del fluido, consideradas a una temperatura promedio de 14 °C, fueron fundamentales para garantizar la precisión de las simulaciones hidrodinámicas. La utilización de valores reales de densidad (ρ) y viscosidad dinámica (μ) permitió reproducir con fidelidad las condiciones hidráulicas observadas en campo, logrando una correspondencia adecuada entre los modelos numéricos y la realidad experimental. Esta concordancia refuerza la validez y confiabilidad del modelamiento computacional realizado, confirmando que el agua en las estructuras hidráulicas de Tipón mantiene propiedades propias de un régimen natural

4. El análisis de las características del flujo, representadas por la velocidad, el caudal y el tirante hidráulico, evidenció una influencia directa y positiva sobre la eficiencia de disipación de energía cinética en las estructuras analizadas. Se observó que el incremento del caudal y la velocidad generan mayores niveles de turbulencia y mezcla, favoreciendo la pérdida de energía cinética del flujo. Asimismo, el tirante hidráulico mostró un comportamiento regulador que contribuye a mantener la estabilidad del flujo y a optimizar la disipación en las zonas críticas del canal. Estos resultados confirman la hipótesis planteada, demostrando que las características del flujo son determinantes en la eficiencia hidráulica de los disipadores incas.

5. La eficiencia de disipación de energía cinética varía claramente entre los diferentes tipos de estructuras hidráulicas analizadas, debido a las diferencias en su geometría y en la forma en que cada una modifica el comportamiento del flujo. El canal con pendiente invertida alcanza la eficiencia más alta del conjunto, ya que su inclinación negativa intensifica el impacto del flujo contra el fondo y genera turbulencias concentradas. En contraste, las estructuras de caída presentan niveles intermedios, dependiendo del tipo de salida y del grado de recirculación que inducen. Por su parte, las geometrías curvas muestran una disipación más progresiva y estable, basada en fricción acumulada y turbulencias moderadas distribuidas a lo largo del trazado. Esta variación

evidencia que cada estructura responde a una función hidráulica adaptada a su entorno, optimizando la regulación del flujo según la topografía y las condiciones operativas. En conjunto, los resultados muestran que los constructores incas seleccionaron intencionalmente configuraciones capaces de controlar la energía excedente de manera eficiente, demostrando un notable entendimiento del comportamiento del agua.

RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar utilizando el modelo RNG de turbulencia en simulaciones de estructuras con geometrías complejas, dado que este modelo ha demostrado buen rendimiento en la representación de patrones de flujo con alta presencia de vórtices y recirculaciones.

Para estudios posteriores, sería conveniente considerar escenarios de caudal variable o condiciones de flujo extremo (como crecidas), ya que permitirían evaluar el comportamiento de las estructuras en contextos más exigentes.

La metodología aplicada en esta investigación que combina levantamiento con LiDAR, medición con LSPIV y modelación en FLOW-3D ha demostrado ser eficaz y replicable. No obstante, se evidenció que el LSPIV no siempre resulta completamente confiable, ya que sus resultados pueden variar significativamente en función de las condiciones de campo y de la calidad del registro superficial, por lo que se recomienda aplicarlo con cautela y en conjunto con otras técnicas de validación. Por ello, se sugiere la aplicación de esta metodología en otros sitios arqueológicos con características similares, para estudios académicos.

Se recomienda emplear una malla lo suficientemente fina para capturar con precisión el comportamiento del flujo en los disipadores; no obstante, tamaños de celda muy pequeños aumentan el tiempo y la carga de cómputo. Por ello, es conveniente elegir una resolución equilibrada mediante un análisis de sensibilidad, considerando también la capacidad del procesador disponible.

Finalmente, se recomienda considerar las soluciones hidráulicas tradicionales andinas como una fuente de inspiración para el diseño de infraestructuras modernas que busquen eficiencia energética, sostenibilidad y adaptación al entorno geográfico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, J.-D. (1995). *Computational-Fluid-Dynamics-the-Basics-With-Applications*.
- Arangoitia Valdivia, V. M. (2020). *EFICIENCIA HÍDRICA DEL SISTEMA DE RIEGO INKA DE TIPÓN, CONSIDERANDO LA CONCEPCIÓN DEL SISTEMA Y SUS OBRAS DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA CUSCO - 2020*. UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO.
- Ayala Rojas, L. E., Franco Rojas, A., & Padilla González, E. A. (2020). Evaluación de la eficiencia en disipación de energía en estructuras hidráulicas construidas con gaviones y material reciclado (neumático usado) mediante modelamiento físico a escala reducida. *Revista UIS Ingenierías*, 19(1), 143-154. <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n1-2020014>
- Biggs, H., Smart, G., Doyle, M., Eickelberg, N., Aberle, J., Randall, M., & Detert, M. (2023). *Surface Velocity to Depth-Averaged Velocity—A Review of Methods to Estimate Alpha and Remaining Challenges*.
- Blazek, J. (2015). *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: PRINCIPLES AND APPLICATIONS 3RD ED.*
- Cantaro Fabian, G. Q. (2024). *Evaluación de la disipación de energía en aliviaderos escalonados de sección constante y variable mediante modelación numérica tridimensional*.
- Carreño Collatupa, R., & Hostnig, R. (2023). MANIFESTACIONES RUPESTRES EN EL PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN (CUSCO-PERÚ). *Revista Cuadernos de Arte Prehistórico*, 16, 1-47. <https://doi.org/10.58210/rcdap146>
- Chen, G., Xiong, Q., Morris, P. J., Paterson, E. G., Sergeev, A., & Wang, Y.-C. (2014). OpenFOAM for Computational Fluid Dynamics. *Notices of the American Mathematical Society*, 61(4), 354. <https://doi.org/10.1090/noti1095>

- Collazo, F. S., & Araya, W. S. (2019). Modelo Hidráulico para Redes de Canales con Estructuras Hidráulicas. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v32i7.4267>
- Díaz Vilca, E. P., & Morales Pino, J. M. (2021). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE VERTEDEROS DE PERFIL TIPO CREAGER EMPLEANDO MODELOS NUMÉRICOS CFD EN OPENFOAM*.
- Domingo, A. M. (2011). *Apuntes de Mecánica de Fluidos*.
- Erwin Horacio Barahona Ochoa. (2020). *Optimización del comportamiento de estructuras hidráulicas complejas a través*.
- Fajardo Calderón, S. (2010). *Velocimetría por Imágenes de Partículas: caracterización del comportamiento de un flujo de agua*.
- Ferziger, J. H., & Peric, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*.
- Flow Science Inc. (2023). FLOW-3D Theory Manual. Flow Science, Inc. En 2023.
- Gencel, Z. (2016). Concepto de energía específica como herramienta útil en diseño de canales. En *Pueblo Cont* (Vol. 27).
- Granados, B., Calixto J, C. N., Carlos Alexis Bonilla Granados, M., & Sergio Andrés Bonilla Granados, I. (2022). *DIAGNOSIS AND MITIGATION RECOMMENDATIONS OF PATHOLOGIES IN THE HYDRAULIC STRUCTURES OF WATER SUPPLY SYSTEMS IN NORTE DE SANTANDER*. <https://orcid.org/0000-0003-1558-2042>
- Hirt, C. W., & Sicilian, J. M. (1985). *A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes*.
- Hernández Sampieri, R. (2014). Metodología de la Investigación (McGraw-Hill, Ed.; 6.a ed., Vol. 2). México.

Ishizawa, Y. B. (2022). Aplicação de Velocimetria por Imagem de Partículas em Larga Escala (LSPIV) para Medição de vazão em canal aberto utilizando plataforma «open-source».

Loaiza Schiaffino, C. H. “*Sistemas de Disipación Hidráulica en Canales Incas*” VII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA CIVIL, PIURA, 1990

López de Mesa, D., Cuervo, A. F., & Balaguera, A. (2023). Modelación numérica del flujo rasante en un canal escalonado con curvas verticales. *Tecnología y ciencias del agua*, 01-65.

<https://doi.org/10.24850/j-tyca-16-2-3>

López Fry, A. A., & Chung Benites, J. W. (2023). *Estudio experimental de un vertedero triangular y modelación con OpenFOAM*. <http://hdl.handle.net/10757/671014>

Luis, J., & Yaselga, G. (2016). *ESTUDIO DE MODELO MATEMÁTICO DE POZOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA HIDRÁULICA CON SISTEMA MULTICHORRO PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MENCIÓN HIDRÁULICA*.

Mccarthy, J. H., & Taylor, D. W. (1985). *The Proceedings Fourth International Conference on NUMERICAL SHIP HYDRODYNAMICS* Edited by.

Morales, M., David, F., & Martín, M. (2017). *CARACTERIZACIÓN DE PROPIEDADES REOLÓGICAS DE FLUIDOS PARA APLICACIONES EN LIFT MEDIANTE TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL*.

Moreno, E. (29 de septiembre de 2019). *Metodología de investigación, pautas para hacer Tesis*.

Obtenido de tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com: <https://tesis-investigacion-cientifica.blogspot.com>

Ñaupas, H., Valdivia, M., Palacios, J., & Romero, H. (2018). *Metodología de la Investigación (5ta edición ed)*. Bogotá: Ediciones de la U.

- Orjuela Montoya, E., & Lozano Basto, V. (2023). *APLICACIÓN PARA CÁLCULO DE RELACIONES GEOMÉTRICAS EN SECCIONES HIDRÁULICAS DE CANALES ABIERTOS*. 352-357. <https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2022-52>
- Ortiz Sánchez, Y., Serrano, E. G. F., & Básicos, F. (1972). *Mecánica de Fluidos y Bombas*.
- Ortloff, C. R. (2022a). Inka Hydraulic Engineering at the Tipón Royal Compound (Perú). *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010102>
- Ospina, C., & Jhoanna, E. (2021). *LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE DRONES* (Vol. 8, Número 2). <https://orcid.org/0000-0001-5214-8187>.
- Patankar, S. V. (1980). *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*.
- PINZÓN MONROY, E. M. (2019). *PROCESAMIENTO DE LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS EN SECTORES RURALES POR MEDIO DE DRONE*.
- Pope, S. B. (2000). *Turbulent Flows*.
- Rafael Pardo Gómez. (s. f.). *Disipadores de energía-Parte I: el salto hidráulico: Vol. XXXIX* (Número 3).
- Saloma Valdivia. (2014). “*ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LAS PRINCIPALES OBRAS DENTRO DEL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN*” ING. CIVIL-UAC.
- Sotelo Ávila, G. (2002). *Hidráulica de canales*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Suárez, Á., Dutra, M., Monteiro, M., & Marti, A. C. (2021). El embrollo de Bernoulli: una investigación sobre las concepciones alternativas de los estudiantes en dinámica de fluidos. *Modelling in Science Education and Learning*, 14(2), 17. <https://doi.org/10.4995/msel.2021.14835>

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition*. www.pearsoned.co.uk/versteeg

Vicente Medina Iglesias, A. B. P. R. J. M. (s. f.). *La turbulencia en los flujos en canales con lechos vegetados. Estudio teórico experimental con aplicación del “Acoustic doppler Velocimeter” ADV*.

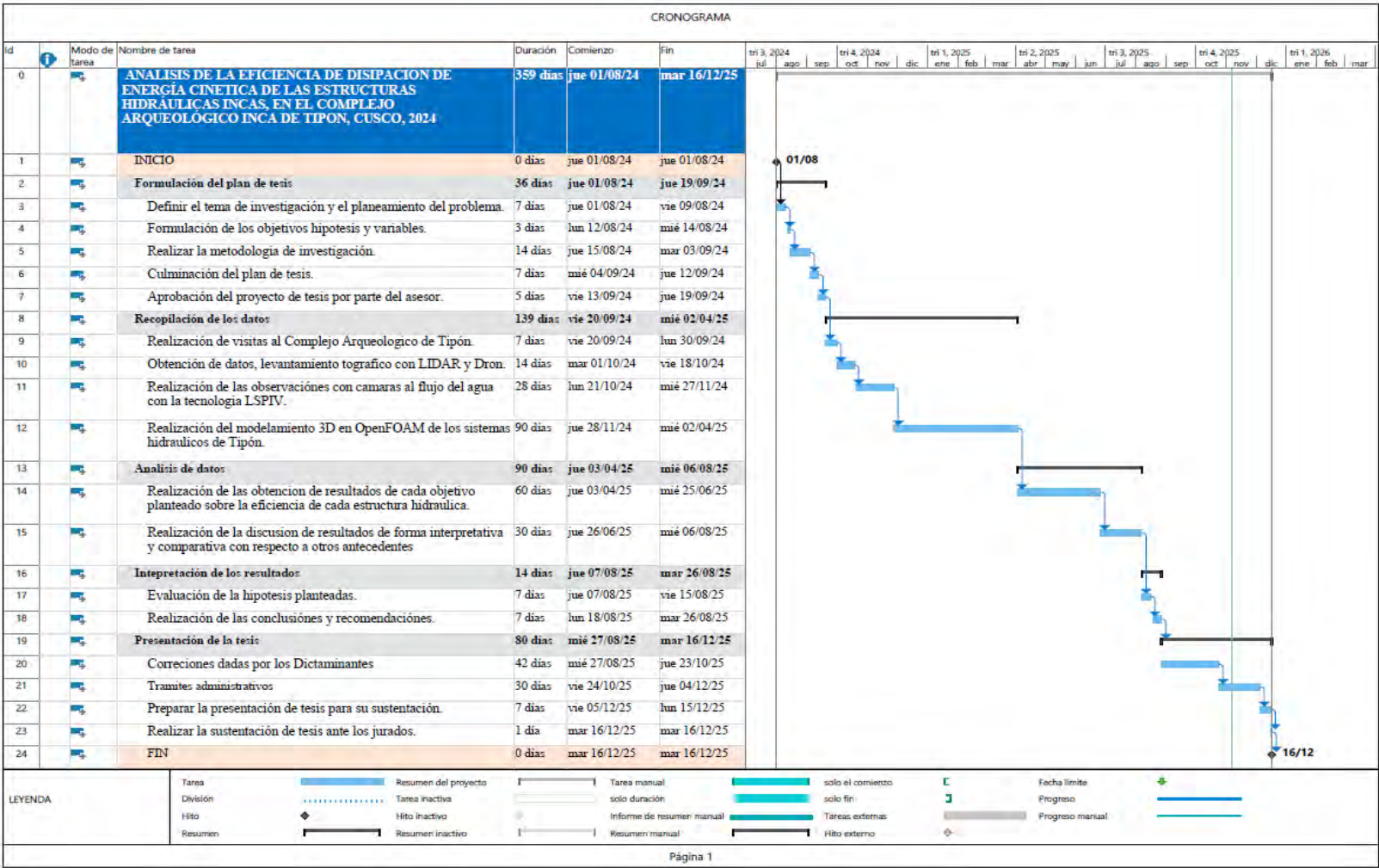
White, F. M. (2011). *FLUID MECHANICS 7TH ED*.

Wilcox, D. C.. (2010). *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries.

Yakhot, V., Thangam, S., Gatski, T. B., Orszag, S. A., Speziale, C. G., & Thangarntt, S. (1991). *DEVELOPMENT OF TURBULENCE MODELS FOR SHEAR FLOWS BY A DOUBLE EXPANSION TECHNIQUE DEVELOPMENT OF TURBULENCE MODELS FOR SHEAR FLOWS BY A DOUBLE EXPANSION TECHNIQUE*.

ANEXOS

Cronograma



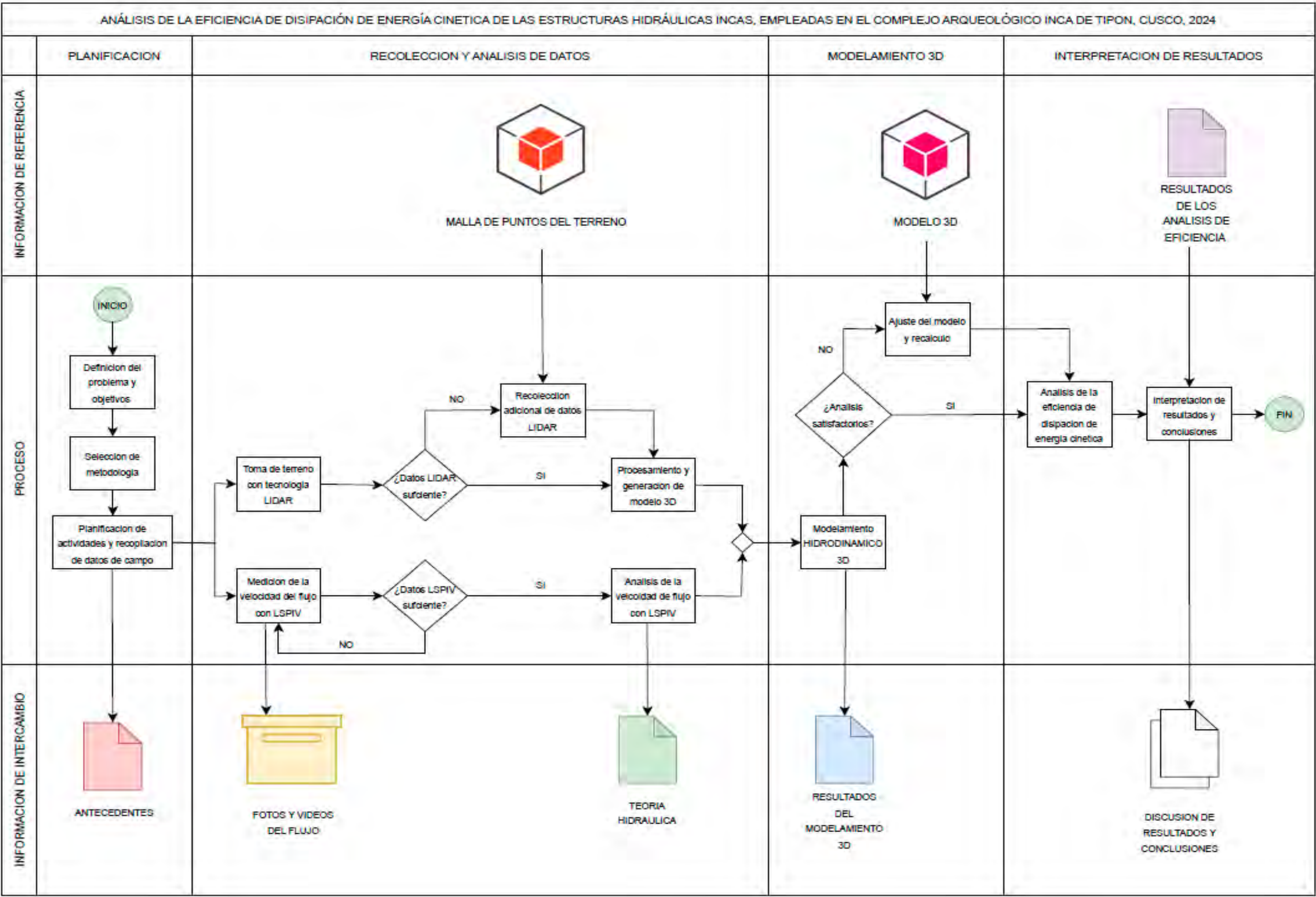
Presupuesto

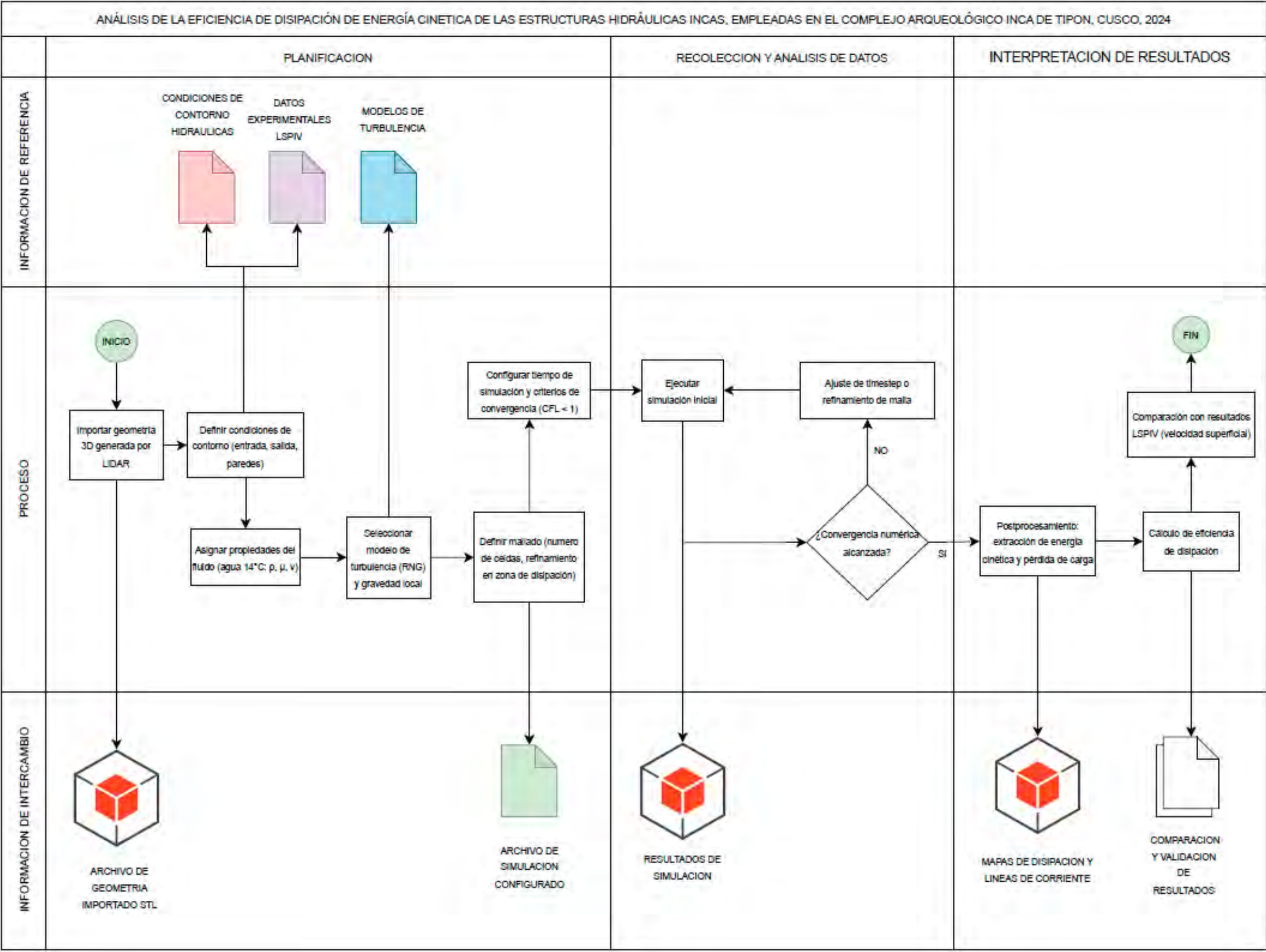
PRESUPUESTO	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO	TOTAL
Servicios:			S/ 3,200.00	S/ 3,200.00
Movilidad hacia el Complejo Arqueológico de Tipón	und	1	S/ 400.00	S/ 400.00
Alquiler de equipo LIDAR	und	1	S/ 2,500.00	S/ 2,500.00
Alquiler del Dron	und	1	S/ 200.00	S/ 200.00
Cámaras para el LSPIV	und	1	S/ 100.00	S/ 100.00
Recursos humanos:			S/ 600.00	S/ 600.00
Gastos de software	und	1	S/ 500.00	S/ 500.00
Gastos de capacitación del software	und	1	S/ 100.00	S/ 100.00
Recursos materiales:			S/ 900.00	S/ 900.00
Materiales de campo.	und	1	S/ 300.00	S/ 300.00
Equipos de Oficina	und	1	S/ 100.00	S/ 100.00
Impresiones	und	1	S/ 500.00	S/ 500.00
Contingencia (10% del presupuesto total)			S/ 470.00	S/ 470.00
TOTAL			S/ 5,170.00	S/ 5,170.00

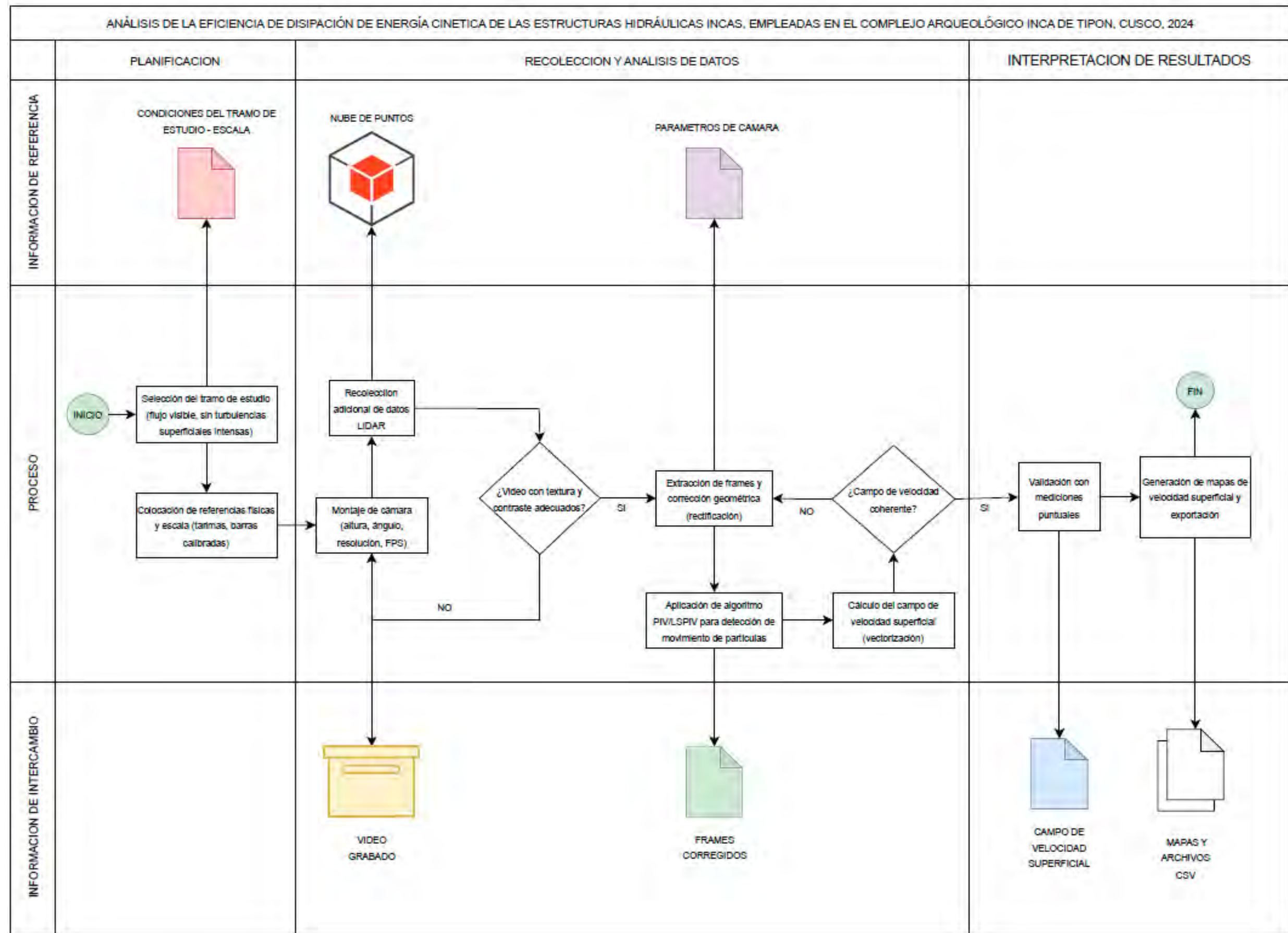
Matriz de consistencia

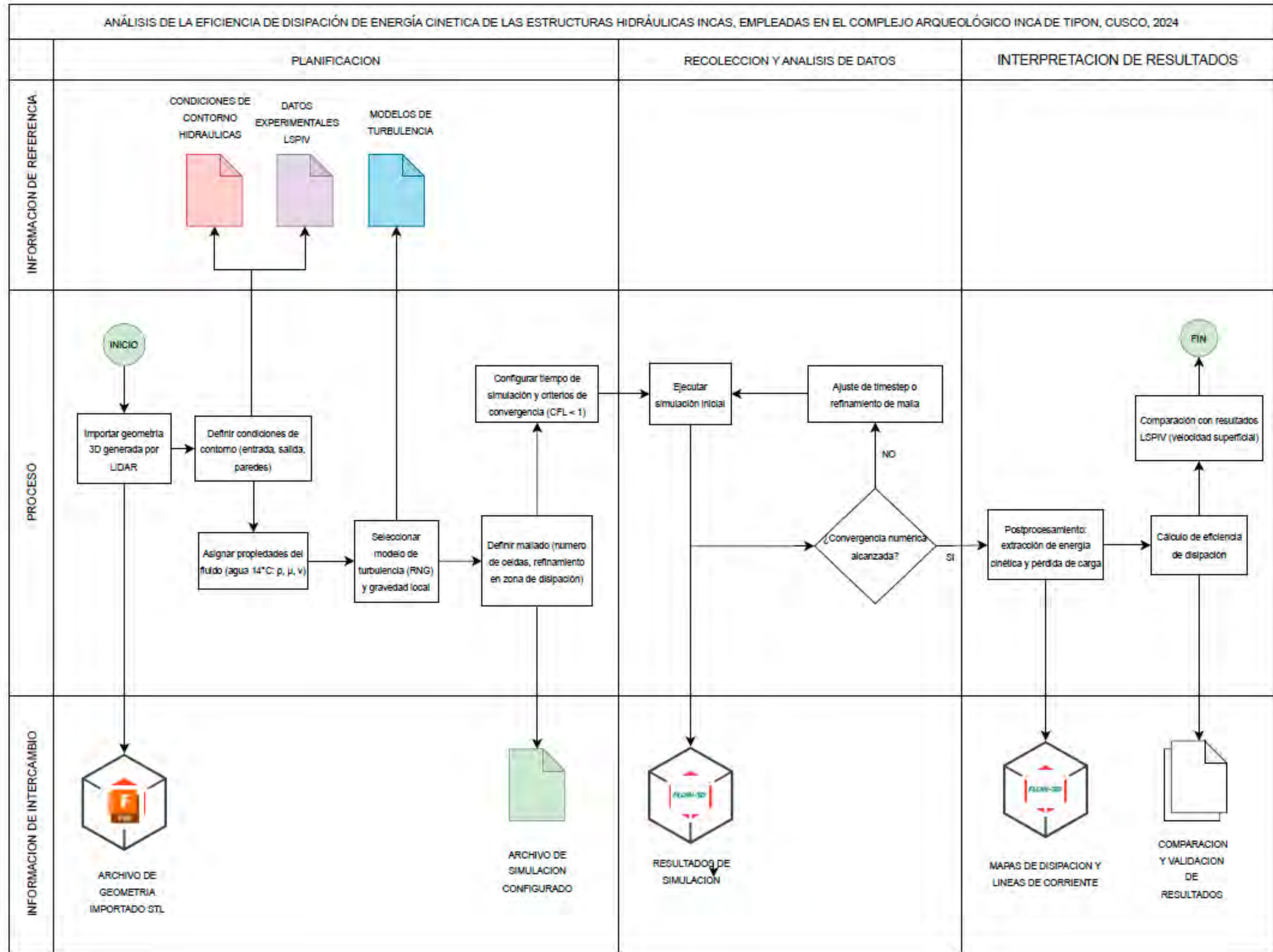
NIVEL	PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA	POBLACION
General	¿Cual es la eficiencia de disipacion de energia cinetica de las estructuras hidraulicas incas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	Analizar la eficiencia de disipacion de energia cinetica de las estructuras hidraulicas incas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	Las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón presentan una eficiencia de disipación significativa de energía cinética.	Variable Dependiente (Y) Eficiencia de disipación de energía cinética Variable Independiente (X) Estructuras hidráulicas incas	Enfoque: Cuantitativo Alcance: Correlacional - Descriptivo Diseño: No Experimental Técnicas de selección de la muestra: Muestreo por conveniencia Muestreo por criterios Técnicas de recoleccion de datos: Observación Medición en campo Levantamiento Topografico Simulación numérica Instrumentos de recoleccion de datos: Ficha de recolección de datos Equipos de medición hidraulica (vertedero, aforo, regla, cronometro) Equipos topograficos (Dron con sensor LiDAR, Rover GPS) Software Flow3D	Población: Todas las estructuras hidráulicas incas de disipacion presentes en el Complejo Arqueológico de Tipón Muestra: Siete estructuras hidráulicas incas de disipación: 1. Canal en forma de S 2. Canal en forma de T 3. Canal en forma de Zigzag 4. Canal con doble salida 5. Canal con caída con entrada recta y salida lateral 6. Canal con caída con entrada lateral y salida recta 7. Canal con pendiente invertida.
Especifico 1	¿Cómo influye la geometría de las estructuras hidráulicas incas en la eficiencia de disipación de energía cinética en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	Analizar la influencia de la geometria de las estructuras hidraulicas incas en la disipacion de energia cinetica en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	La geometría de las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón influye significativamente en la eficiencia de disipación de energía cinética del flujo de agua.			
Especifico 2	¿Cuales son las propiedades del fluido de las estructuras hidraulicas incas de disipacion de energia cinetica en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	Determinar las propiedades del fluido de las estructuras hidraulicas incas de disipacion de energia cinetica en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	El fluido en las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón presenta propiedades propias del agua en régimen natural, caracterizadas por densidad, viscosidad y temperatura.			
Especifico 3	¿Cómo influyen las características del flujo en la eficiencia de disipación de energía cinética de las estructuras hidráulicas incas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	Analizar las características del flujo de las estructuras hidraulicas incas de disipacion de energia cinetica en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	Las características del flujo en las estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón influyen positivamente en la eficiencia de disipación de energía cinética.			
Especifico 4	¿Cómo varía la eficiencia de disipación de energía cinética entre los diferentes tipos de estructuras hidráulicas en en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	Determinar la variación de la eficiencia de disipación de energía cinética entre los distintos tipos de estructuras hidráulicas en el Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.	La eficiencia de disipación de energía cinética varía significativamente entre los diferentes tipos de estructuras hidráulicas incas del Complejo Arqueológico de Tipón, siendo algunas más efectivas debido a sus características geométricas y de diseño.			

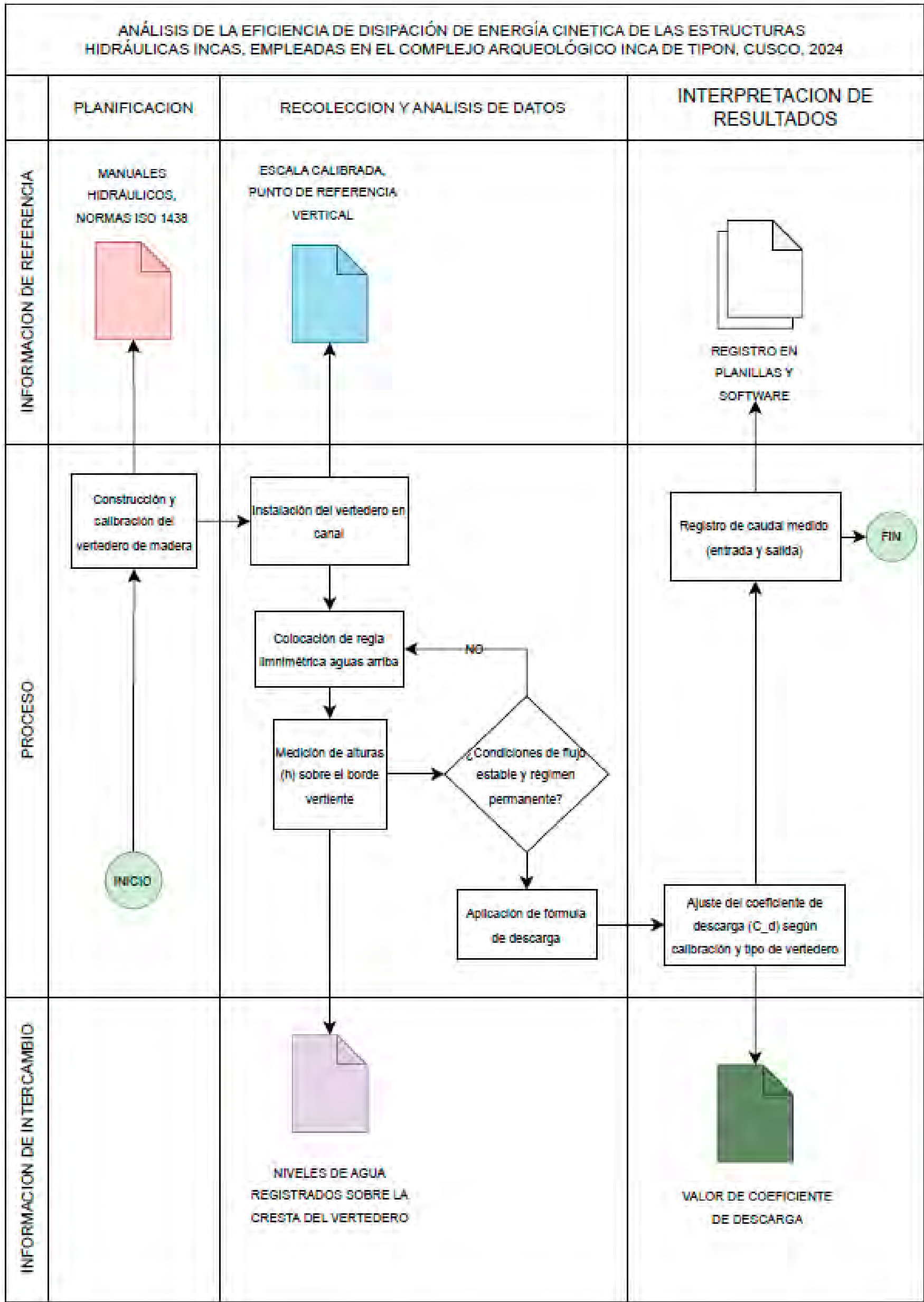
Flujogramas



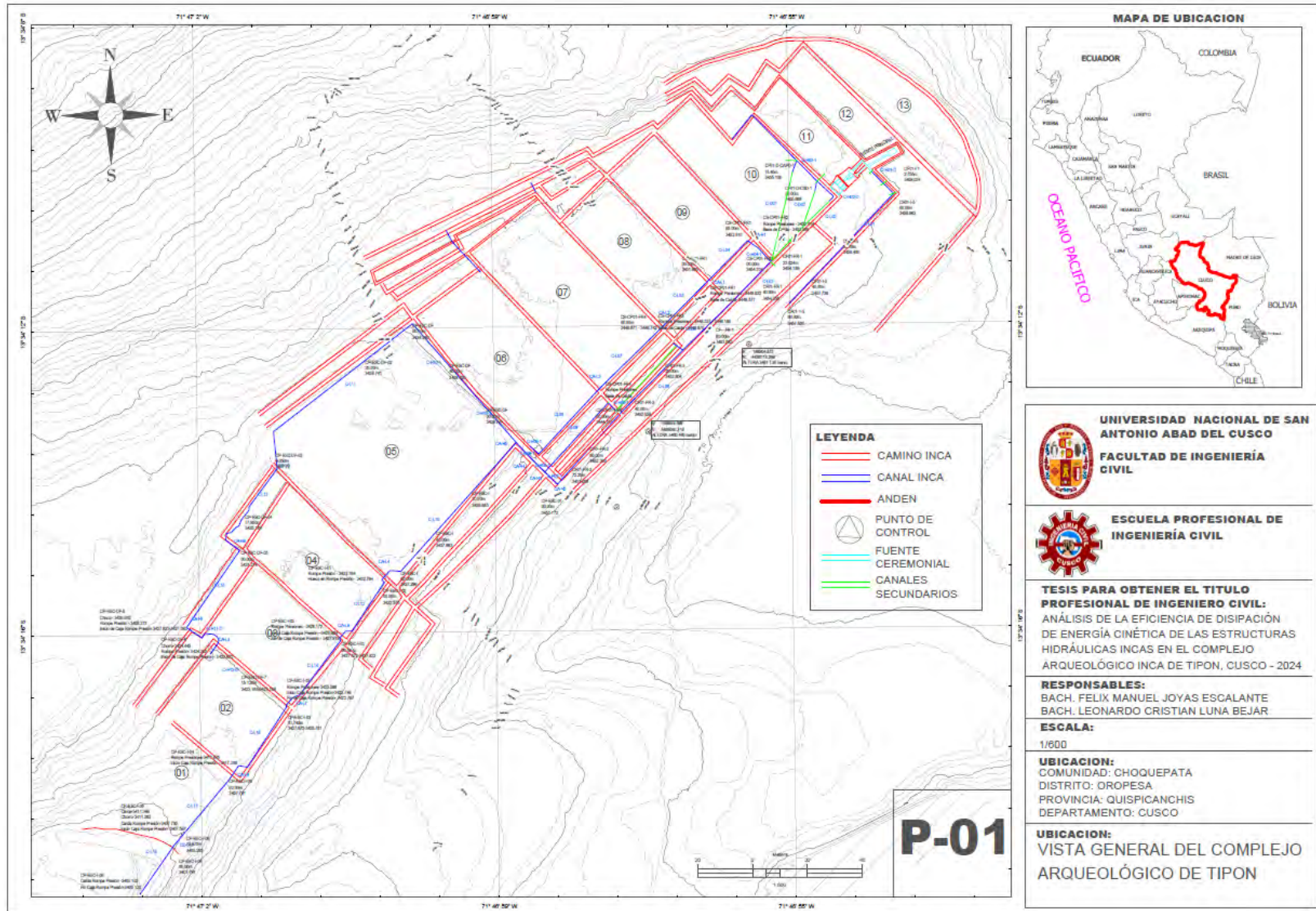









Plano topográfico de Tipon



Permiso

	PERÚ	Ministerio de Cultura	<small>DIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE CULTURA DE CUSCO</small>	<small>DIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE CULTURA DE CUSCO</small>	<small>Firmado digitalmente por BAYRO ORELLANA Guido Walter FAU 20490345397 soft Cargo: Director De La Ddo Cusco Motivo: Soy el autor del documento Fecha: 04.09.2024 09:44:27 -05:00</small>
---	-------------	------------------------------	---	---	---

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

Cusco, 04 de Septiembre del 2024

OFICIO N° 002134-2024-DDC-CUS/MC

Señor(a):
LEONARDO CRISTIAN LUNA BEJAR
FELIX MANUEL JOYAS ESCALANTE
 Celular: 953856985 / 984407569

CIUDAD.-

Asunto: **REMITE RESPUESTA A SOLICITUD**

Ref.: Expediente N° 20240120225

De mi consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a usted, en atención a los documentos de la referencia mediante el cual solicita autorización para corte del flujo de agua de los canales por 20 minutos y sobre vuelo de RPAS (drone) para fines académicos.

Al respecto, Coordinación del Parque Arqueológico de Tipón, opina que **ES VIABLE** su petición para lo cual deberá tener en consideración las siguientes recomendaciones:

- ✓ El uso de drone se deberá dar en horas de poca afluencia de Turismo por lo que se recomienda el horario de 7.30 am a 9.00 am.
- ✓ Para el corte de flujo de agua deberá ser comunicado a la Coordinación del Parque Arqueológico de Tipón, con un mínimo de 48 horas de anticipación con la finalidad de prever al personal para dichos trabajos de corte, los mismos que no deberán exceder del tiempo solicitado (20 minutos).
- ✓ Así mismo, se recomienda que todo el registro fotográfico empleado con el Drone, deba ser compartido con la DDC Cusco, el cual permitirá tener un registro actualizado para control de las actividades de Mantenimiento del Parque Arqueológico de Tipón.
- ✓ Finalmente deberá presentar la documentación y/o licencia que acredite el manejo del equipo Drone.

Sin otro particular, me despido de usted.



Atentamente,

Documento firmado digitalmente

GUIDO WALTER BAYRO ORELLANA
 DIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE CULTURA DE CUSCO

GBO/tom/jpf

Av. Javier Prado Este 2465, San Borja
 Central Telefónica: (511) 618 9393
 www.gob.pe/cultura






Esta es una copia auténtica imprimible de un documento electrónico archivado por el Ministerio de Cultura, aplicando lo dispuesto por el Art. 25 de D.S. 070-2013-PCM y la Tercera Disposición Complementaria Final del D.S. 026-2016-PCM. Su autenticidad e integridad pueden ser contrastadas a través de la siguiente dirección web:
<https://tramitedocumentario.cultura.gob.pe:8181/validadorDocumental/finicio/detalle.jsf> Código: QPCURSC

Fichas de recolección de datos


UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL			
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024		
<u>Relacion de infraestructuras hydraulicas</u>			
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante	
		Leonardo Cristian Luna Bejar	
Fecha:		09/08/2024 Temperatura: 14 °C	
Lugar:		Complejo Arqueologico Inca de Tipon	
Observaciones		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor	
N°	Código	Tipo de obra hydraulica	Ubicación
1	CAN-S	CANAL EN FORMA DE S	TERRAZA 04
2	CAN-T	CANAL EN FORMA DE T	TERRAZA 06
3	CAN-Z	CANAL EN FORMA DE ZIGZAG	TERRAZA 04
4	CA-ER-S2	CAIDA CON DOBLE SALIDA	TERRAZA 06-05
5	CA-EL-SR	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	TERRAZA 04-03
6	CA-ER-SL	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	TERRAZA 04-03
7	CAN-PI	CANAL CON PENDIENTE INVERTIDA	TERRAZA 01

<p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO</p> <p>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL</p> <p>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL</p>						
	<p>ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024</p>					
<p><u>Propiedades hidráulicas medidas en campo</u></p>						
<p>Responsables: <u>Felix Manuel Joyas Escalante</u></p>						
<p><u>Leonardo Cristian Luna Bejar</u></p>						
<p>Fecha: <u>18/10/2024</u> Temperatura: <u>14 °C</u></p>						
<p>Lugar: <u>Complejo Arqueologico Inca de Tipon</u></p>						
<p>Observaciones: <u>La toma de datos de realizo en 2 sesiones durante el mes de Octubre</u></p>						
N°	Disipador	Punto	Caudal estimado (Q)	Velocidad superficial (V)	Altura de flujo(h)	Metodo
2	CANAL EN FORMA DE S	Entrada canal	4.87 lt/s	0.48 m/s	0.035 m	LSPIV Videos + Vertederos + Regla milimetrica
		Salida disipador	4.81 lt/s	0.29 m/s	0.05 m	
3	CANAL EN FORMA DE T	Entrada canal	9.06 lt/s	0.92 m/s	0.035 m	
		Salida disipador	9.05 lt/s	0.27 m/s	0.105 m	
4	CANAL EN FORMA DE ZIGZAG	Entrada canal	4.32 lt/s	0.41 m/s	0.04 m	
		Salida disipador	4.29 lt/s	0.37 m/s	0.046 m	
1	CAIDA CON DOBLE SALIDA	Entrada canal	10.76 lt/s	0.44 m/s	0.09 m	
		Salida disipador 1	4.04 lt/s	0.47 m/s	0.05 m	
		Salida disipador 2	6.72 lt/s			
5	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	Entrada canal	4.16 lt/s	0.7 m/s	0.031 m	
		Salida disipador	4.11 lt/s	0.41 m/s	0.057 m	
6	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	Entrada canal	4.51 lt/s	0.92 m/s	0.03 m	
		Salida disipador	4.51 lt/s	0.72 m/s	0.04 m	
7	CANAL CON PENDIENTE INVERTIDA	Entrada canal	9.62 lt/s	1.72m/s	0.022 m	
		Salida disipador	9.54 lt/s	0.58 m/s	0.061 m	

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL					
		ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Propiedades hidráulicas medidas en campo</u>					
Responsables: <u>Felix Manuel Joyas Escalante</u> <u>Leonardo Cristian Luna Bejar</u>					
Fecha: <u>18/10/2024</u> Temperatura: <u>14 °C</u>					
Lugar: <u>Complejo Arqueologico Inca de Tipon</u>					
Observaciones: <u>La toma de datos de realizo con vertederos de madera y paredes de plastico</u>					
N °	Nombre del disipador	Ancho del vertedero (b)	Altura del fondo al vertedero(W)	Ancho del canal(B)	Carga sobre el vertedero(h)
1	CANAL EN FORMA DE S	0.10	0.10	0.32	0.0881
2	CANAL EN FORMA DE T	0.10	0.10	0.31	0.1350
3	CANAL EN FORMA DE ZIGZAG	0.10	0.10	0.24	0.0802
4	CAIDA CON DOBLE SALIDA	0.10	0.10	0.23	0.1492
5	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	0.10	0.10	0.23	0.0780
6	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	0.10	0.10	0.19	0.0815
7	CANAL CON PENDIENTE INVERTIDA	0.10	0.10	0.28	0.1399

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL					
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024				
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos					
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar			
Fecha:		03/10/2024		Temperatura:	14 °C
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipón			
Observaciones:		La toma de datos se realizó con la supervisión del docente asesor			
N°	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL			Ubicación	
Código	CA-EL-SR	Coordenadas		Este	Norte
Terraza	TERRAZA 04-03	Zona	19	Hemisferio	S
Fotografía					

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos				
Responsables:	Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar			
Fecha:	03/10/2024	Temperatura:	14 °C	
Lugar:	Complejo Arqueológico Inca de Tipon			
Observaciones:	La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor			
N°	CAIDA CON DOBLE SALIDA			Ubicación
Codigo	CA-ER-S2	Coordenadas		Este Norte
				198814.95 8498069.01
Terraza	TERRAZA 06-05	Zona	19	Hemisferio S
Fotografia				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL					
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024				
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos					
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar			
Fecha:		03/10/2024 Temperatura: 14 °C			
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon			
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor			
N°	CANAL EN FORMA DE ZIGZAG	Coordenadas		Ubicación	
Codigo	CAN-Z			Este	Norte
				198714.91	8498046.06
Terraza	TERRAZA 04	Zona	19	Hemisferio	S
Fotografia					

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante		
		Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos se realizó con la supervisión del docente asesor		
N°	CANAL EN FORMA DE S	Coordenadas		Ubicación
Codigo	CAN-S			Este Norte
Terraza	TERRAZA 04	Zona	19 Hemisferio	198772.37 8498022.24 S
Fotografia				



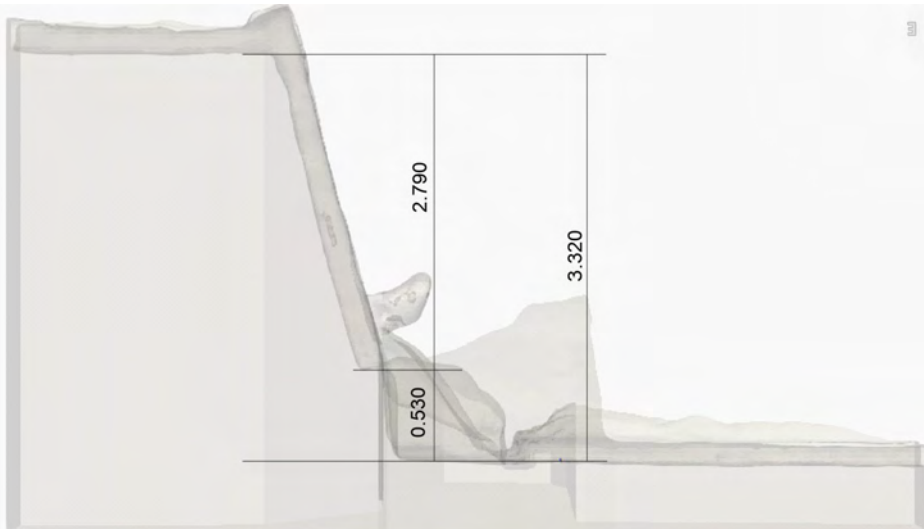
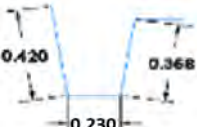

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024 Temperatura: 14 °C		
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos se realizó con la supervisión del docente asesor		
N°	CANAL EN FORMA DE T			Ubicación
Codigo	CAN-T	Coordenadas		Este Norte
Terraza	TERRAZA 06	Zona	19 Hemisferio	198827.1 8498058.41 S
Fotografía				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024 Temperatura: 14 °C		
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos se realizó con la supervisión del docente asesor		
N°	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	Coordenadas		Ubicación
Código	CA-ER-SL			Este Norte
				198693.86 8498002.19
Terraza	TERRAZA 03-02	Zona	19	Hemisferio S
Fotografía				




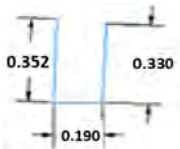
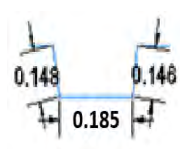
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Camara rompe presion de caida hidraulica</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024 Temperatura: 14 °C		
Lugar:		Complejo Arqueologico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	Coordenadas		Ubicación
Codigo	CA-ER-SL			Este Norte
Terraza	TERRAZA 03-02	Zona	19 Hemisferio	S
Fotografia		Esquematzicacion		
				



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Camara rompe presion de caida hidraulica</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante		
		Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C
Lugar:		Complejo Arqueologico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	Coordenadas		Ubicación
Codigo	CA-EL-SR			Este Norte
Terraza	TERRAZA 04-03	Zona	19 Hemisferio	S
Fotografia		Esquematzicacion		
				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante		
		Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CAIDA CON DOBLE SALIDA	Coordenadas		Ubicación
Codigo	CA-ER-S2			Este Norte
				198814.95 8498069.01
Terraza	TERRAZA 06-05	Zona	19 Hemisferio	S
Fotografia		Esquematzacion		
				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL					
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024				
<u>Características geométricas de los disipadores identificados</u>					
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante			
		Leonardo Cristian Luna Bejar			
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C	
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon			
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor			
N°	CAIDA CON DOBLE SALIDA	Coordenadas		Ubicación	
				Norte	Este
Terraza	TERRAZAS 06-05			198815	8498069
Esquematizacion:					
					
Altura total de caída		Altura desde la piedra al pozo		Ancho de la piedra	
3.320		0.530		0.315	
				Altura hasta el escalon	
				2.790	
SECCION DEL CANAL					
Canal Aguas Arriba			Canal Aguas Abajo		
Ancho	0.23			Ancho	0.28
Alto	0.412			Alto	0.192
Rugosidad				Rugosidad	
Cota	3443.481			Cota	3439.741
					



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Características geométricas de los disipadores identificados</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	Coordenadas	Ubicación	
Terraza	TERRAZAS 04-03		Norte	Este
			198711	8495033
Esquematzación: <div style="text-align: center;">  </div>				
Altura total de caída	Altura desde la piedra al pozo	Ancho de la piedra	Altura hasta el escalon	
3.417	1.062	0.250	2.355	
SECCION DEL CANAL				
Canal Aguas Arriba			Canal Aguas Abajo	
Ancho	0.230		Ancho	0.210
Alto	0.205		Alto	0.215
Rugosidad			Rugosidad	
Cota	3434.625		Cota	3430.893
				

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL					
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024				
<u>Características geométricas de los disipadores identificados</u>					
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar			
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C	
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon			
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor			
N°	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	Coordenadas		Ubicación	
				Norte	Este
Terraza	TERRAZAS 04-03			198746	8497999
Esquematzicacion:					
					
Altura total de caída		Altura desde la piedra al pozo		Ancho de la piedra	
2.591		0.249		0.301	
				Altura hasta el escalon	
				2.342	
SECCION DEL CANAL					
Canal Aguas Arriba			Canal Aguas Abajo		
Ancho	0.190			Ancho	0.185
Alto	0.347			Alto	0.148
Rugosidad				Rugosidad	
Cota	3430.514			Cota	3426.346
					

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL		
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024	
<u>Parámetros físicos del agua utilizada en la simulación</u>		
Responsables:	Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar	
Fecha:	12/01/2025	Temperatura: 14 °C
Lugar:	Complejo Arqueológico Inca de Tipon	

N°	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	Coordenadas	Ubicación	
			Norte	Este
Terraza	TERRAZAS 04-03		198711	8495033

N°	Parametro	Valor	Unidad	Fuente
1	Temperatura del agua	14.2	°C	Medición en campo
2	Densidad (ρ)	999.1	kg/m ³	Manual de FLOW-3D
3	Viscosidad cinemática (ν)	1.13×10^{-6}	m ² /s	FLOW-3D Database
4	Aceleración gravitatoria (g)	9.81	m/s ²	Constante

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL		
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024	
<p style="text-align: center;"><u>Parámetros físicos del agua utilizada en la simulación</u></p> <p>Responsables: <u>Felix Manuel Joyas Escalante</u> <u>Leonardo Cristian Luna Bejar</u></p> <p>Fecha: <u>12/01/2025</u> Temperatura: <u>14 °C</u></p> <p>Lugar: <u>Complejo Arqueologico Inca de Tipon</u></p>		



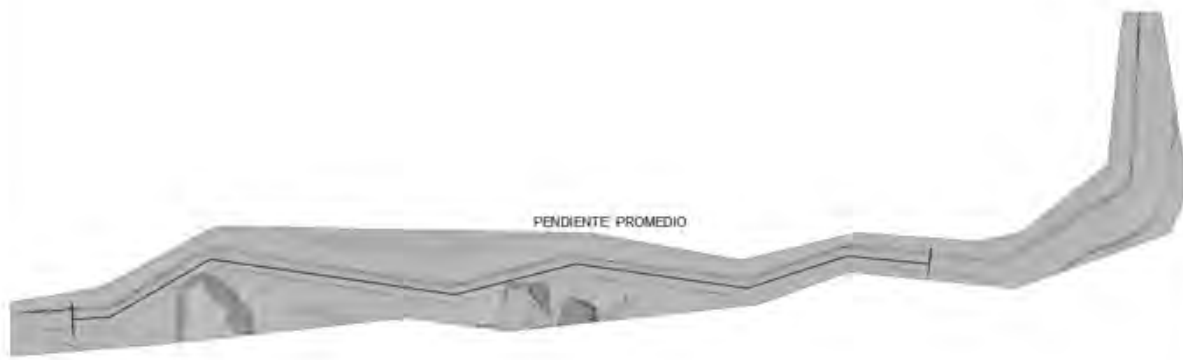
N°	CAIDA CON DOBLE SALIDA	Ubicación	
		Coordenadas	Norte Este
Terraza	TERRAZAS 06-05		198815 8498069
Ubicación		Fin	



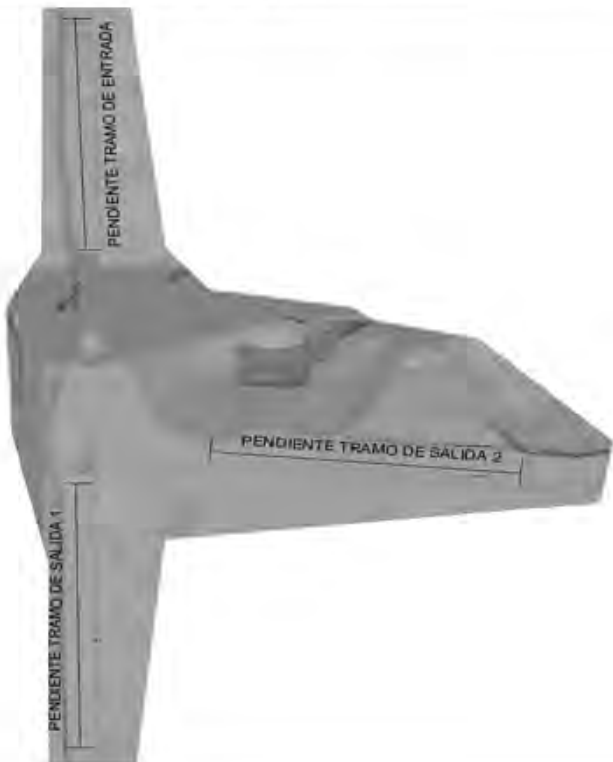
N°	Parametro	Valor	Unidad	Fuente
1	Temperatura del agua	14.2	°C	Medición en campo
2	Densidad (ρ)	999.1	kg/m ³	Manual de FLOW-3D
3	Viscosidad cinemática (ν)	1.13×10^{-6}	m ² /s	FLOW-3D Database
4	Aceleración gravitatoria (g)	9.81	m/s ²	Constante

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Parámetros físicos del agua utilizada en la simulación</u>				
Responsables: <u>Felix Manuel Joyas Escalante</u> <u>Leonardo Cristian Luna Bejar</u>				
Fecha: <u>12/01/2025</u> Temperatura: <u>14 °C</u>				
Lugar: <u>Complejo Arqueológico Inca de Tipon</u>				
Observaciones:				
N°	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	Ubicación		
		Norte	Este	
Terraza	TERRAZAS 04-03	Coordenadas	198746 8497999	
N°	Parametro	Valor	Unidad	Fuente
1	Temperatura del agua	14.0	°C	Medición en campo
2	Densidad (ρ)	999.1	kg/m ³	Manual de FLOW-3D
3	Viscosidad cinemática (ν)	1.13×10^{-6}	m ² /s	FLOW-3D Database
4	Aceleración gravitatoria (g)	9.81	m/s ²	Constante

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL					
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024				
<u>Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos</u>					
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante			
		Leonardo Cristian Luna Bejar			
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C	
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon			
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor			
N°	CAIDA CON ENTRADA LATERAL Y SALIDA RECTA	Coordenadas			Ubicación
Codigo	CA-ER-SL				Este Norte
Terraza	TERRAZA 03-02	Zona	19	Hemisferio	S
Esquematzacion					
					
Pendiente	Entrada	3.547%			
	Salida	4.800%			



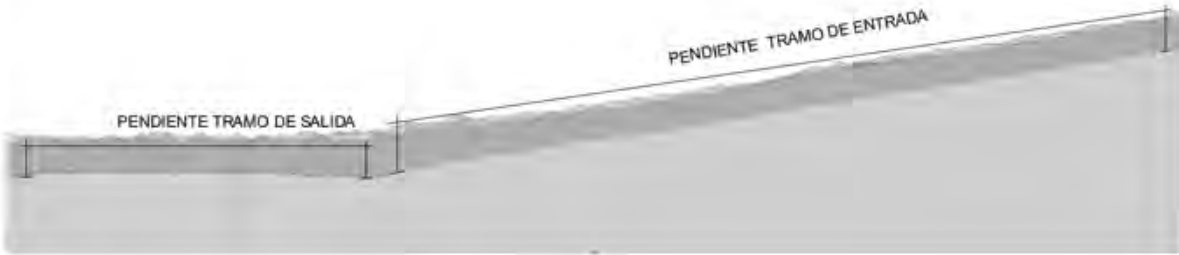
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024 Temperatura: 14 °C		
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervisión del docente asesor		
N°	CAIDA CON ENTRADA RECTA Y SALIDA LATERAL	Coordenadas		Ubicación Este Norte
Codigo	CA-EL-SR			198709.99 8498031.39
Terraza	TERRAZA 04-03	Zona	19	Hemisferio S
Esquematzacion				
				
Pendiente	Entrada	2.890%		
	Salida	1.222%		

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO				
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL				
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante		
		Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CANAL EN FORMA DE ZIGZAG			Ubicación
		Coordenadas		Este Norte
Codigo	CAN-Z			198714.91 8498046.06
Terraza	TERRAZA 04	Zona	19	Hemisferio S
Esquematzicacion				
				
Pendiente	Promedio	1.928%		
Fotografia				

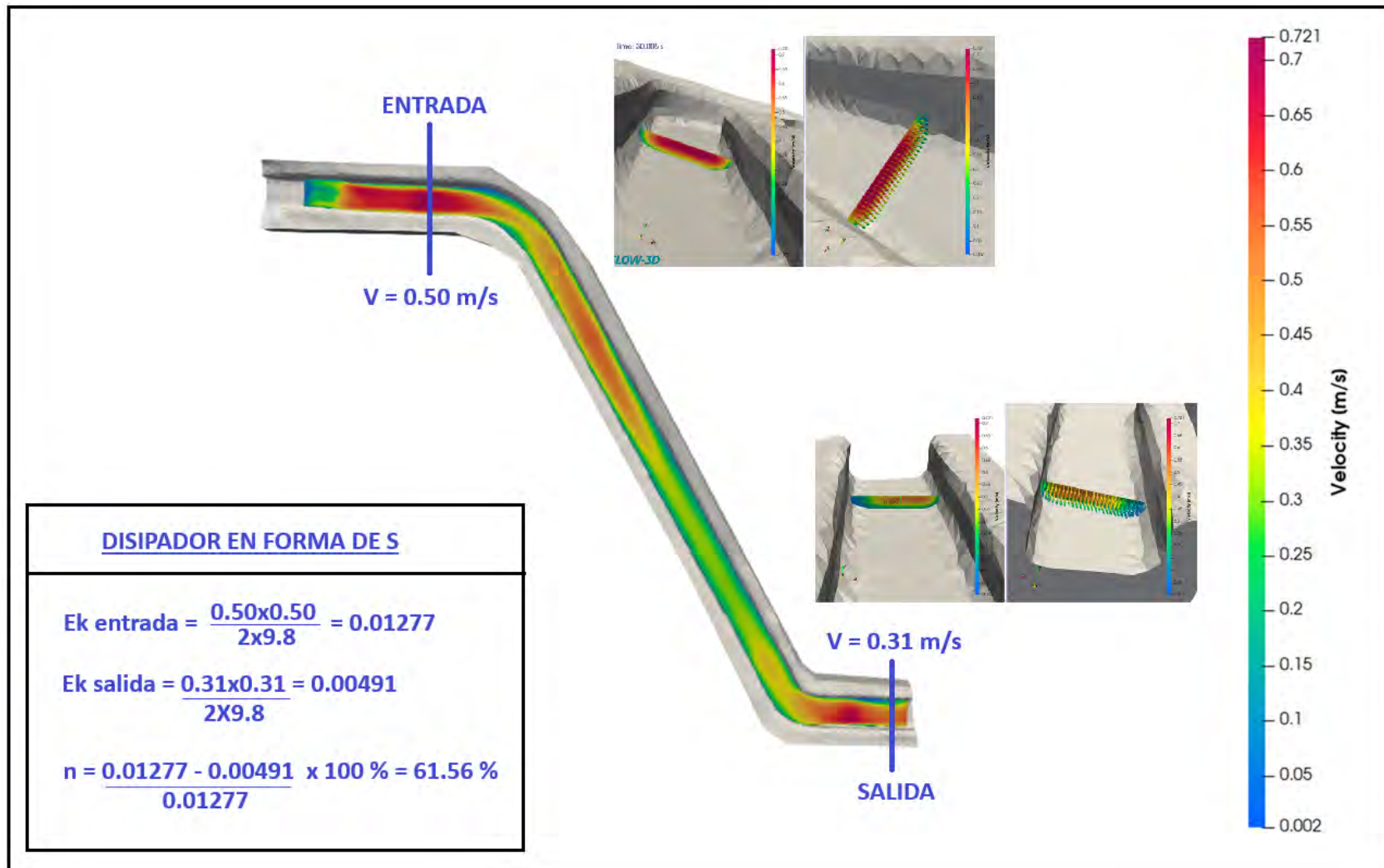
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante		
		Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024	Temperatura:	14 °C
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CAIDA CON DOBLE SALIDA	Coordenadas		Ubicación
Codigo	CA-ER-S2			Este Norte
Terraza	TERRAZA 06-05	Zona	19	Hemisferio S
Esquematzacion				
				
Pendiente	Entrada	0.266%		
	Salida 1	1.658%		
	Salida 2	11.667%		

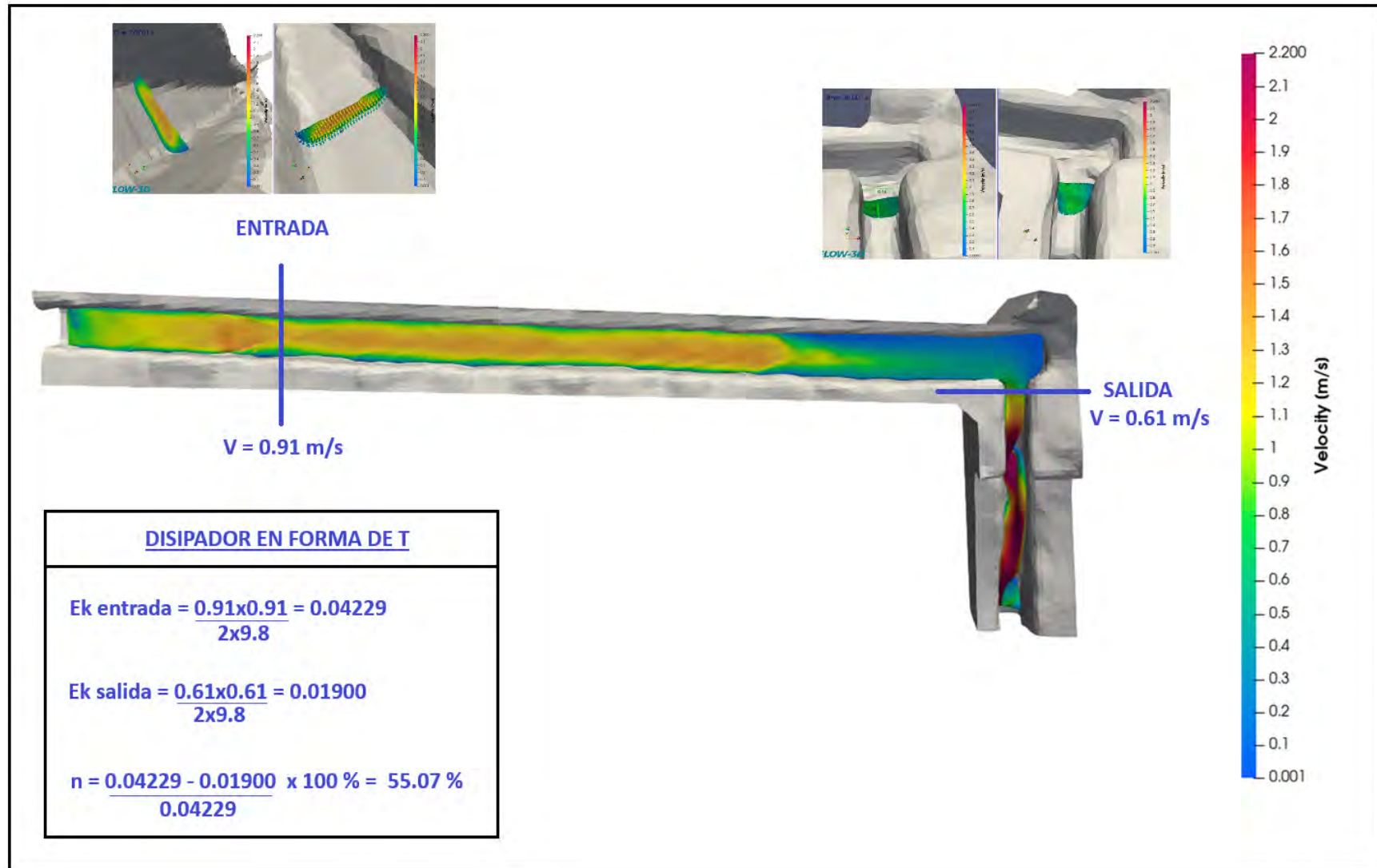
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024 Temperatura: 14 °C		
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CANAL EN FORMA DE T			Ubicación
		Coordenadas		Este Norte
Codigo	CAN-T			198827.1 8498058.41
Terraza	TERRAZA 06	Zona	19	Hemisferio S
Esquematzicacion				
<div>PENDIENTE TRAMO 1</div> 				
Pendiente	Tramo 1	4.596%		

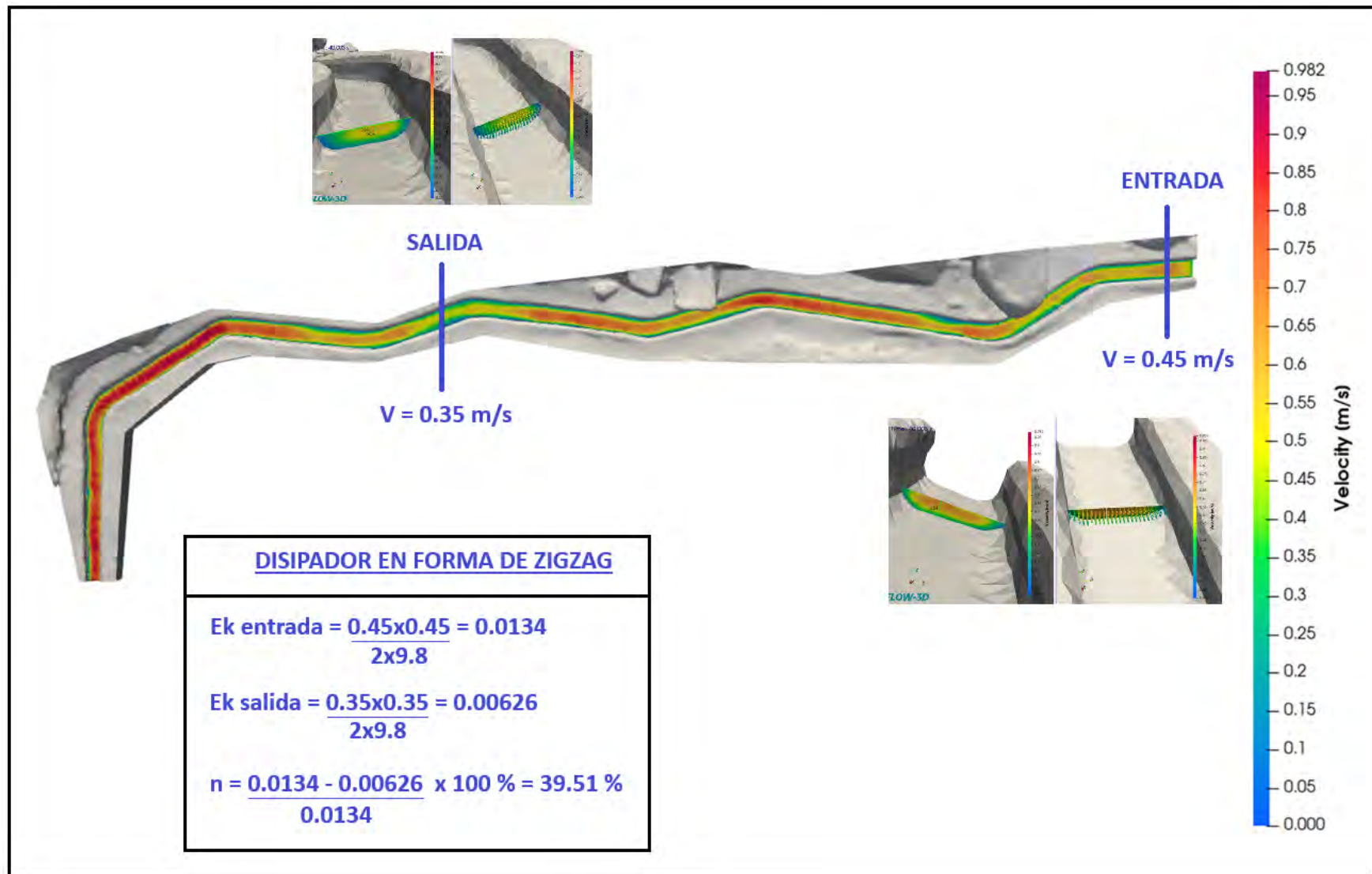
UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
<u>Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos</u>				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante		
		Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024		Temperatura: 14 °C
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos de realizo con la supervision del docente asesor		
N°	CANAL EN FORMA DE S	Coordenadas		Ubicación
Codigo	CAN-S			Este Norte
Terraza	TERRAZA 04	Zona	19	Hemisferio S
Esquematzación				
				
Pendiente	Tramo 1	1.155%		
	Tramo 2	0.137%		
	Tramo 3	0.757%		

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
	ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA CINÉTICA DE LAS ESTRUCTURAS HIDRÁULICAS INCAS, EN EL COMPLEJO ARQUEOLÓGICO INCA DE TIPON, CUSCO, 2024			
Ubicación geográfica de disipadores hidráulicos				
Responsables:		Felix Manuel Joyas Escalante Leonardo Cristian Luna Bejar		
Fecha:		03/10/2024 Temperatura: 14 °C		
Lugar:		Complejo Arqueológico Inca de Tipon		
Observaciones:		La toma de datos se realizó con la supervisión del docente asesor		
N°	CANAL CON PENDIENTE INVERTIDA	Coordenadas		Ubicación
Código	CAN-PI			Este Norte
Terraza	TERRAZA 01	Zona	19 Hemisferio	198695.36 8497918.28 S
Esquematzación				
				
Pendiente	Entrada	15.523%		
	Salida	1.591%		

Distribución de Velocidades, Cálculo de Energía Cinética y Cálculo de eficiencias de Disipación en los Disipadores





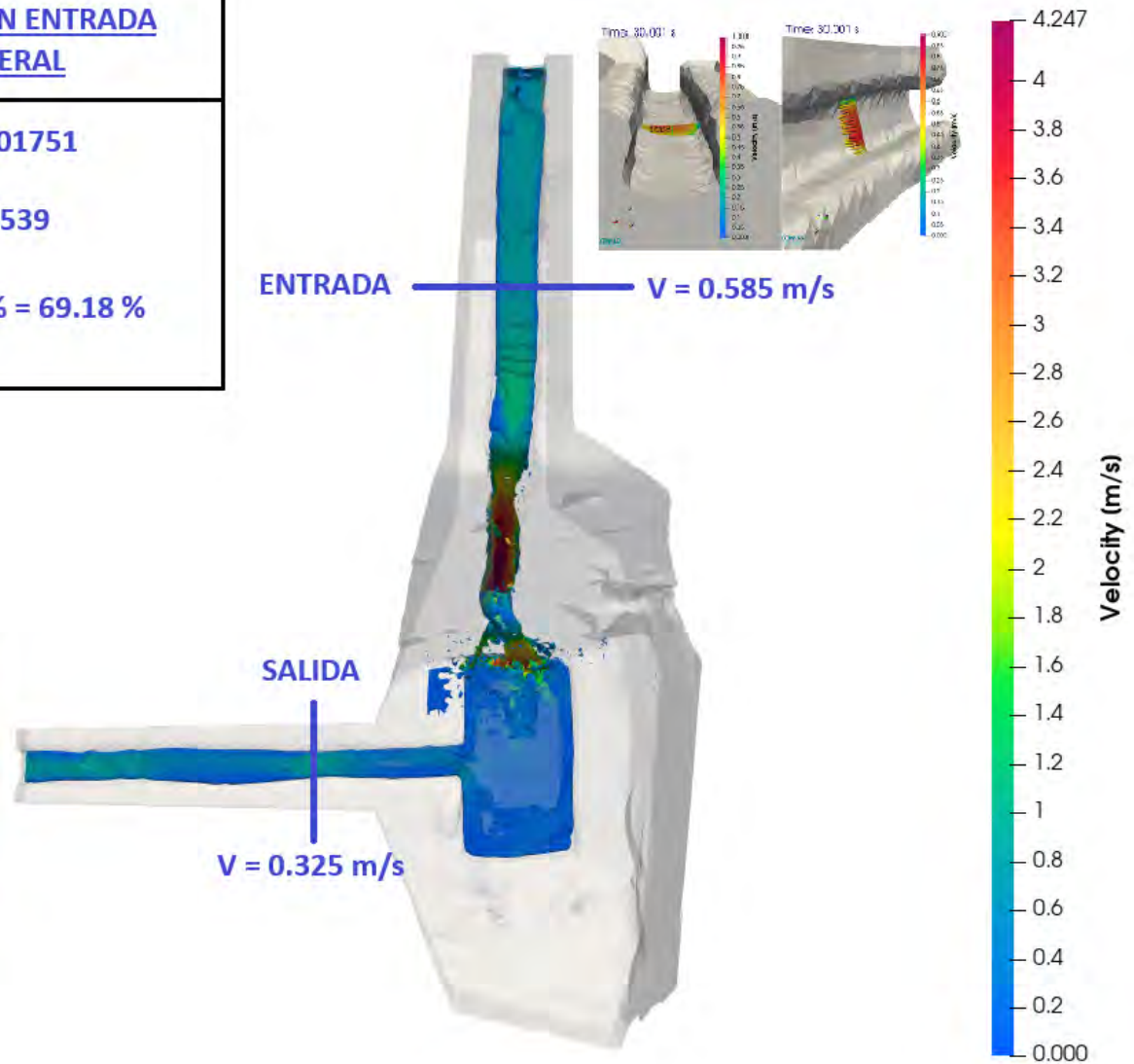
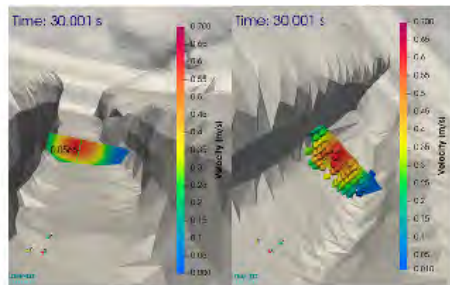


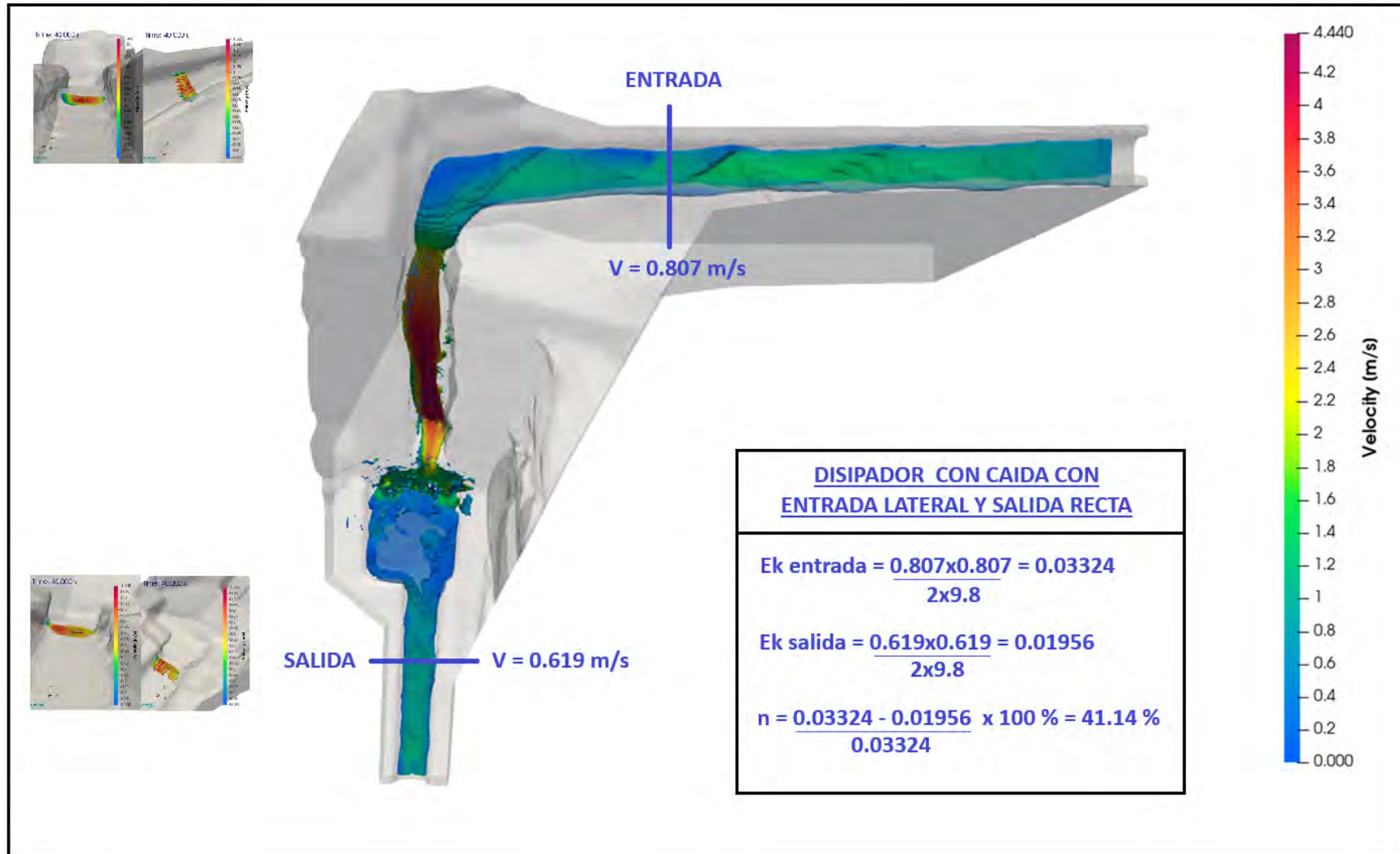
DISIPADOR CON CAIDA CON ENTRADA
RECTA Y SALIDA LATERAL

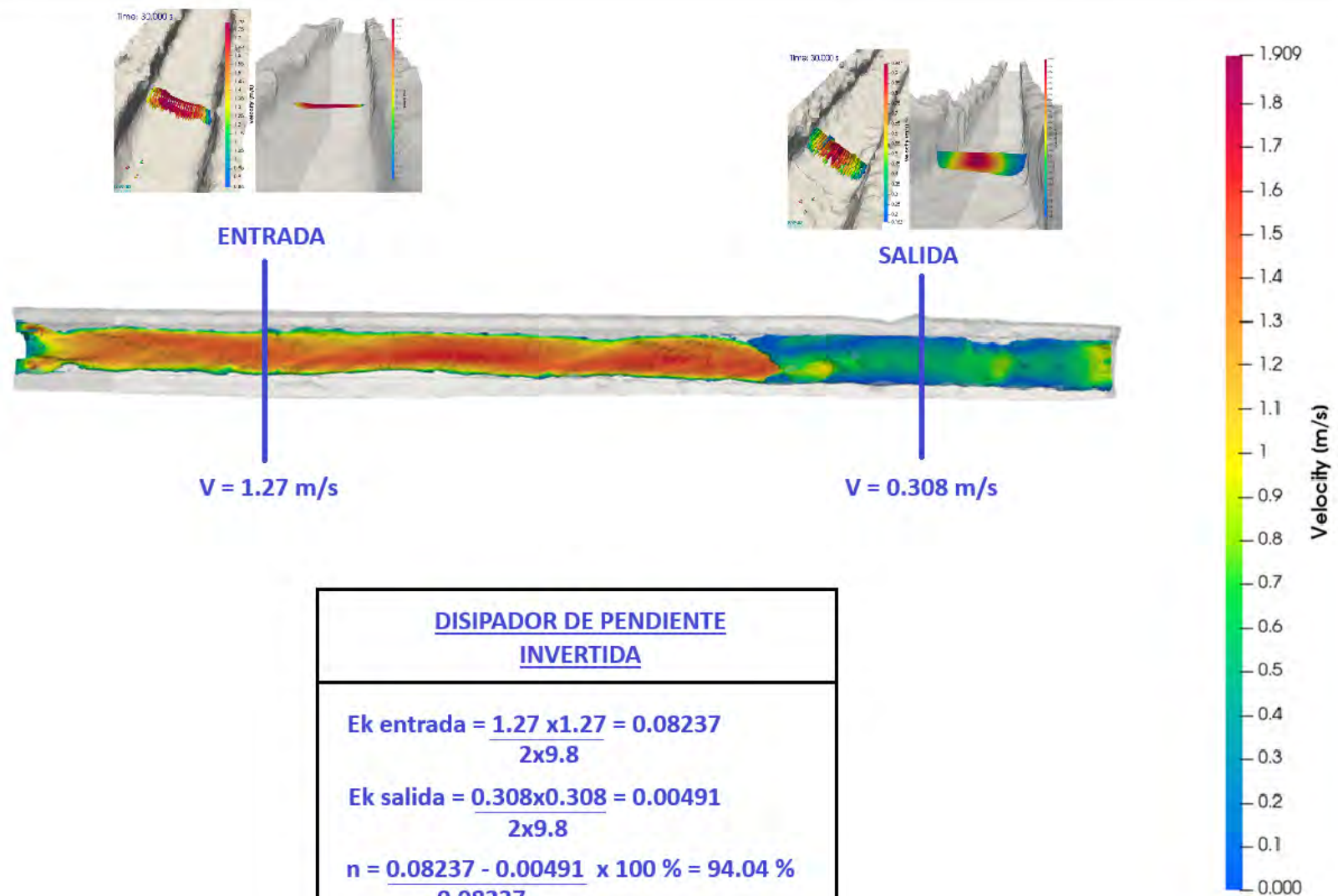
$$E_k \text{ entrada} = \frac{0.585 \times 0.585}{2 \times 9.8} = 0.01751$$

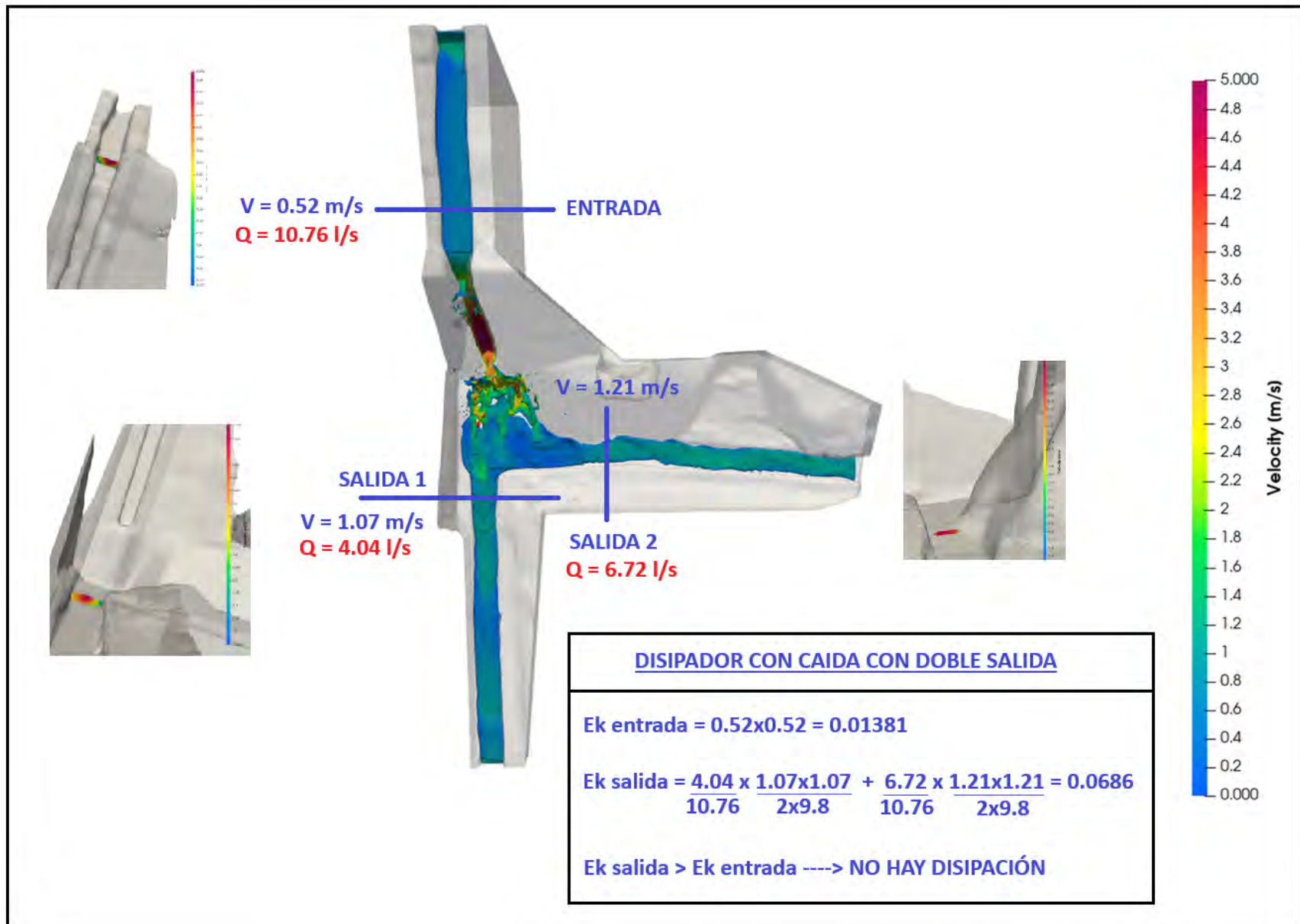
$$E_k \text{ salida} = \frac{0.325 \times 0.325}{2 \times 9.8} = 0.00539$$

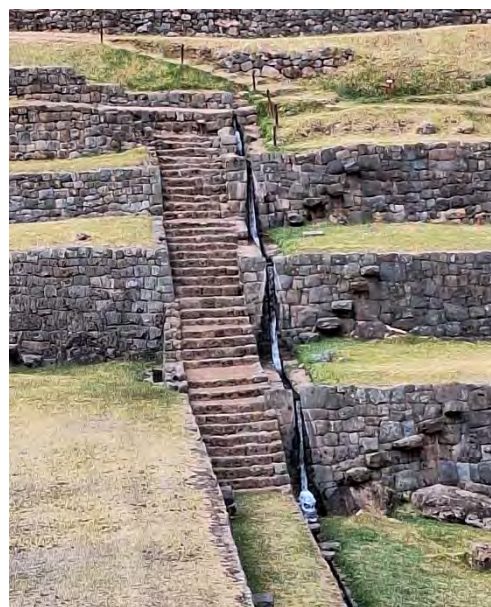
$$n = \frac{0.01751 - 0.00539}{0.01751} \times 100 \% = 69.18 \%$$









Panel Fotográfico*Visita de reconocimiento*

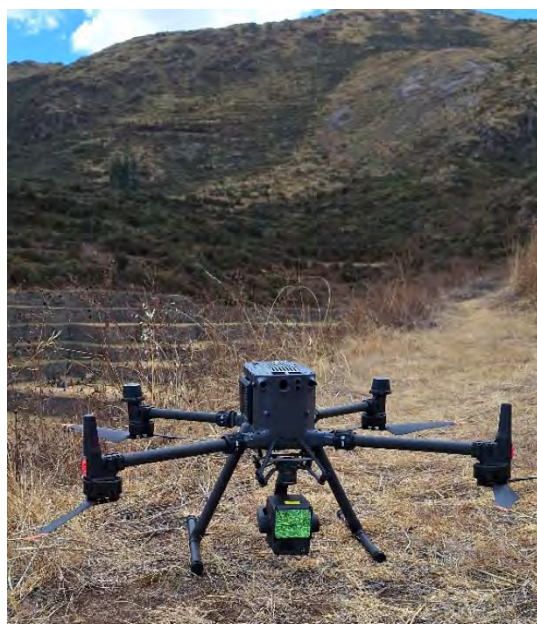




Escaneo LIDAR con DRON DJI Matrice 350 RTK

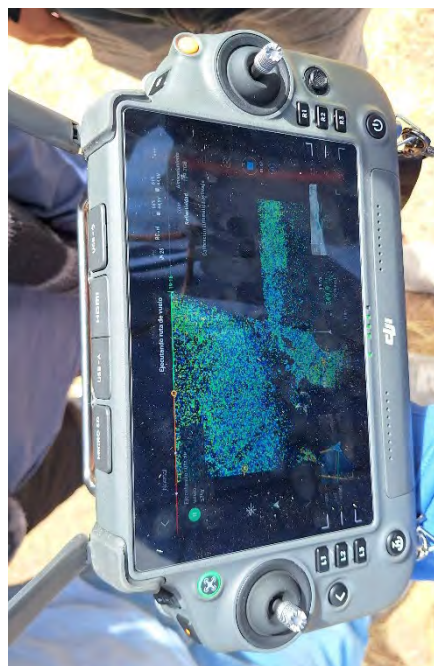














Mediciones de los canales (ancho, tirante)











Primera prueba para toma de datos del LSPIV







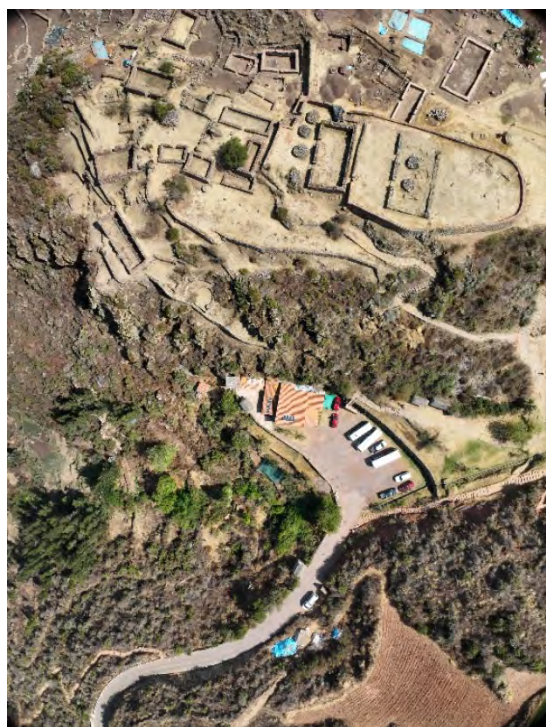


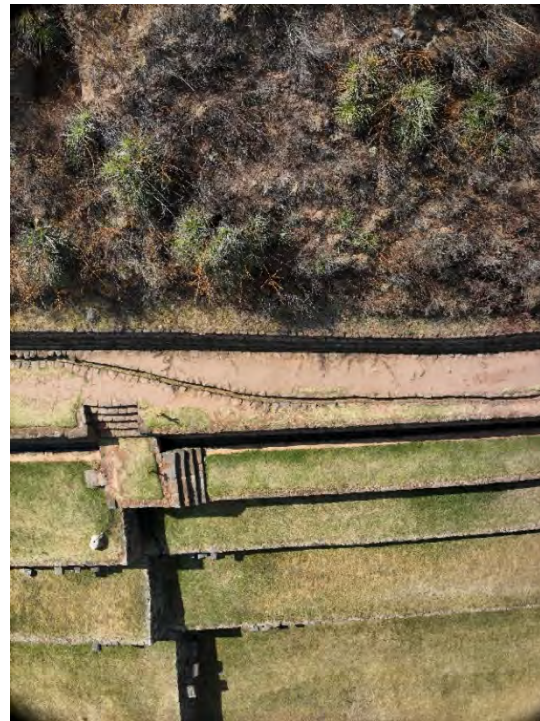


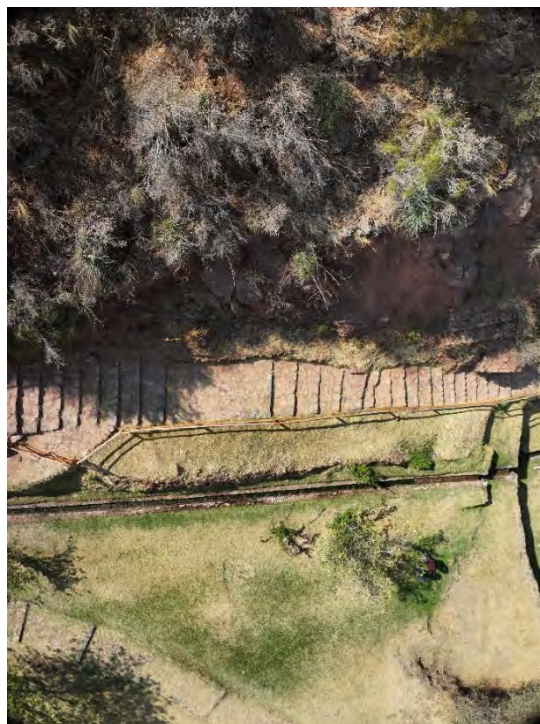
Escaneo LIDAR con DRON en canales secos





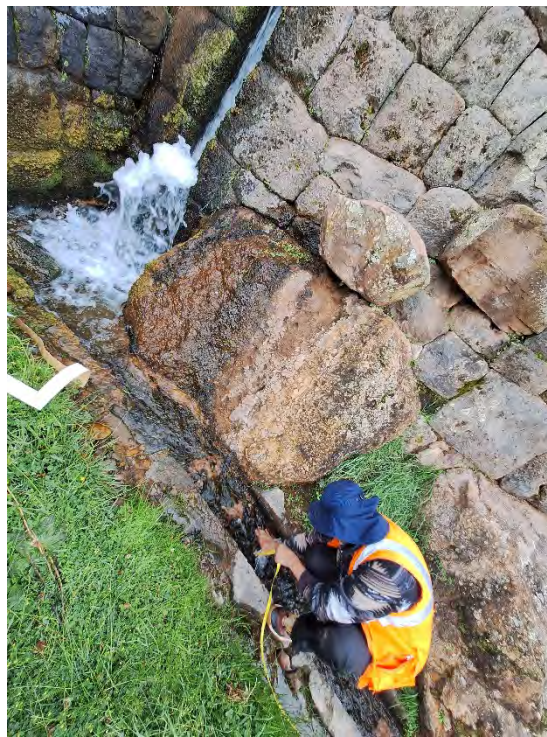










Toma de datos del LSPIV I



Toma de datos del LSPIV II

















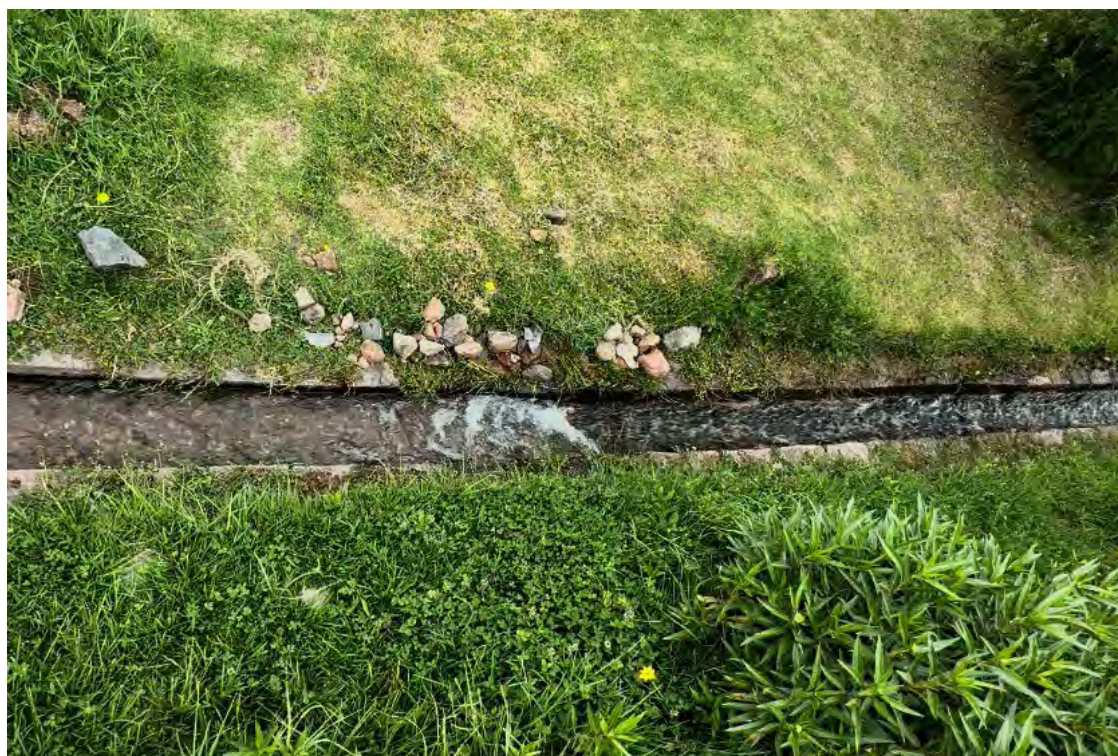






Escaneo LIDAR con Polycam II







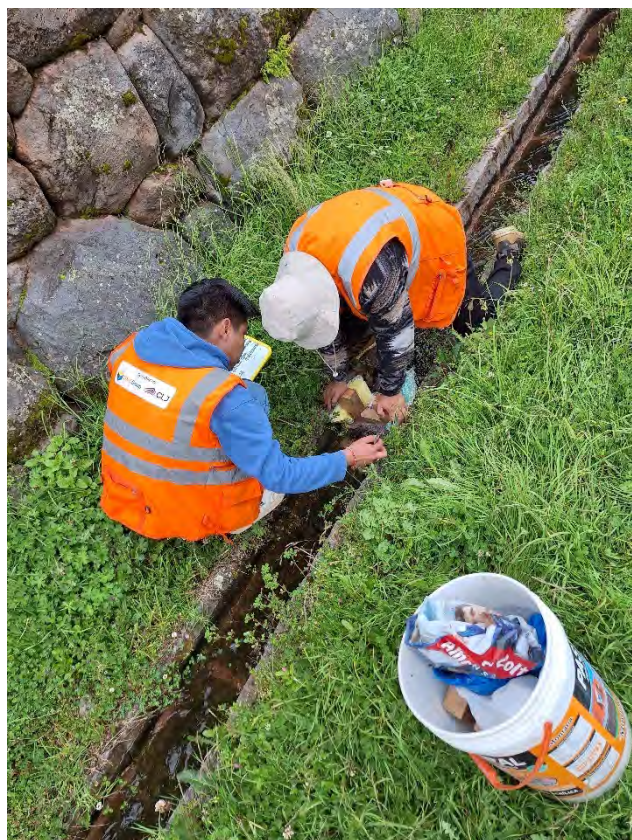
Medición de caudales con Vertedero















Toma de videos con DRON



Medición de la temperatura