

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EVALUACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO INCA EMPLEANDO
DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN EL PARQUE
ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN, CUSCO 2024**

PRESENTADO POR:

Br. GABRIEL RODRIGO HUAMAN QUISPE

Br. ERNEST MIK MEZA TORRES

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO CIVIL**

ASESOR:

Ing. CARLOS HUGO LOAYZA SCHIAFFINO

FINANCIADO POR:

YACHAYNINCHIS WIÑARINAMPAQ -
UNSAAC

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: EVALUACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO
INCA EMPLEANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN
EL PARQUE ARQUEOLÓGICO DE TIPÓN, CUSCO 2024

Presentado por: GABRIEL RODRIGO HUAMAN QUISPE DNI N° 93084587;
presentado por: ERNEST MIGUEL MEZA TORRES DNI N° 72230984
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el Software de Similitud, conforme al Art. 6º del *Reglamento para Uso del Sistema Detección de Similitud en la UNSAAC* y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 03 %.

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, 16 de enero de 2026

Firma

Post firma CARLOS HUGO LOAIZA SCHIAFFINO

Nro. de DNI 23870541

ORCID del Asesor 0000-0003-4405-4185

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 27259:546747191

ERNEST MIK - GABRIEL RODRIGO MEZA - HUAMAN

01.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega**trn:oid:::27259.546747191****409 páginas****Fecha de entrega****16 ene 2026, 10:23 a.m. GMT-5****62.785 palabras****Fecha de descarga****16 ene 2026, 10:40 a.m. GMT-5****326.526 caracteres****Nombre del archivo****01.pdf****Tamaño del archivo****39.5 MB**

3% 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
3%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

- **Caracteres reemplazados**
202 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
- **Texto oculto**
16 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

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

En primer lugar, a mis padres, Ernesto Meza y Miguela Torres, quienes han sido el pilar fundamental de mi formación personal y académica; a mi padre, por ser un ejemplo constante de profesionalismo, esfuerzo y valores, y a mi madre, por su amor incondicional, su apoyo permanente y por brindarme fortaleza y motivación en cada etapa de este camino. Asimismo, expreso mi profundo agradecimiento a mi hermano Erlin, por su confianza, por su amor fraterno incondicional, estando siempre presente tanto en los buenos como en los malos momentos, alentándome constantemente a seguir adelante. De manera especial, dedico este trabajo a mi novia, Claudia Otani, por su apoyo constante, su paciencia, su confianza y su comprensión a lo largo de todo este proceso académico, siendo un soporte fundamental para la culminación de esta investigación. Finalmente, agradezco sinceramente a mis ingenieros asesores por su orientación académica, sus valiosos aportes y el tiempo dedicado.

Ernest Mik Meza Torres

La presente tesis está dedicada, con profundo amor, respeto y gratitud, a mi mamá Sonia, a mi papá Adrián y a mi hermano Álvaro, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida y el motor que me ha impulsado a seguir adelante en cada etapa de este camino. Gracias por su apoyo incondicional, por los sacrificios silenciosos, por la confianza depositada en mí y por estar siempre presentes, brindándome fortaleza, comprensión y aliento, incluso en los momentos más difíciles. Su amor ha sido mi mayor motivación para no rendirme y para creer en mis capacidades. Este logro no es únicamente mío, sino el reflejo del respaldo, la unión y el amor de mi familia, quienes siempre han creído en mí y me han acompañado con paciencia y orgullo. Si hoy alcanzo una de mis metas más importantes, es gracias a ustedes, a su confianza y a su apoyo incondicional.

Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

INDICE

INDICE.....	III
INDICE DE TABLAS.....	XI
INDICE DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulación del problema	4
1.2.1 Problema General.....	4
1.2.2 Problemas Específicos	4
1.3 Justificación De La Investigación.....	5
1.3.1 Justificación social	5
1.3.2 Justificación práctica.....	5
1.3.3 Justificación Teórica	6
1.3.4 Justificación Metodológica	7
1.3.5 Justificación Ambiental.....	8
1.4 Objetivo de la investigación.....	8
1.4.1 Objetivo general.....	8
1.4.2 Objetivo específico	8

1.5	Delimitación del problema.....	9
1.5.1	Delimitación espacial.....	9
1.5.2	Delimitación temporal	10
1.5.3	Delimitación teórica.....	10
2.	CAPITULO II MARCO TEÓRICO	11
2.1	Antecedentes de la investigación	11
2.1.1	Antecedente local.....	11
2.1.2	Antecedentes nacionales	11
2.1.3	Antecedentes internacionales.....	14
2.2	Bases teóricas.....	17
2.2.1	Hidráulica y mecánica de fluidos.....	17
2.2.2	Fluidos.....	18
2.2.3	Hidrostática	22
2.2.4	Cinemática de fluidos	25
2.2.5	Flujo	25
2.2.6	Ecuación de continuidad para canales abiertos.....	28
2.2.7	Ecuación de Bernoulli.....	28
2.2.8	Número De Reynolds.....	30
2.2.9	Número De Froude	30
2.2.10	Elementos geométricos de una sección de un canal abierto	31

2.2.11	Resalto hidráulico	34
2.2.12	Caídas Verticales	34
2.2.13	Ecuación De Chezy.....	35
2.2.14	Ecuación De Manning.....	35
2.2.15	Rugosidad hidráulica	36
2.2.16	Vertederos	36
2.2.17	Introducción a la ingeniería hidráulica inca.....	38
2.2.18	Principales sistemas hidráulicos y prácticas ancestrales.....	39
2.2.19	Levantamiento topográfico LiDAR aéreo	39
2.2.20	Levantamiento Topográfico LiDAR con IPHONE 15 PRO-MAX	41
2.2.21	LSPIV	42
2.2.22	Dinámica de fluidos computacional (CFD)	45
2.2.23	FLOW – 3D	47
2.2.24	Parámetros del CFD en FLOW-3D.....	69
2.2.25	Aplicaciones del CFD en sistemas hidráulicos ancestrales	71
2.3	Hipótesis	72
2.3.1	Hipótesis General:.....	72
2.3.2	Hipótesis Específicas:.....	72
2.4	Variables.....	73
2.4.1	Identificación de variables	73

2.4.2	Operacionalización de variables	73
2.5	Definición de términos básicos:.....	74
2.5.1	Sistema hidráulico inca:	74
2.5.2	Tipón:	74
2.5.3	Dinámica de Fluidos Computacional (CFD):	74
2.5.4	Modelo matemático:	74
2.5.5	Simulación computacional:.....	74
2.5.6	Ecuaciones de Navier-Stokes:.....	74
2.5.7	Número de Reynolds:	74
2.5.8	Ecuación de continuidad:.....	75
2.5.9	Andenes:	75
2.5.10	Canal hidráulico:.....	75
2.5.11	Acueducto:	75
2.5.12	Fuente ceremonial:.....	75
2.5.13	Turbulencia:	75
2.5.14	Flujo laminar:.....	75
2.5.15	Viscosidad:.....	75
2.5.16	Presión hidrostática:.....	76
2.5.17	Caudal:	76
2.5.18	Gradiente hidráulico:	76

2.5.19	Teorema de Reynolds:.....	76
2.5.20	Malla computacional:.....	76
2.5.21	Condiciones de frontera:	76
2.5.22	FLOW-3D:	76
2.5.23	Energía hidráulica:	77
2.5.24	Perdida de carga:.....	77
3.	CAPITULO III: METOLOGIA.....	78
3.1	Ámbito de estudio: localización política y geográfica.....	78
3.2	Tipo de investigación	79
3.3	Alcance de la investigación	79
3.4	Diseño de investigación	80
3.5	Unidad de análisis	80
3.6	Población de estudio	81
3.7	Tamaño de muestra	81
3.8	Técnicas de recolección de datos	82
3.8.1	Observación	82
3.8.2	Mediciones.....	83
3.8.3	Revisión de la literatura	83
3.9	Validez y confiabilidad de instrumentos	83
3.9.1	Confiabilidad de instrumentos	83

3.9.2	Validación de instrumentos	84
3.10	Plan de análisis de datos	84
3.11	Planteamiento hidráulico e Inventarios de Canales y caídas de Tipón	84
3.12	Escaneo y levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR	87
3.12.1	Descripción de la técnica	87
3.12.2	Proceso de obtención de datos y aplicación en Tipón.....	88
3.12.3	Alcances del levantamiento	89
3.12.4	Flujograma	90
3.13	Análisis de flujo superficial (LSPIV)	91
3.13.1	Descripción de la técnica	91
3.13.2	Proceso de obtención de datos y aplicación en Tipón.....	91
3.13.3	Control de calidad, validación y alcances	94
3.13.4	Flujograma	95
3.14	Determinación de caudales utilizando el método de vertederos.....	96
3.14.1	Descripción de la técnica	96
3.14.2	Proceso de aplicación en Tipón.....	96
3.14.3	Alcances de la aplicación en Tipón.....	97
3.15	Simulación hidráulica mediante dinámica de fluidos computacional (FLOW-3D).....	97
3.15.1	Descripción de la técnica	97
3.15.2	Proceso de construcción del modelo y aplicación en Tipón	98

3.15.3	Alcances de la simulación hidráulica.....	100
3.15.4	Flujograma	101
3.16	Flujograma de la investigación:	102
4.	CAPITULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	103
4.1	Resultados respecto a los objetivos específicos.....	104
4.1.1	Caracterización topográfica mediante levantamiento LiDAR	104
4.1.2	Identificación de los materiales de construcción del sistema hidráulico de Tipón	
	113	
4.1.3	Caracterización geométrica de los canales y estructuras hidráulicas.....	115
4.1.4	Caracterización hidráulica del fluido	119
4.1.5	Caracterización hidráulica del flujo mediante métodos experimentales y simulación computacional	121
4.2	Resultados respecto al objetivo general.....	271
5.	CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	272
5.1	Descripción de los resultados obtenidos	272
5.2	Discusión de los resultados.....	275
5.3	Limitaciones del Estudio.....	277
5.4	Comparación crítica con la literatura existente.....	278
5.5	Implicancias de la investigación	280
6.	CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	283

6.1	Conclusiones:.....	283
6.2	Recomendaciones:	285
7.	BIBLIOGRAFÍA	286
8.	ANEXOS	289
8.1	Matriz de consistencia:	289
8.2	Ficha de recolección de datos llenados.....	289
8.3	Proceso De Elaboración Del Modelo De Elevación Digital (DEM) Del Parque Arqueológico En Terrasolid-Spatix.	289
8.4	Proceso del cálculo de velocidades y caudales de los canales con la metodología LSPIV En RIVER- Matlab.	289
8.5	Proceso del cálculo de velocidades y caudales de los canales con la metodología LSPIV En RIVER- Matlab.	289
8.6	Proceso de simulación cfd de las principales obras hidráulicas de tipón En FLOW - 3D 289	
8.7	Permiso	289
8.8	Panel fotográfico.....	289

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resumen propiedades extensiva e intensiva	49
Tabla 2 Resumen Significados físicos.....	49
Tabla 3 Resumen valores que toma el TTR.....	49
Tabla 4 Matriz de operacionalización de variables	73
Tabla 5 Inventario de canales y caídas de Tipón.....	86
Tabla 6 Inventario de canales y caídas de Tipón parte 2	87
Tabla 7 Cuadro de temperatura en los canales de Tipón	119
Tabla 8 Cuadro de temperatura en los canales de Tipón 2 parte.....	120
Tabla 9 Resumen (método de la sección media) Canal C-L18.....	122
Tabla 10 Resumen (método de la sección media) Canal C-L17.....	124
Tabla 11 Resumen (método de la sección media) Canal C-L16.....	126
Tabla 12 Resumen (método de la sección media) Canal C-L14.....	128
Tabla 13 Resumen (método de la sección media) Canal C-H12	130
Tabla 14 Resumen (método de la sección media) Canal C-H11	132
Tabla 15 Resumen (método de la sección media) Canal C-L15.....	134
Tabla 16 Resumen (método de la sección media) Canal C-L13.....	136
Tabla 17 Resumen (método de la sección media) Canal C-L12.....	138
Tabla 18 Resumen (método de la sección media) Canal C-L11	140
Tabla 19 Resumen (método de la sección media) Canal C-H10	142
Tabla 20 Resumen (método de la sección media) Canal C-L10.....	144
Tabla 21 Resumen (método de la sección media) Canal C-H09	146
Tabla 22 Resumen (método de la sección media) Canal C-H08.....	148
Tabla 23 Resumen (método de la sección media) Canal C-H07.....	150

Tabla 24 Resumen (método de la sección media) Canal C-H06.....	152
Tabla 25 Resumen (método de la sección media) Canal C-L08.....	154
Tabla 26 Resumen (método de la sección media) Canal C-L07.....	156
Tabla 27 Resumen (método de la sección media) Canal C-L06.....	158
Tabla 28 Resumen (método de la sección media) Canal C-L05.....	160
Tabla 29 Resumen (método de la sección media) Canal C-L04.....	162
Tabla 30 Resumen (método de la sección media) Canal C-L03.....	164
Tabla 31 Resumen (método de la sección media) Canal C-H04.....	166
Tabla 32 Resumen (método de la sección media) Canal C-D02.....	168
Tabla 33 Resumen (método de la sección media) Canal C-D01.....	170
Tabla 34 Resumen (método de la sección media) Canal C-H03	172
Tabla 35 Caudal obtenido con los vertederos	175
Tabla 36 Resumen cálculo de Froude ecuación unidimensional y FLOW 3D.....	206

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Fuerza hidrostática sobre una superficie	24
Figura 2 Descripción Lagrangiana del Flujo	26
Figura 3 Teorema de Bernoulli	29
Figura 4 Elementos geométricos de secciones de canal	32
Figura 5 Distribución de velocidad en un canal rectangular	33
Figura 6 Salto Hidráulico	34
Figura 7 Esquematización de caída vertical.....	35
Figura 8 Iphone 15 pro max.....	42
Figura 9 Teorema de Transporte de Reynolds Volúmenes de control	48
Figura 10 FAVOR.....	50
Figura 11 VOF.....	51
Figura 12 Cubo para poder entender la discretización	55
Figura 13 Relación esfuerzo cortante y gradiente de velocidad, Conservación de momento ...	64
Figura 14 Mapa topográfico y foto aérea del parque arqueológico de Tipón.....	78
Figura 15 Imagen satelital del parque arqueológico de Tipón.....	81
Figura 16 Mapa de inventario de canales y caídas en Tipón	85
Figura 17 Flujograma del levantamiento topográfico con LiDAR.....	90
Figura 18 Flujograma del LSPIV.....	95
Figura 19 Flujograma del FLOW-3D	101
Figura 20 Flujograma de la investigación.....	102
Figura 21 Nube de puntos del complejo arqueológico de Tipón	105
Figura 22 Nube de puntos clasificado y nube de puntos del terreno de Tipón.	106
Figura 23 Superficie del terreno propia y modelo de elevación digital (DEM) de Tipón	107

Figura 24 Curvas de Nivel a 1 metro de Tipón	107
Figura 25 Modelo de elevación digital (DEM) capa ráster en formato TIF	108
Figura 26 Nube de puntos de la zona turística del complejo arqueológico de Tipón.....	109
Figura 27 Nube de puntos clasificado y nube de puntos del terreno de Tipón	109
Figura 28 Modelo de elevación digital (DEM) de Tipón zona turística.	111
Figura 29 Curvas de Nivel a 1 metro de Tipón zona turística.	111
Figura 30 Modelo de elevación digital (DEM) capa ráster en formato TIF	112
Figura 31 Escaneo con LiDAR de mano canal principal de Tipón	116
Figura 32 Detalle del canal de Tipon escaneado con LiDAR manual.....	116
Figura 33 Escaneo con LiDAR de mano acueducto principal de Tipón.....	117
Figura 34 Detalles del acueducto principal de Tipón escaneado con LiDAR.	117
Figura 35 Escaneo con LiDAR de mano caída terraza 2 de Tipón.....	118
Figura 36 Escaneo con LiDAR de mano templo del agua de Tipón	118
Figura 37 Gráfico perfil de velocidad canal C-L18	123
Figura 38 Gráfico perfil de caudal canal C-L18.....	123
Figura 39 Gráfico perfil de velocidad canal C-L17	125
Figura 40 Gráfico perfil de caudal canal C-L1	125
Figura 41 Gráfico perfil de velocidad canal C-L16	127
Figura 42 Gráfico perfil de caudal canal C-L16	127
Figura 43 Gráfico perfil de velocidad canal C-L14	129
Figura 44 Gráfico perfil de velocidad canal C-L14	129
Figura 45 Gráfico perfil de velocidad canal C-H12.....	131
Figura 46 Gráfico perfil de caudal canal C-H12	131

Figura 47 Gráfico perfil de velocidad canal C-H11	133
Figura 48 Gráfico perfil de caudal canal C-H11.....	133
Figura 49 Gráfico perfil de velocidad canal C-L15	135
Figura 50 Gráfico perfil de caudal canal C-L15	135
Figura 51 Gráfico perfil de velocidad canal C-L13	137
Figura 52 Gráfico perfil de caudal canal C-L13	137
Figura 53 Gráfico perfil de velocidad canal C-L12	139
Figura 54 Gráfico perfil de caudal canal C-L12	139
Figura 55 Gráfico perfil de velocidad canal C-L11.....	141
Figura 56 Gráfico perfil de caudal canal C-L11	141
Figura 57 Gráfico perfil de velocidad canal C-H10.....	143
Figura 58 Gráfico perfil de caudal canal C-H10	143
Figura 59 Gráfico perfil de velocidad canal C-L10	145
Figura 60 Gráfico perfil de caudal canal C-L10	145
Figura 61 Gráfico perfil de velocidad canal C-H09.....	147
Figura 62 Gráfico perfil de caudal canal C-H09	147
Figura 63 Gráfico perfil de velocidad canal C-H08.....	149
Figura 64 Gráfico perfil de caudal canal C-H08	149
Figura 65 Gráfico perfil de velocidad canal C-H07.....	151
Figura 66 Gráfico perfil de caudal canal C-H07	151
Figura 67 Gráfico perfil de velocidad canal C-H06	153
Figura 68 Gráfico perfil de caudal canal C-H06	153
Figura 69 Gráfico perfil de velocidad canal C-L08	155

Figura 70 Gráfico perfil de caudal canal C-L08	155
Figura 71 Gráfico perfil de velocidad canal C-L07	157
Figura 72 Gráfico perfil de caudal canal C-L07	157
Figura 73 Gráfico perfil de velocidad canal C-L06	159
Figura 74 Gráfico perfil de caudal canal C-L06	159
Figura 75 Gráfico perfil de velocidad canal C-L05	161
Figura 76 Gráfico perfil de caudal canal C-L05	161
Figura 77 Gráfico perfil de velocidad canal C-L04	163
Figura 78 Gráfico perfil de caudal canal C-L04	163
Figura 79 Gráfico perfil de velocidad canal C-L03	165
Figura 80 Gráfico perfil de caudal canal C-L03	165
Figura 81 Gráfico perfil de velocidad canal C-H04	167
Figura 82 Gráfico perfil de caudal canal C-H04	167
Figura 83 Gráfico perfil de velocidad canal C-D02	169
Figura 84 Gráfico perfil de caudal canal C-D02	169
Figura 85 Gráfico perfil de velocidad canal C-D01	171
Figura 86 Gráfico perfil de caudal canal C-D01	171
Figura 87 Gráfico perfil de velocidad canal C-H03	173
Figura 88 Gráfico perfil de caudal canal C-H03	173
Figura 89 Canal C-L06, canal simulado	176
Figura 90 Canal C-L16, Antes de la caída simulada	176
Figura 91 Canal pequeño del Templo del agua	177
Figura 92 Canal pequeño del Templo del agua	177

Figura 93 Gráfico del Caudal en los 60 segundos de Simulación.....	181
Figura 94 Isosuperficie de la Velocidad al inicio y al final del canal simulado.....	182
Figura 95 Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+00 – 0+03)m.....	184
Figura 96 Perfil longitudinal de la velocidad más vectores progresiva (0+03 – 0+08)m	185
Figura 97 Perfil longitudinal de la velocidad más vectores progresiva (0+08 – 0+12)m	186
Figura 98 Perfil longitudinal de la velocidad más vectores progresiva (0+12 – 0+16) m	187
Figura 99 Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+16 – 0+20) m.....	188
Figura 100 Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+20 – 0+24)m.....	189
Figura 101 Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+24 – 0+28)m.....	190
Figura 102 Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+28 – 0+31)m.....	191
Figura 103 Corte transversal de la Isosuperficie de velocidad más vectores progresiva 0+01m	192
Figura 104 Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva (0+00 – 0+08)m	193
Figura 105 Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva (0+08 – 0+16)m	194
Figura 106 Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva (0+16 – 0+24)m	195
Figura 107 Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva (0+24 – 0+31)m	196
Figura 108 Isosuperficie Número de Froude Vista al inicio y al final del tramo del canal simulado.....	198
Figura 109 Perfil longitudinal del Número de Froude Progresiva (0+00 – 0+03)m.....	199

Figura 110 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+00 – 0+03)m	200
Figura 111 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+03 – 0+08)m	200
Figura 112 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+08 – 0+12)m	201
Figura 113 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+12 – 0+16)m	201
Figura 114 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+16 – 0+20)m	202
Figura 115 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+20 – 0+24)m	202
Figura 116 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+24 – 0+28)m	203
Figura 117 Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+28 – 0+31)m	203
Figura 118 Corte transversal Número de Froude progresiva 0+01m	204
Figura 119 Corte transversal al inicio y final del canal cada 2 metros del número de Froude	205
Figura 120 Comparación Canal real y Canal simulado.....	208
Figura 121 Gráfico del caudal 0.026m ³ /s a lo largo del recorrido del acueducto simulado .	210
Figura 122 Isosuperficie de Velocidad Acueducto al inicio y final de tramo simulado.....	211
Figura 123 Isosuperficie velocidad la parte donde ocurre contracción hidráulica	213
Figura 124 Corte longitudinal Velocidad y vectores en la parte de la contracción Hidráulica.	215
Figura 125 Cortes transversales más vectores cada 0.5m en la zona de la contracción hidráulica.....	216
Figura 126 Corte transversal más vectores vista en planta zona de contracción hidráulica..	217
Figura 127 Isosuperficie velocidad en la zona del resalto hidráulico.....	219
Figura 128	221

Figura 129 Corte Transversal más vectores velocidad cada 0.5m en la parte del resalto Hidráulico	222
Figura 130 Corte transversal más vectores vista en planta zona de resalto hidráulico.....	223
Figura 131 Isosuperficie Tirante vista al inicio y final del acueducto simulado.....	224
Figura 132 Isosuperficie Tirante zona de contracción hidráulica.....	225
Figura 133 Perfil longitudinal Tirante zona de contracción hidráulica.....	226
Figura 134 Corte transversal Tirante zona de contracción hidráulica.	227
Figura 135 Isosuperficie Tirante zona de resalto hidráulico.....	228
Figura 136 Perfil longitudinal Tirante zona de resalto hidráulico.....	229
Figura 137 Corte transversal Tirante cada 0.5m zona de resalto hidráulico.....	230
Figura 138 Gráfico Promedio del Tirante para los 90 segundos de simulación del acueducto	231
Figura 139 Isosuperficie número de Froude al inicio y final del acueducto simulado	233
Figura 140 Isosuperficie número de Froude al inicio y final del acueducto simulado	233
Figura 141 Isosuperficie número de Froude zona de contracción hidráulica.....	234
Figura 142 Perfil Longitudinal número de Froude zona de contracción hidráulica.....	235
Figura 143 Corte transversal Numero de Froude zona de Contracción Hidráulica.....	236
Figura 144 Isosuperficie Numero de Froude zona de Resalto Hidráulico	237
Figura 145 Perfil Longitudinal Numero de Froude zona de Resalto Hidráulico	238
Figura 146 Corte Transversal Numero de Froude zona de Resalto Hidráulico	239
Figura 147 Gráfico Promedio del Número de Froude para los 90 segundo simulados	240
Figura 148 Comparación realidad y simulación tridimensional.....	241
Figura 149 Gráfico del Caudal 0.0105m³/s (10.5L/s) en los 90 segundos simulados	243

Figura 150 Isosuperficie Velocidad más Líneas de corriente en toda la caída.....	244
Figura 151 Vista en Planta y perfil de Isosuperficie de Curva S del canal antes de la caída.	245
Figura 152 Vectores de velocidad en el canal de curva S antes de la caída.....	246
Figura 153 Isosuperficie de Velocidad Vista de Frente y Perfil de la caída y rompe presión .	247
Figura 154 Vectores velocidad caída y rompe presión	248
Figura 155 Vectores de velocidad en romper presión vista de perfil.....	249
Figura 156.....	250
Figura 157 Vectores de Velocidad Zona de la posa y canal después de la caída	251
Figura 158 Isosuperficie del Número de Froude en toda la caída	252
Figura 159 Isosuperficie Número de Froude canal con curva S antes de la caída.....	253
Figura 160 Isosuperficie Número de Froude Vista de Frente y Perfil en la Caída y Rompe presión.....	254
Figura 161 Isosuperficie Número Froude Vista de Frente y Perfil Posa y Canal después de la Caída.....	256
Figura 162 Isosuperficie Tirante en Canal con curva S antes de la caída.....	258
Figura 163 Isosuperficie Tirante en la caída y rompe presión.	259
Figura 164 Isosuperficie Tirante en la posa y canal después de la caída	260
Figura 165 Comparación Realidad y simulación Tridimensional.....	261
Figura 166 Gráfico de Caudal al inicio del recorrido del templo del agua.....	263
Figura 167 Gráfico de caudal en los 2 canales que continúan el recorrido del flujo	264
Figura 168 Grafico de caudal en la salida de los 4 canales que acaban en caídas pequeñas	265
Figura 169 Gráfico de caudal a la salida del templo del agua	266
Figura 170 Isosuperficie de Velocidad Templo del Agua.....	268

Figura 171 Número de Froude en el templo del agua 269

Figura 172 Comparación simulación 3D vs imagen real del templo del agua 270

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo principal evaluar las características del sistema hidráulico inca mediante el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco. La importancia de Tipón radica en su dominio avanzado de la ingeniería hidráulica y civil.

La metodología empleada consistió en una estrategia integral que articuló levantamientos topográficos LiDAR de alta resolución, mediciones experimentales en campo mediante Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV) y el método de vertederos, y el modelamiento numérico tridimensional utilizando el software FLOW-3D. El uso de la tecnología LiDAR permitió generar modelos digitales del terreno para definir la geometría real de las estructuras. Por su parte, la técnica LSPIV y los vertederos proporcionaron datos de velocidad superficial y caudales esenciales para calibrar y validar las simulaciones computacionales.

Los resultados demostraron que el sistema hidráulico de Tipón mantiene condiciones de flujo estables y una disipación de energía eficiente a través de sus 13 terrazas y canales principales. Las simulaciones confirmaron que el sistema opera predominantemente en un régimen subcrítico ($Fr < 1$), garantizando la estabilidad en la conducción del agua con caudales que varían entre 4 L/s y 30 L/s.

Se concluye que el sistema de Tipón constituye una obra maestra de la ingeniería ancestral, cuyo diseño empírico evidencia un conocimiento profundo de la mecánica de fluidos, ofreciendo soluciones de gestión hídrica sostenibles que siguen siendo válidas para la ingeniería contemporánea.

Palabras clave: Ingeniería hidráulica inca, Tipón, CFD, FLOW-3D, LiDAR, LSPIV.

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the characteristics of the Inca hydraulic system using Computational Fluid Dynamics (CFD) at the Tipón Archaeological Park in Cusco, The significance of Tipón lies in its advanced mastery of hydraulic and civil engineering,

The methodology employed consisted of an integrated strategy that articulated high-resolution LiDAR topographic surveys, experimental field measurements using Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) and the weir method, and three-dimensional numerical modeling using FLOW-3D software, The use of LiDAR technology allowed for the generation of digital terrain models to define the real geometry of the structures, Furthermore, the LSPIV technique and weirs provided surface velocity and flow rate data essential for calibrating and validating the computer simulations.

The results demonstrated that the Tipón hydraulic system maintains stable flow conditions and efficient energy dissipation through its 13 terraces and main canals, Simulations confirmed that the system operates predominantly in a subcritical regime ($Fr < 1$), ensuring stability in water conveyance with flow rates ranging from 4 L/s to 30 L/s.

It is concluded that the Tipón system constitutes an ancestral engineering masterpiece, whose empirical design evidence a profound knowledge of fluid mechanics, offering sustainable water management solutions that remain valid for contemporary engineering,

Keywords: Inca hydraulic engineering, Tipón, CFD, FLOW-3D, LiDAR, LSPIV.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

El Parque Arqueológico de Tipón representa uno de los ejemplos más notables del dominio que alcanzaron los incas en materia de ingeniería hidráulica y civil, evidenciando un profundo conocimiento técnico y una capacidad para planificar, construir y gestionar infraestructuras complejas en armonía con el entorno natural. La magnitud, eficiencia y adaptación de su sistema hidráulico al paisaje andino lo han convertido en un referente histórico y científico que despierta admiración en investigadores nacionales e internacionales. Ortloff (2022) destaca que Tipón constituye un caso ejemplar del conocimiento avanzado de los incas en estas disciplinas, cuyas prácticas presentan similitudes relevantes con los enfoques empleados en la ingeniería civil contemporánea (p. 1). Asimismo, el Ministerio de Cultura (2015) ha señalado que la singularidad de Tipón radica en la integración entre función hidráulica, arquitectura y simbolismo, lo que confirma el carácter multifacético de esta obra.

Debido a su importancia, el Parque Arqueológico de Tipón ha sido objeto de diversas investigaciones orientadas a su descripción, interpretación y valoración desde enfoques arqueológicos, arquitectónicos e hidráulicos. Estos estudios han permitido caracterizar la disposición general de los canales, la geometría básica de sus estructuras y el funcionamiento hidráulico a nivel conceptual, generalmente a partir de secciones idealizadas y análisis locales, considerando caudales constantes evaluados mediante enfoques hidráulicos simplificados tales como modelos unidimensionales y aproximaciones empíricas. En consecuencia, dichos enfoques, al basarse en representaciones idealizadas y supuestos de flujo permanente, no permiten capturar de forma explícita la variabilidad espacial del flujo, los gradientes de velocidad y presión, ni los

efectos tridimensionales vinculados a la geometría real de las estructuras, como la turbulencia, la disipación de energía y la formación de zonas de recirculación.

En este contexto, la presente investigación propone una estrategia metodológica que integra levantamientos topográficos de alta resolución mediante drones y sensores LiDAR, mediciones hidráulicas en campo a través de técnicas como LSPIV y vertederos, y modelamiento tridimensional del flujo mediante el software FLOW-3D (Flow Science, Inc., 2023). La articulación de estas herramientas permite contrastar los resultados experimentales obtenidos en campo con simulaciones numéricas avanzadas, posibilitando un análisis integral que trasciende la descripción individual de estructuras y se orienta a la comprensión de la interacción entre el diseño arquitectónico, el comportamiento hidráulico y el paisaje. Bajo esta perspectiva, la tesis aporta un avance metodológico en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en contextos arqueológicos y patrimoniales, generando insumos técnicos que contribuyen a la conservación preventiva y a la valoración del sitio. De este modo, se amplía el conocimiento científico sobre el sistema hidráulico de Tipón y se consolida su estudio como referente de la ingeniería hidráulica ancestral a nivel nacional e internacional.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿Cómo son las características que describen el sistema hidráulico inca utilizando la dinámica de fluidos computacional en el parque arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

1.2.2 Problemas Específicos

¿Cómo es la topografía del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

¿Cuáles son los Materiales de conformación de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

¿Cuáles son las características geométricas de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

¿Cuáles son las propiedades del fluido del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

¿Cuáles son las características del flujo del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?

1.3 Justificación De La Investigación

1.3.1 Justificación social

La relevancia social de la presente investigación radica en fomentar el estudio y la valorización de la ingeniería hidráulica inca, reconociendo su eficiencia como un sistema de riego ecológico y sostenible. Su aplicación podría ser de gran utilidad en regiones del país donde el recurso hídrico es limitado, como en la costa peruana, contribuyendo así a mejorar la gestión del agua en contextos vulnerables mediante soluciones inspiradas en tecnologías ancestrales adaptadas al entorno.

Asimismo, los resultados obtenidos permitirán no solo una mayor comprensión del legado hidráulico incaico, sino también la promoción de su estudio y difusión a nivel nacional e internacional, incentivando el turismo cultural y el interés académico en torno a la ingeniería prehispánica.

1.3.2 Justificación práctica

La presente investigación se justifica en el plano práctico porque aplica conocimientos y herramientas de la ingeniería civil, como el modelamiento computacional mediante dinámica de

fluidos (CFD), para el estudio de un sistema hidráulico ancestral de gran relevancia. Analizar el funcionamiento de las estructuras hidráulicas de Tipón permite establecer comparaciones con los diseños y criterios empleados en la ingeniería moderna, lo cual contribuye a fortalecer el entendimiento de soluciones técnicas desarrolladas siglos atrás y a valorar su vigencia en contextos actuales.

Asimismo, comprender el comportamiento de los canales de Tipón puede generar conocimientos útiles para el estudio de otras infraestructuras hidráulicas tradicionales, como las amunas. Estas tecnologías ancestrales, que actualmente se investigan en proyectos de infraestructura natural para la gestión del agua, ya que estos presentan principios hidráulicos similares que pueden enriquecerse con la evidencia cuantitativa derivada de este trabajo. En esa línea, la investigación ofrece elementos prácticos para la gestión sostenible de los recursos hídricos en la región andina y su articulación con soluciones de ingeniería contemporánea.

1.3.3 Justificación Teórica

Las investigaciones desarrolladas sobre el sistema hidráulico del Parque Arqueológico de Tipón han demostrado que el diseño inca logró un manejo eficiente del agua mediante el control de caudales, la regulación de pendientes y la estabilidad del flujo en los canales. Estudios como los de Wright y Ortloff han contribuido con descripciones detalladas de las estructuras y con análisis hidráulicos a nivel conceptual, generalmente sustentados en geometrías idealizadas, secciones representativas y enfoques bidimensionales o unidimensionales. Si bien estos aportes han sido fundamentales para explicar el funcionamiento general del sistema, no permiten describir con suficiente detalle los procesos hidrodinámicos internos que determinan el comportamiento real del flujo.

En este marco, la dinámica de fluidos computacional (CFD) se justifica teóricamente como una herramienta necesaria para superar dichas limitaciones, ya que permite resolver de forma tridimensional el campo de velocidades, presiones, pérdidas de energía y regímenes de flujo a partir de la geometría real del sistema. La aplicación de CFD posibilita analizar la interacción entre el diseño constructivo y el comportamiento hidráulico con un nivel de detalle que no puede ser alcanzado mediante métodos hidráulicos tradicionales, facilitando la extracción del conocimiento hidráulico implícito en las soluciones de ingeniería inca. De este modo, la investigación contribuye al desarrollo teórico de la hidráulica aplicada a sistemas ancestrales, integrando enfoques de la ingeniería moderna desde una perspectiva cuantitativa y replicable.

1.3.4 Justificación Metodológica

La presente investigación propone una metodología integral e innovadora al aplicar herramientas avanzadas de dinámica de fluidos computacional (CFD) en el análisis de un sistema hidráulico perteneciente al Parque arqueológico de Tipón. Este enfoque permite explorar en profundidad el comportamiento hidráulico del sistema incaico desde una perspectiva técnica y cuantificable. Para garantizar la precisión y fiabilidad de los datos utilizados en el modelamiento, se incorpora un levantamiento topográfico de alta resolución mediante tecnología LiDAR, lo que permite representar fielmente la geometría del terreno.

Complementariamente, se aplican metodologías de validación en campo como LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) y cálculo de caudales con vertederos, con el fin de obtener mediciones reales de caudal y velocidad del flujo. Esta combinación de técnicas asegura la validez y consistencia de los resultados, constituyendo una base metodológica sólida que puede ser replicada en futuras investigaciones de carácter interdisciplinario vinculadas al estudio de sistemas hidráulicos ancestrales.

1.3.5 Justificación Ambiental

El sistema hidráulico del Parque Arqueológico de Tipón constituye un ejemplo destacado de infraestructura ancestral concebida para interactuar de manera armónica con el entorno natural, regulando el uso del agua y minimizando impactos ambientales. Estas soluciones hidráulicas guardan estrecha relación con principios aplicados en infraestructuras tradicionales como las amunas, las cuales permiten la regulación de caudales, la recarga hídrica natural y la mitigación de procesos erosivos. En este sentido, comprender el funcionamiento hidráulico de Tipón permite rescatar conocimientos ancestrales que mantienen vigencia frente a los actuales desafíos de gestión sostenible del recurso hídrico.

La aplicación de herramientas modernas de análisis, como la dinámica de fluidos computacional (CFD), posibilita profundizar en la comprensión de estos sistemas desde una perspectiva cuantitativa, identificando zonas de concentración de energía, patrones de flujo y condiciones hidráulicas críticas. Este enfoque contribuye a vincular el conocimiento del pasado con las necesidades del presente, aportando criterios técnicos que pueden ser considerados en el diseño y fortalecimiento de infraestructuras naturales orientadas a la adaptación al cambio climático, la conservación ambiental y la gestión integrada del agua.

1.4 Objetivo de la investigación

1.4.1 Objetivo general

Evaluar las características que describen el sistema hidráulico inca empleando la dinámica de fluidos computacional en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

1.4.2 Objetivo específico

Determinar la topografía del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

Identificar los materiales de conformación de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

Determinar las características geométricas de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

Determinar las propiedades del fluido del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024.

Determinar las características del flujo del sistema hidráulico inca en el parque arqueológico de Tipón, cusco 2024.

1.5 Delimitación del problema

1.5.1 Delimitación espacial

La presente investigación se desarrolla en el Parque Arqueológico de Tipón, ubicado en el distrito de Choquepata, provincia de Quispicanchi, departamento del Cusco, Perú. El estudio se enfoca en el sistema hidráulico inca que conforma este complejo arqueológico, delimitándose al análisis de sus canales y estructuras hidráulicas superficiales, los cuales constituyen los elementos principales del sistema de conducción y distribución del agua.

El ámbito espacial de la investigación abarca la plaza ceremonial y las principales estructuras hidráulicas del conjunto arqueológico, incluyendo el canal principal, el acueducto principal, una caída de agua de relevancia hidráulica y el denominado Templo del Agua, así como las zonas de captación, distribución y almacenamiento del recurso hídrico, consideradas como unidades funcionales que permiten analizar la lógica de diseño y funcionamiento del sistema; el estudio se limita a las áreas accesibles y visibles, excluyéndose aquellas estructuras no expuestas o de difícil acceso, con el fin de centrar el análisis en los elementos de mayor representatividad hidráulica.

1.5.2 Delimitación temporal

La presente tesis aborda el estudio del sistema hidráulico del Parque Arqueológico de Tipón, una obra construida durante el periodo incaico que continúa siendo objeto de análisis en la actualidad por su eficiencia en el manejo del recurso hídrico. Las actividades de levantamiento de información, mediciones hidráulicas en campo y modelamiento hidráulico, incluyendo el uso de tecnología LiDAR, metodología LSPIV y herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD), se desarrollarán durante el año 2024.

1.5.3 Delimitación teórica

El presente proyecto de investigación se enfoca en la evaluación del sistema hidráulico del Parque Arqueológico de Tipón desde una perspectiva cuantitativa, integrando conceptos de la ingeniería hidráulica ancestral con herramientas modernas de análisis propias de la ingeniería contemporánea. El estudio teórico del comportamiento hidráulico se aborda a partir de levantamientos topográficos de alta precisión mediante tecnología LiDAR, la caracterización del flujo superficial mediante la metodología LSPIV y mediciones hidráulicas en campo, así como el modelamiento numérico tridimensional utilizando el software FLOW-3D, basado en la dinámica de fluidos computacional (CFD).

El análisis se centra en la simulación y evaluación de la distribución de velocidades, presiones, tirantes hidráulicos, líneas de corriente y números de Froude, con el fin de caracterizar el régimen y comportamiento hidráulico del sistema bajo condiciones controladas; se excluyen modelos de flujo multifásico, transporte de sedimentos, erosión y morfodinámica, así como enfoques simbólicos o arqueológicos, limitándose el estudio al análisis funcional e ingenieril del flujo de agua como fase única mediante principios de la hidráulica clásica y la modelación numérica.

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la investigación

2.1.1 Antecedente local

Arangoitia Valdivia (2020) realiza su tesis 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**” donde aborda el tema de la escasez del agua dulce y evalúa la eficiencia del sistema de riego inca de Tipón considerando la concepción del sistema y sus obras de infraestructura hidráulicas con un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo).

Objetivo: Identificar y determinar los niveles de eficiencia hídrica, alcanzados por el sistema de riego inca de Tipón, considerando la concepción del sistema y el diseño de sus obras de infraestructura hidráulica.(Arangoitia Valdivia, 2020).

Conclusión: La eficiencia del sistema de riego inca de Tipón, teniendo en cuenta las eficiencias de captación, conducción y distribución, detalladas precedentemente, fue estimada en 94.1%.(Arangoitia Valdivia, 2020).

2.1.2 Antecedentes nacionales

Díaz Vilca & Morales Pino (2021) realizan 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 a través de simulaciones de modelos numéricos CFD en el software OpenFOAM para validar y complementar los estudios experimentales y contribuir con la mejora de futuros diseños.

Objetivo: analizar el comportamiento hidráulico de vertederos de perfil tipo creager empleando modelos numéricos CFD en el software FLOW-3D a partir de modelos experimentales.(Díaz Vilca & Morales Pino, 2021)

Conclusión: Se generaron cuatro modelos numéricos CFD en OpenFOAM para analizar el comportamiento hidráulico de vertederos tipo creager: vertedero 01 ($P=0.20m$), vertedero 02 ($P=0.30m$), vertedero 03 ($P=0.225m$) y vertedero 04 ($P=0.3125m$). Ofreció resultados favorables comparables con estudios experimentales previos.(Díaz Vilca & Morales Pino, 2021).

(López Fry & Chung Benites, 2023) realiza en su tesis “**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN VERTEDERO TRIANGULAR Y MODELACIÓN CON OpenFOAM** ” el análisis comparativo del comportamiento hidráulico de un vertedero triangular de pared delgada, específicamente la carga hidráulica, entre un ensayo experimental realizado en el laboratorio de hidráulica de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y un modelo numérico para determinar su semejanza y sus futuras aplicaciones en el campo. El modelo numérico se desarrolló con la técnica de dinámica de fluidos computacional – CFD.

Objetivo: Realizar una simulación experimental de un vertedero triangular, para luego simularlo utilizando el enfoque de Dinámica de Flujo Computacional (CFD) en el programa OpenFOAM para comparar los resultados obtenidos.(López Fry & Chung Benites, 2023)

Conclusión: Con los resultados obtenidos en la simulación con el programa OpenFOAM, se puede apreciar una gran similitud en los resultados con los obtenidos en el ensayo experimental. De esta manera, podemos afirmar que OPENFOAM es una herramienta apropiada para representar futuros modelos de un vertedero triangular y las condiciones del flujo.(López Fry & Chung Benites, 2023).

Cruzado Mendoza (2023) hace un proyecto de investigación para la Universidad Nacional de Cajamarca titulada “**EFICIENCIA DE SEDIMENTACIÓN PARA DIFERENTES CAUDALES EN UN DESARENADOR TIPO TANQUE APLICANDO MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL CASO EL RONQUILLO – CAJAMARCA**” donde determina la eficiencia de sedimentación aplicando modelamiento numérico tridimensional con el paquete solucionador de CFD OpenFOAM en el desarenador de la bocatoma “El ronquillo”.

Objetivo: Estimar la eficiencia de sedimentación utilizando diferentes caudales en el desarenador tipo tanque de la captación El Ronquillo aplicando modelación numérica tridimensional(Cruzado Mendoza, 2023).

Conclusión: Se determinó la eficiencia de sedimentación para diferentes granos según los resultados del análisis de sedimentos muestreados, usando diferentes metodologías, las cuales dieron el mismo resultado: a mayor caudal de operación, mayor velocidad de flujo y menor eficiencia de sedimentación(Cruzado Mendoza, 2023).

Valdez Castañeda (2019) da a conocer su investigación “**EVALUACIÓN, MEJORAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DEL SISTEMA DE LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN DE SAN JOSÉ APLICANDO MODELOS CFD – LAMBAYEQUE, 2017**” Esta investigación se basó en la utilización de herramientas modernas para auditar el comportamiento hidráulico y, en efecto, la eficiencia de sistemas de lagunas de estabilización. La herramienta utilizada es la modelación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional, en español), la cual, según numerosos autores, es bastante fiable para predecir fenómenos hidráulicos, incluyendo los de las lagunas de estabilización.

Objetivo: evaluar, mejorar y optimizar las condiciones hidrodinámicas de un circuito representativo de lagunas del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de la ciudad de

Chiclayo aplicando modelos basados en la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)(Valdez Castañeda, 2019)

Conclusión: La topografía del Sistema de Lagunas de Estabilización de San José fue fundamental para modelar CFD y estimar volúmenes y tiempos de retención. La carencia de datos precisos de la EPS señala la urgencia de expansiones debido al crecimiento poblacional. (Valdez Castañeda, 2019).

2.1.3 Antecedentes internacionales

Orloff (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.

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).

Wright et al. (2021) escriben el libro “**TIPÓN: WATER ENGINEERING MASTERPIECE OF THE INCA EMPIRE**” que lleva al lector a apreciar el entorno y función de Tipón, detallando su hidrología, su manejo del agua y su diseño de ingeniería hidráulica a través de estudios topográficos, despeje del área, medición de las estructuras, cartografía de tres canales abandonados y evaluación del sistema de riego.

Objetivo: Entender cómo los ingenieros prehistóricos gestionaban el suministro de agua del sitio, logrando un equilibrio perfecto, creando una obra maestra de manejo del agua y una infraestructura que formaba una finca para la nobleza inca.(Wright et al., 2021)

Conclusión: Se descubrió que los ingenieros incas sabían mucho sobre el uso beneficioso de la tierra y el agua para el desarrollo comunitario, conociendo muchas de las técnicas que la ingeniería hidráulica moderna usa. (Wright et al., 2021).

Gullberg (2017) redacta un informe “**COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS IN FLOW-3D**” donde explica como realizar una modelación computacional en FLOW-3D realizando diferentes tipos de mallas, introduciéndonos al mundo del modelamiento en FLOW-3D.

Objetivo: Ofrecer una comprensión exhaustiva y profunda del proceso de generación de mallas y su impacto en la calidad dentro del ámbito de la dinámica de fluidos computacional (CFD), específicamente utilizando la plataforma FLOW-3D. (Gullberg, 2017).

Conclusión: La calidad de la malla generalmente se mide mediante cuatro métricas: no ortogonalidad, skewness, relación de aspecto y suavidad. Existen varias formas de crear mallas para simulaciones en FLOW-3D. el método más fácil de usar para mallas estructuradas de

hexaedros. Sin embargo, para geometrías altamente complejas, es necesario utilizar métodos de generación automática, como la utilidad snappyHexMesh.

Anderson (1995) publica el libro “**COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: THE BASICS WITH APPLICATIONS**” que es una guía para los que inician en el modelamiento empleando CFD, explica la derivación y el significado físico de las ecuaciones básicas de la dinámica de fluidos, técnicas de discretización numérica y aplicaciones gráficas en CFD. También trata la aplicación de CFD a problemas clásicos y analiza algoritmos avanzados y sus aplicaciones.

Objetivo: El propósito de este libro es ofrecer una introducción clara y completa a la dinámica de fluidos computacional (CFD), cubriendo tanto los principios teóricos como las aplicaciones prácticas en distintas ramas de la ingeniería.(Anderson, 1995).

Conclusión: Los CFD son una industria en crecimiento, con un número ilimitado de nuevas aplicaciones e ideas, el dominio de estas técnicas permite a los ingenieros mejorar diseños y procesos en diversas áreas(Anderson, 1995)

Sassetti Mendes (2021) realiza un trabajo de investigación “**MODELADO COMPUTACIONAL DE DINÁMICA DE FLUIDOS DE FLUJOS EN ALIVIADEROS DE CANAL**” donde realiza el diseño de un aliviadero con ayuda de las herramientas de la dinámica de fluidos computacional en FLOW-3D, demostrando la eficiencia de este programa y detallando paso a paso su modelamiento y funcionamiento del aliviadero en el programa.

Objetivo: Validar el modelo Volumen de fluido de dos fases para flujos en aliviaderos, comprendiendo un análisis de sensibilidad a la resolución de malla y a los modelos de turbulencia;(Sassetti Mendes, 2021)

Conclusión: El camino de la investigación condujo al desarrollo de un modelo numérico. para flujos aireados. Esta tarea resultó extremadamente exigente pero esencial. Además, se prestó

extraordinaria atención a la calibración y validación procesos. Finalmente, quedó claro que un análisis adecuado de otros se deben realizar modelos numéricos.(Sassetti Mendes, 2021)

2.2 Bases teóricas

2.2.1 *Hidráulica y mecánica de fluidos*

El agua es un recurso esencial para la vida y el desarrollo de las civilizaciones. En la actualidad, su gestión adecuada se ha convertido en un objetivo prioritario, especialmente en contextos de escasez, creciente demanda y cambio climático. Para lograr un uso eficiente del recurso hídrico, es fundamental comprender las leyes físicas que rigen su comportamiento, lo cual se logra a través del estudio de la hidráulica y la mecánica de fluidos.

Ambas disciplinas forman la base científica de la ingeniería hidráulica, y son claves para el diseño, análisis y evaluación de sistemas de transporte, captación y distribución de agua, tanto en infraestructuras modernas como en estudios de sistemas antiguos, como el caso del sistema hidráulico incaico de Tipón.

2.2.1.1 Hidráulica

“La hidráulica es la parte de la física que estudia la mecánica de los fluidos, analiza las leyes que rigen el movimiento de los líquidos y las técnicas para el mejor aprovechamiento de las aguas” (Giles et al., 1994).

2.2.1.2 Mecánica de fluidos

“La mecánica de fluidos es la disciplina del amplio campo de la mecánica aplicada que estudia el comportamiento de líquidos y gases en reposo o movimiento” (Munson et al., 1994).

“La mecánica de fluidos estudia el comportamiento de los fluidos que pueden ser líquidos (como agua, aceite, gasolina o glicerina) o gases (como aire, oxígeno, nitrógeno o helio).”(Mott, 1996).

2.2.2 *Fluidos*

“Los fluidos son sustancias capaces de fluir y que se adaptan a la forma de los recipientes que los contienen. Cuando están en equilibrio, los fluidos no pueden soportar fuerzas tangenciales o cortantes. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma” (Giles et al., 1994).

Otra definición de fluido es: “Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar que tan pequeño sea este esfuerzo cortante. Un esfuerzo cortante es la componente de fuerza tangente a una superficie” (Streeter, 2002).

2.2.2.1 Propiedad de los fluidos

“Una de las primeras cuestiones necesarias a investigar es la diferencia entre un fluido y un sólido, se tiene una vaga idea general que un sólido es duro y no se deforma mientras que un fluido es suave y se deforma con facilidad” (Munson et al., 1994).

Pero una respuesta más acertada es: “Los sólidos (acero, concreto) tienen moléculas muy juntas con fuertes fuerzas de cohesión, lo que les da rigidez. En los fluidos (agua, aceite), las moléculas están más separadas y con menores fuerzas intermoleculares, permitiendo mayor libertad de movimiento” (Munson et al., 1994).

Conociendo esto es necesario definir las propiedades de los fluidos para entender su comportamiento.

2.2.2.1.1 Presión

“La presión en un punto es causada por una fuerza normal que empuja contra un plano definido en el fluido o contra una superficie plana que está en contacto con el fluido. La presión en un punto es la relación entre la fuerza normal y el área del plano a medida que dicha área se aproxima a un valor muy pequeño que incluya el punto” (Mott, 1996).

“La presión "P", tiene unidades de fuerza entre área ($N \cdot m^{-2}$) denominadas pascales en el sistema SI. La presión también se puede expresar en términos de la altura equivalente "h" de una columna de fluido.” (Mott, 1996).

$$P = \frac{dF}{dA} \quad (1)$$

Donde:

P = Presion ($N \cdot m^{-2}$)

dF = Fuerza diferencial(N)

dA = Area diferencial(m^2)

$$dP = \gamma \cdot dh \quad (2)$$

Donde:

P = Incremento diferencial de presion ($N \cdot m^{-2}$)

γ = Peso Especifico($N \cdot m^{-3}$)

h = Incremento diferencial de altura(m)

2.2.2.1.2 Densidad

“La densidad de un fluido, designada por la letra griega (Rho) " ρ ", se define como la masa por unidad de volumen. La densidad se usa para caracterizar la masa de un sistema fluido. En el sistema gravitacional británico (SGB), su unidad es slug/pie³ y en el SI kg/m³. El valor de la densidad puede variar ampliamente entre fluidos diferentes, pero para líquidos las variaciones de presión y temperatura en general afectan muy poco el valor de la ρ .” (Munson et al., 1994).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (3)$$

Donde:

ρ = Densidad ($Kg \cdot m^{-3}$)

M = Masa (Kg)

V = Volumen(m^3)

2.2.2.1.3 Peso específico

“El peso específico de un fluido, designada por la letra griega "y", se define como su peso por unidad de volumen. El peso específico, se usa para caracterizar el peso de un sistema fluido. En el sistema BG, su unidad es lb/pie³ y en el SI N/m³” (Munson et al., 1994).

$$\gamma = \frac{\mathcal{P}}{V} = \frac{\mathbf{M} \cdot \mathbf{g}}{V} \quad (4)$$

Donde:

γ = Peso Especifico ($N \cdot m^{-3}$)

\mathcal{P} = Peso (N)

V = Volumen (m^3)

M = Masa (Kg)

g = Aceleracion de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$)

$$\gamma = \rho \times g \quad (5)$$

Donde:

γ = Peso Especifico ($N \cdot m^{-3}$)

ρ = Densidad ($Kg \cdot m^{-3}$)

g = Aceleracion de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$)

2.2.2.1.4 Viscosidad

“Las propiedades de densidad y peso específico permiten cuantificar la “pesadez” de un fluido; sin embargo, no son suficientes para describir completamente su comportamiento durante el flujo. Dos fluidos distintos, como el agua y el aceite, pueden presentar valores de densidad similares y, aun así, exhibir comportamientos de flujo significativamente diferentes. Esto evidencia la necesidad de considerar una propiedad adicional que describa la resistencia interna al movimiento, denominada viscosidad” (Munson et al., 1994).

“La viscosidad es la propiedad de un fluido mediante la cual este ofrece resistencia al esfuerzo cortante. En los líquidos, dicha resistencia depende principalmente de las fuerzas de cohesión entre sus partículas, mientras que en los gases está asociada principalmente al grado de agitación molecular. Debido a su influencia directa en la distribución de velocidades y en las pérdidas de energía, la viscosidad constituye una de las propiedades más importantes en el estudio del flujo de fluidos” (Munson et al., 1994).

Para los fluidos newtonianos, la viscosidad se define a partir de la ley de viscosidad de Newton, la cual establece que el esfuerzo cortante es directamente proporcional al gradiente de velocidad o rapidez de deformación angular del fluido, expresándose como:

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \Rightarrow \mu = \frac{\tau}{\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)} \quad (6)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante ($\text{Pa}, \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)

μ = Viscosidad dinámica ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

$\frac{\partial u}{\partial y}$ = Gradiente de velocidad (s^{-1})

Clasificación de la viscosidad:

- **Viscosidad dinámica (μ)**

La viscosidad dinámica es una medida de la resistencia interna del fluido al movimiento relativo entre capas adyacentes cuando actúa un esfuerzo cortante. Se expresa en unidades del Sistema Internacional como pascal·segundo ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) y es fundamental para el análisis del esfuerzo cortante en el flujo.

- **Viscosidad cinemática (v)**

La viscosidad cinemática relaciona la viscosidad dinámica con la densidad del fluido y representa la resistencia del fluido al flujo bajo la acción de la gravedad. Se define como:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (7)$$

Donde:

v = cinemática ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

μ = Viscosidad dinámica ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)

ρ = densidad del fluido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

2.2.2.1.5 Fluidos newtonianos

Los fluidos newtonianos son aquellos en los que la **viscosidad permanece constante**, independientemente de la magnitud del esfuerzo cortante aplicado o del gradiente de velocidad.

En este tipo de fluidos existe una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación, cumpliéndose estrictamente la ley de viscosidad de Newton. La pendiente de esta relación corresponde a la viscosidad dinámica del fluido, la cual depende únicamente de la temperatura y la presión, pero no del régimen de flujo (Munson et al., 1994).

Ejemplos representativos de fluidos newtonianos son el **agua, el aire y la mayoría de los gases y líquidos de baja viscosidad** empleados en aplicaciones de ingeniería.

2.2.2.1.6 Fluidos no newtonianos

Los fluidos no newtonianos son aquellos cuyo comportamiento no obedece a la ley de viscosidad de Newton, debido a que su viscosidad varía con el esfuerzo cortante, con el gradiente de velocidad o con el tiempo de aplicación del esfuerzo. En estos fluidos, la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación no es lineal, por lo que su comportamiento reológico requiere modelos matemáticos más complejos para su descripción (Munson et al., 1994).

Dentro de esta categoría se incluyen:

- **Fluidos pseudoplásticos**, en los cuales la viscosidad disminuye al aumentar el esfuerzo cortante, como la sangre y las pinturas.
- **Fluidos dilatantes**, cuya viscosidad aumenta con el incremento del esfuerzo cortante, como ciertas suspensiones concentradas.
- **Fluidos plásticos de Bingham**, que requieren un esfuerzo cortante mínimo para iniciar el flujo, como lodos y pastas (Munson et al., 1994; Fox et al., 2016).

2.2.3 Hidrostática

“La estática de fluidos estudia las condiciones de equilibrio de los fluidos en reposo, y cuando se trata sólo de líquidos, se denomina hidrostática. Desde el punto de vista de ingeniería civil es más importante el estudio de los líquidos en reposo que de los gases”(Sotelo Avila, 2018).

2.2.3.1 Presión en un punto.

“La presión de un fluido se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y actúa normalmente a cualquier superficie plana. En el mismo plano horizontal, el valor de la presión en un líquido es igual en cualquier punto. Las medidas de presión se realizan con los manómetros, que pueden ser de diversas formas”(Giles et al., 1994).

2.2.3.2 Diferencia de presiones.

La diferencia de presiones entre dos puntos a distintos niveles en un líquido viene dada por:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \gamma \cdot (h_2 - h_1) \quad (8)$$

Donde:

ΔP = Diferencia de presión (Pa)

γ = Peso Específico del líquido ($N \cdot m^{-3}$)

ρ = Densidad ($Kg \cdot m^{-3}$)

$h_2 - h_1$ = Diferencia de profundidad (m)

2.2.3.3 Presión Expresada como Altura de Fluido

“La presión a cualquier profundidad h es $P = \gamma \cdot h$. Si se supone que “ γ ” es igual a una constante, existe una relación explícita entre P y h . Esto es, presión (fuerza por unidad de área) es equivalente a una altura “ h ” de algún fluido de peso específico constante “ γ ”. Muchas veces es más conveniente expresar la presión en términos de una altura de una columna de fluido que como presión por unidad de área”(Mott, 1996).

$$h = \frac{P}{\gamma} \quad (9)$$

2.2.3.4 Presión absoluta y relativa.

“La presión en un punto dentro de una masa de fluido se denota como presión absoluta o presión manométrica (relativa). La presión absoluta se mide con respecto al vacío perfecto (presión absoluta cero) en tanto que la presión manométrica se mide con respecto a la presión atmosférica local”(Giles et al., 1994).

“Las presiones absolutas son siempre positivas, pero las presiones manométricas pueden ser positivas o negativas dependiendo si la presión está por arriba de la presión atmosférica (un valor positivo = presión manométrica) o por debajo de la presión atmosférica. (un valor negativo presión de vacío)”(Munson et al., 1994).

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{rel} \quad (10)$$

Donde:

P_{abs} = Presion absoluta

P_{atm} = Presion atmosferica

P_{rel} = P_{man} = Presion relativa o manometrica

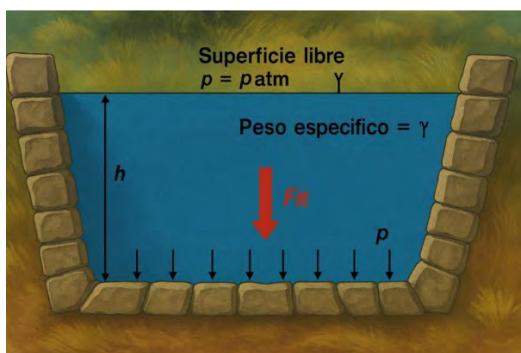
2.2.3.5 Fuerza hidrostática sobre una superficie.

“Cuando una superficie está sumergida en un fluido, debido a éste se crean fuerzas en la superficie. Para fluidos en reposo se sabe que la fuerza debe ser perpendicular a la superficie ya que no hay esfuerzos cortantes. También se sabe que si el fluido es incompresible la presión varía linealmente con la profundidad.” (Giles et al., 1994).

“Para el depósito que se muestra. Como la presión es constante y está distribuida uniformemente sobre el fondo, la fuerza resultante actúa a través del centroide del área.” (Giles et al., 1994).

Figura 1

Fuerza hidrostática sobre una superficie



Nota: Extraído de Fundamentals of fluid mechanics (Munson B, Young D, Okiishi T)

2.2.4 Cinemática de fluidos

“La cinemática de los líquidos trata del movimiento de sus partículas, sin considerar la masa ni las fuerzas que actúan, en base al conocimiento de las magnitudes cinemáticas: velocidad, aceleración y rotación.”(Sotelo Avila, 2018).

2.2.4.1 Campo de un flujo

“Un campo de flujo es cualquier región en el espacio donde hay un fluido en movimiento, a condición de que la región o subregión del flujo quede ocupada por el fluido.” (Sotelo Avila, 2018).

“En cada punto del campo de flujo es posible determinar o especificar una serie de magnitudes físicas, ya sean escalares, vectoriales o tensoriales, que forman a su vez campos independientes o dependientes dentro del flujo.”(Sotelo Avila, 2018).

2.2.5 Flujo

“Es el movimiento de las partículas de fluido a través de trayectorias que pueden ser regulares o irregulares y que viajan entre dos puntos finales a través de un medio. Puede clasificarse de diferentes maneras tales como laminar, turbulento, ideal, reversible, irreversible, constante, inconstante, uniforme, no uniforme, rotacional, irrotacional o no rotacional”(Munson et al., 1994).

2.2.5.1 Descripción euleriana de un flujo

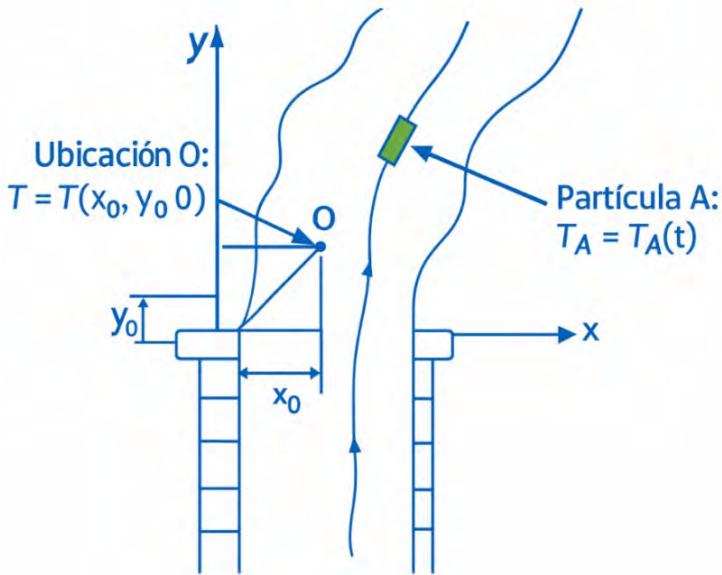
“En la descripción euleriana, el flujo se caracteriza especificando las propiedades del fluido, como la velocidad, la presión y la densidad, en puntos fijos del espacio como funciones del tiempo.”(Munson et al., 1994).

2.2.5.2 Descripción lagrangiana del flujo

“En la descripción lagrangiana, la atención se centra en la historia temporal de partículas individuales del fluido, describiendo su movimiento a medida que se desplazan a través del campo de flujo.”(Munson et al., 1994).

Figura 2

Descripción Lagrangiana del Flujo



Nota: Extraído de Fundamentals of fluid mechanics (Munson B, Young D, Okiishi T)

2.2.5.3 Clasificación del flujo según sus dimensiones

De acuerdo con Munson et al (1994) el flujo puede ser:

Flujo tridimensional, es un flujo en el que el vector de velocidad depende de tres variables espaciales y del tiempo.

Flujo bidimensional, es un flujo en el que el vector de velocidad depende de dos variables espaciales y del tiempo.

Flujo unidimensional, es un flujo en el que el vector de velocidad depende de una variable espacial y del tiempo.

2.2.5.4 Clasificación del flujo según su régimen

Flujo laminar “Se llama flujo laminar, a aquel en el cual el fluido se mueve en láminas o en capas, deslizándose suavemente una capa sobre otra capa adyacente con sólo un intercambio molecular de cantidad de movimiento. Cualquiera que sea la tendencia hacia la inestabilidad y la turbulencia, se amortigua por fuerzas cortantes viscosas sin entremezclarse si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos, o en capas cilíndricas coaxiales. Las capas no se mezclan entre sí. El mecanismo de transporte es exclusivamente molecular”.(Munson et al., 1994),

“Se da en fluidos con velocidades bajas o viscosidades altas, cuando se cumple que el número de Reynolds es inferior a 2300. Más allá de este número, será un flujo turbulento” (Munson et al., 1994).

Flujo turbulento “En el flujo turbulento, las partículas del fluido no se mueven siguiendo trayectorias definidas, la acción de la viscosidad es despreciable, las partículas del fluido poseen energía de rotación apreciable y se mueven en forma errática chocando unas con otras. Al entrar las partículas de fluido a capas de diferente velocidad, su momento lineal aumenta o disminuye y el de las partículas vecina la hacen en forma contraria.”(Munson et al., 1994).

“Cuando las fuerzas de inercia del fluido en movimiento son muy bajas, la viscosidad es la fuerza dominante y el flujo es laminar. Cuando predominan las fuerzas de inercia el flujo es turbulento.”(Munson et al., 1994).

2.2.5.5 Clasificación del flujo según al tiempo

Flujo permanente “Es el flujo que cumple la condición de que en cualquier punto del espacio por donde circula el fluido no disminuyen con el tiempo las características de éste (aunque varíen de un punto a otro), en particular su **velocidad y su presión**” (Giles et al., 1994).

Flujo no permanente o variable “Es el flujo contrario al permanente es decir varia sus características como velocidad y presión en cualquier punto del espacio donde circula el fluido” (Giles et al., 1994).

2.2.5.6 Clasificación el flujo según al espacio

Flujo uniforme “Si en cualquier sección transversal a la corriente la velocidad en puntos homólogos es igual en magnitud y dirección, aunque dentro de una misma sección transversal varié de un punto a otro.”(Streeter, 2002).

Flujo no uniforme “El flujo se denomina no uniforme cuando la velocidad o la profundidad del flujo varían en la dirección del movimiento.”(Streeter, 2002).

2.2.6 Ecuación de continuidad para canales abiertos

Las siguientes ecuaciones son para un flujo permanente e incompresible, en el caso de los canales el área es variable y depende del tirante.

$$dQ = v dA \quad (11)$$

Donde:

dQ = Pequeña contribución de caudal que atraviesa esa porción del área. ($m^3 \cdot s^{-1}$)

dA = Pequeña porción del área mojada de la sección transversal. (m^2)

v = Velocidad local del flujo asociada a esa pequeña área. ($m \cdot s^{-1}$)

“Solo en fluidos incompresibles el caudal volumétrico que atraviesa una sección transversal cualquiera de un filamento de corriente es constante; pero en todo fluido tanto compresible como incompresible el caudal máscio se conserva.”(Sotelo Avila, 2018).

2.2.7 Ecuación de Bernoulli

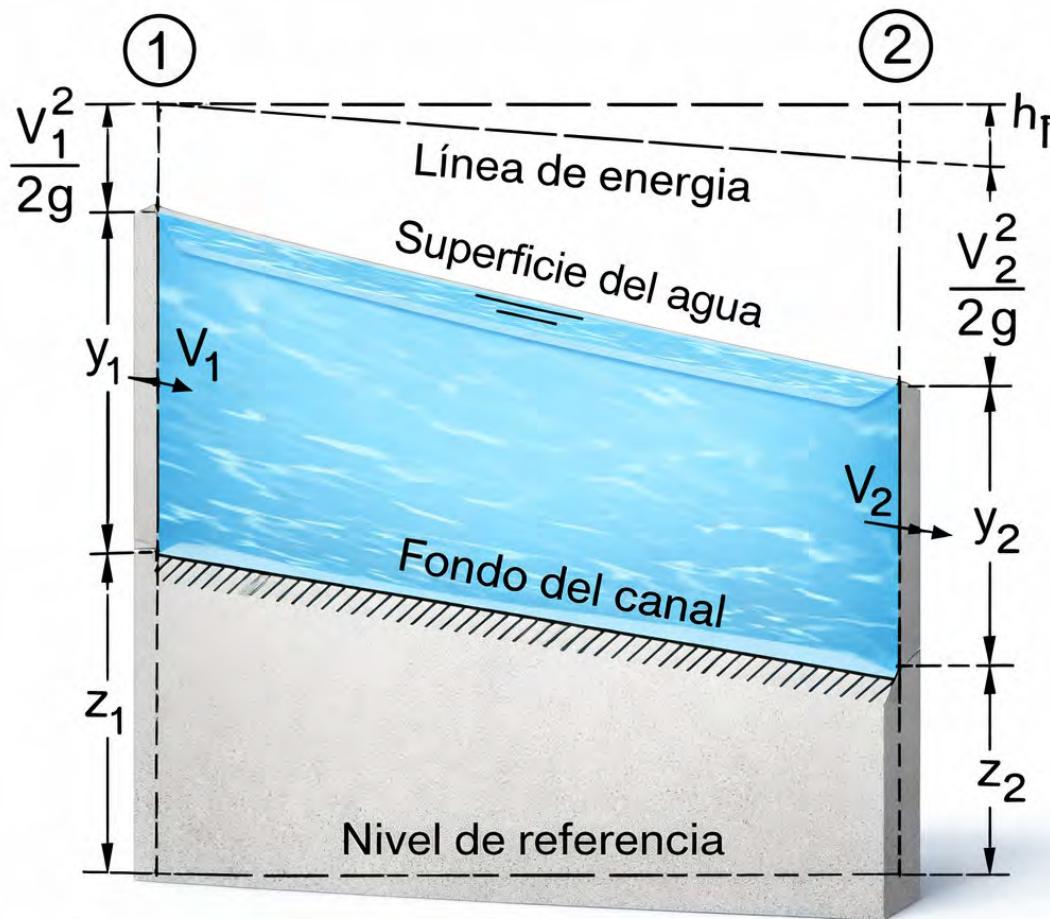
“Si el flujo pasa a través de una o más máquinas que le aportan energía (bombas), su energía aumenta, lo cual se manifiesta en un incremento de altura, representado como. De igual manera, si el flujo atraviesa una o más máquinas a las que transfiere energía (turbinas), su energía

disminuye, lo que se refleja en una reducción de altura, expresada como” (Giles et al., 1994). Por tanto:

“La energía del fluido en el punto 1 – la energía perdida entre el punto 1 y el punto 2 + la energía suministrada al fluido por las bombas que haya entre el punto 1 y el punto 2 – la energía cedida por el fluido a las turbinas o motores que haya entre el punto 1 y el punto 2 ha de ser igual a la energía en el punto 2”. (Giles et al., 1994).

Figura 3

Teorema de Bernoulli



Nota: Extraído de Hidráulica general de Sotelo Ávila

$$Z_1 + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f \quad (7)$$

Donde:

Z = Elevación del fondo del canal respecto a un nivel de referencia (m)

y = Tirante o altura de presión hidrostática (m)

$\frac{V^2}{2g}$ = Altura de velocidad (m)

h_f = Pérdidas de energía por fricción (m)

2.2.8 Número De Reynolds

El estado o comportamiento del flujo en canales abiertos está gobernado principalmente por los efectos de la viscosidad y la gravedad en relación con las fuerzas iniciales del flujo. El efecto de la viscosidad respecto a la inercia puede representarse mediante el número de Reynolds, definido como:

$$Re = \frac{V \cdot Rh}{\nu} \quad (13)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds (adimensional)

V = Velocidad media del flujo ($m \cdot s^{-1}$)

Rh = Radio hidráulico (m)

ν = Viscosidad cinemática ($m^2 \cdot s^{-1}$)

2.2.9 Número De Froude

El número de Froude (Fr) es un parámetro adimensional que cuantifica la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitacionales que actúan sobre un flujo en canales abiertos. Su importancia radica en que permite clasificar el régimen del flujo (subcrítico, crítico o supercrítico) y analizar el comportamiento de la superficie libre en función de la gravedad y la velocidad del agua:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} \quad (14)$$

Donde:

Fr = Número de Froude (adimensional)

V = Velocidad media del flujo ($m \cdot s^{-1}$)

g = Aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-1}$)

v = Profundidad hidráulica del flujo (m)

Este número caracteriza el régimen del flujo:

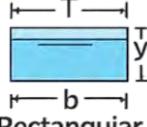
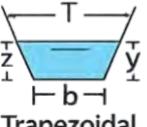
- $Fr < 1$ (flujo subcrítico): predominan las fuerzas gravitacionales; el flujo es más lento y profundo.
- $Fr = 1$ (flujo crítico): equilibrio entre las fuerzas de inercia y gravedad.
- $Fr > 1$ (flujo supercrítico): predominan las fuerzas de inercia; el flujo es rápido y poco profundo.

En resumen, el número de Froude es una herramienta esencial en hidráulica de canales abiertos porque permite evaluar cómo influye la gravedad sobre el flujo de agua y determinar las condiciones hidráulicas dominantes que afectan la estabilidad y el diseño de estructuras hidráulicas.

2.2.10 Elementos geométricos de una sección de un canal abierto

Según Gilberto Sotelo Avila (2018) “Los elementos geométricos son propiedades de una sección de canal que pueden ser definidos por completo por la geometría de la sección y la profundidad de flujo. Para secciones simples, los elementos geométricos pueden expresarse matemáticamente en términos de la profundidad de flujo y otras dimensiones. Sin embargo, para secciones complicadas y corrientes naturales, no es posible una ecuación simple. En su lugar, se utilizan curvas que muestran la relación entre estos elementos y la profundidad de flujo para cálculos hidráulicos.”

Figura 4*Elementos geométricos de secciones de canal*

Sección	Área hidráulica A	Perímetro mojado P	Radio hidráulico R	Espejo de agua T
 Rectangular	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b
 Trapezoidal	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y/\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$

Nota: Extraído de Hidráulica general 2018

De acuerdo con Sotelo Avila (2018) los elementos más importantes para describir de una sección del canal son:

- **Profundidad de flujo o tirante (y):** Es la distancia vertical desde el punto más bajo de una sección del canal hasta la superficie libre, la profundidad de flujo de la sección es la profundidad de flujo perpendicular a la dirección de éste, o la altura de la sección del canal que contiene el agua.
- **Nivel:** es la elevación o distancia vertical desde un nivel de referencia o “datum” hasta la superficie libre, no obstante, si el punto más bajo de la sección de canal se escoge como el nivel de referencia, el nivel es idéntico a la profundidad de flujo.
- **Ancho superficial (T):** Es el ancho de la sección del canal en la superficie libre.
- **Área mojada (A):** Es el área de la sección transversal del flujo perpendicular a la dirección de flujo.
- **Perímetro mojado (P):** es la longitud de la línea de intersección de la superficie de canal mojada y de un plano transversal perpendicular a la dirección de flujo.

- **Radio hidráulico (Rh):** Es la relación del área mojada con respecto a su perímetro mojado.

$$Rh = \frac{A}{P} \quad (15)$$

- **La profundidad o tirante hidráulico (D):** Es la relación entre el área mojada y el ancho en la superficie.

$$D = \frac{A}{T} = y \quad (86)$$

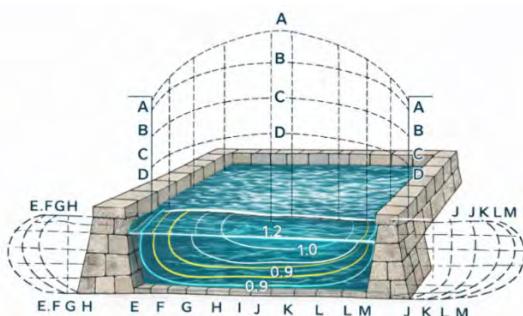
2.2.10.1 Distribución de velocidades en una sección de canal

“Debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades en un canal no están uniformemente distribuidas en su sección. La máxima velocidad medida en canales normales a menudo ocurre por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05m a 0.025m de la profundidad.”(Giles et al., 1994).

“A continuación, se muestra los gráficos el cual es un modelo general de la distribución de velocidades para varias secciones horizontales y verticales en un canal con sección rectangular y las curvas de igual velocidad de sección transversal, como también otras secciones.”(Giles et al., 1994).

Figura 5

Distribución de velocidad en un canal rectangular



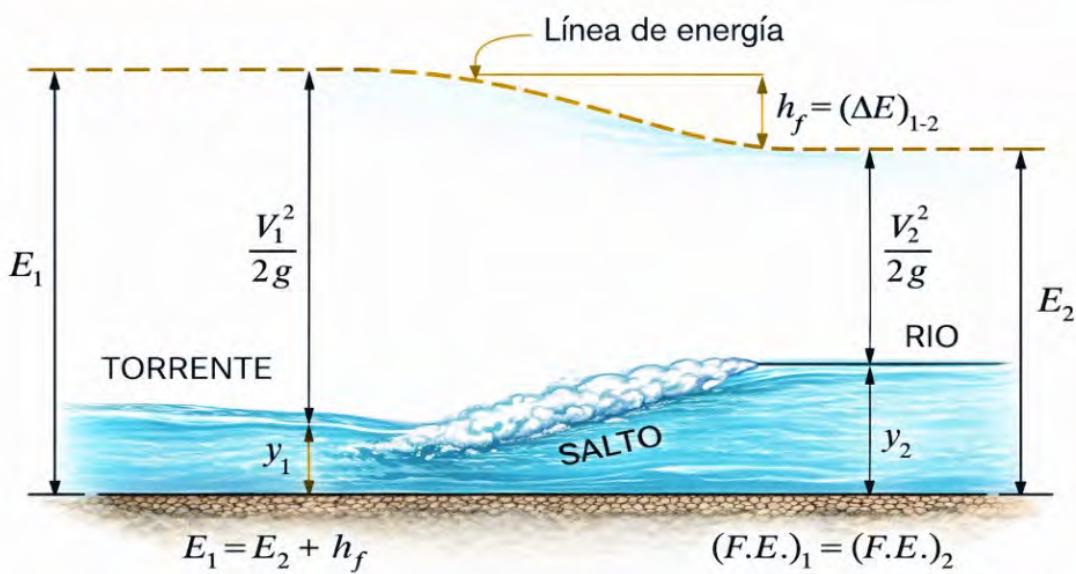
Nota: Extraído de Chow 2004

2.2.11 Resalto hidráulico

El salto hidráulico es el paso violento de un régimen supercrítico a uno subcrítico con gran disipación de energía. También se llama resalto. Como se muestra en la figura.(Giles et al., 1994).

Figura 6

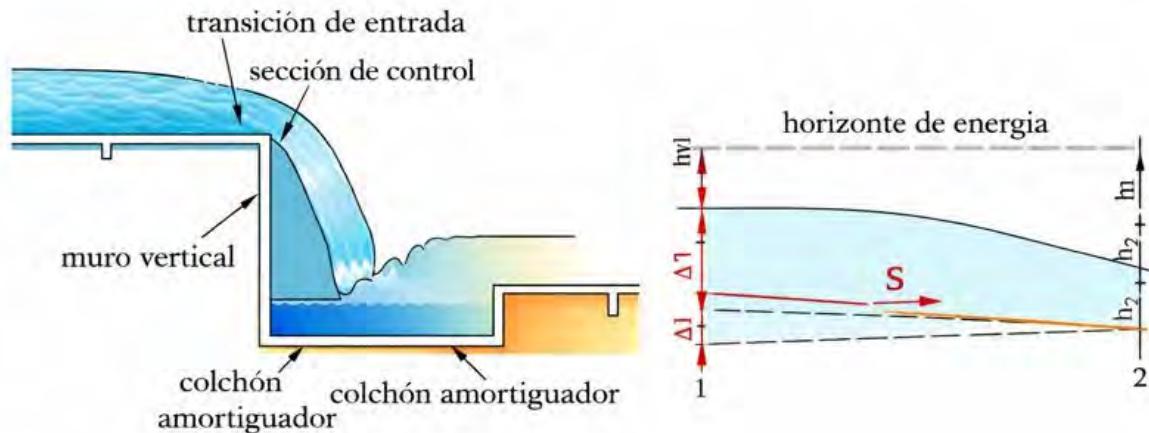
Salto Hidráulico



Nota: Extraído de Hidráulica General 2018.

2.2.12 Caídas Verticales

Según Mott (1996) “Las caídas son estructuras utilizadas en aquellos puntos donde es necesario efectuar cambios bruscos en la rasante del canal, permite unir dos tramos (uno superior y otro inferior) de un canal, por medio de un plano vertical, permitiendo que el agua salte libremente y caiga en el tramo de abajo. El plano vertical es un muro de sostenimiento de tierra capaz de soportar el empuje que estas ocasionan. La finalidad de una caída es conducir agua desde una elevación alta hasta una elevación baja y disipar la energía generada por esta diferencia de niveles”.

Figura 7*Esquematización de caída vertical*

Nota: Extraído de Hidráulica General 2018.

2.2.13 Ecuación De Chezy

“Se dice que probablemente la primera ecuación de flujo uniforme fue desarrollada por Antonio Chezy.”(Sotelo Avila, 2018)

$$V = C \sqrt{R_h S} \quad (17)$$

Donde:

V = Velocidad media del flujo ($m \cdot s^{-1}$)

C = Coeficiente de Chezy ($m^{1/2} \cdot s^{-1}$)

R_h = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente hidráulica ()

2.2.14 Ecuación De Manning

Sotelo Ávila señala que la ecuación de Manning es especialmente adecuada para el estudio de canales naturales y artificiales, debido a su simplicidad y a la facilidad con la que permite incorporar las condiciones reales de rugosidad del canal, siendo válida principalmente para flujos permanentes y uniformes.

$$V = \frac{1}{n} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Donde:

V = Velocidad media del flujo ($m \cdot s^{-1}$)

n = Coeficiente de rugosidad de manning $\left(s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$

R_h = Radio hidráulico (m)

S = Pendiente hidráulica (adimensional)

2.2.15 Rugosidad hidráulica

La rugosidad hidráulica se manifiesta como una resistencia al flujo, la cual se traduce en una pérdida progresiva de energía a lo largo del canal. Esta resistencia es consecuencia de la fricción entre el agua y las irregularidades del contorno, generando esfuerzos cortantes que reducen la energía disponible del flujo (Chow, 1994).

Ven Te Chow señala que el efecto de la rugosidad se intensifica cuando el tamaño de las irregularidades del lecho es comparable con la profundidad del flujo, situación común en canales naturales, donde la rugosidad ejerce una influencia dominante sobre el régimen hidráulico.

2.2.16 Vertederos

Los vertederos son dispositivos hidráulicos ampliamente utilizados para la medición de caudales en canales abiertos, así como para el control y regulación del flujo. Su principio de funcionamiento se basa en la relación existente entre la altura de la lámina de agua que fluye sobre una cresta y el caudal descargado, lo cual permite establecer ecuaciones empíricas de gran precisión cuando se cumplen determinadas condiciones geométricas y de flujo (Chow, 1959; Bos, 1989).

2.2.16.1 Clasificación de vertederos

Los vertederos pueden clasificarse en función de diversos criterios. Según su geometría, pueden ser rectangulares, triangulares (V-notch), trapezoidales (como los vertederos Cipolletti) o

de perfil complejo. Según el espesor de la cresta, se dividen en vertederos de pared delgada (borde afilado) y de pared gruesa.

Vertederos de pared delgada (borde afilado): son aquellos en los que el espesor del borde es pequeño en relación con la carga hidráulica, permitiendo una separación limpia del flujo. Generalmente, se considera que un vertedero es de borde afilado si la relación $e/H < 0.67$, donde e es el espesor de la cresta y H la altura del agua sobre ella (Chow, 1959).

Vertederos de pared gruesa: presentan una cresta más ancha y suelen tener una geometría hidráulica diseñada para maximizar el flujo, como en los vertederos tipo ogee.

2.2.16.2 Ecuación general para vertederos rectangulares

Para un vertedero rectangular de borde afilado bajo condiciones de flujo libre, el caudal puede estimarse mediante la ecuación empírica:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot \mu \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

$$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \cdot \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right] \quad (20)$$

Donde:

Q = Caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)

g = Aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$)

μ = Coeficiente de gasto ($\mu \approx 0.60$ a 0.65), corrige pérdidas por viscosidad, etc

b = Ancho de la cresta del vertedero (m)

B = Ancho de la base del vertedero (m)

h = Carga sobre la cresta (m)

w = Altura de la base a la cresta del vertedero (m)

2.2.16.2.1 Coeficiente de gasto (μ)

El coeficiente de descarga μ representa la eficiencia hidráulica del vertedero, integrando los efectos de viscosidad, tensión superficial, contracción y turbulencia. Su valor varía típicamente

entre 0.60 y 0.65 para vertederos rectangulares de borde afilado en condiciones ideales (Rouse, 1936).

Una de las fórmulas más utilizadas para la estimación precisa de μ es la de Hegly, que considera la relación entre la altura del flujo y el ancho del vertedero (h/b), siendo aplicable cuando $h/b > 0.13$.

Condiciones de Validez y Recomendaciones para que las fórmulas de vertederos sean aplicables, deben cumplirse ciertas condiciones:

- El flujo debe ser subcrítico antes del vertedero.
- El vertedero debe estar instalado perpendicular al flujo.
- La sección de control debe estar alejada de perturbaciones aguas arriba.
- No debe haber sumersión aguas abajo (flujo sumergido), a menos que se apliquen correcciones (Chanson, 2004).

2.2.17 Introducción a la ingeniería hidráulica inca

El Perú, país de montañas y glaciares, enfrenta actualmente grandes retos frente al cambio climático y la gestión del agua. En este escenario, resulta valioso volver la mirada hacia el conocimiento ancestral. Los ingenieros incas lograron crear sistemas hidráulicos de una precisión y belleza extraordinaria, combinando funcionalidad, sostenibilidad y armonía con el entorno. Un ejemplo emblemático es el complejo de Tipón, considerado una obra maestra de la hidráulica inca. Allí, el agua no solo fue domesticada para el riego y la agricultura, sino también venerada como elemento sagrado, integrándose a la arquitectura, la ingeniería y el paisaje. Estudiar Tipón hoy permite reconocer la vigencia de estas prácticas y cómo pueden inspirar soluciones frente a los desafíos hídricos actuales (Loaiza Schiaffino, 1990).

2.2.18 Principales sistemas hidráulicos y prácticas ancestrales

De acuerdo con Loaiza Schiaffino (1990) algunas de los sistemas hidráulicos ancestrales aún empleados son:

- **Reforestación en las altas cuencas:** Los antiguos peruanos forestaban las partes altas de las cuencas con especies nativas, como el queuña (*Polylepis spp.*), para conservar y proteger los recursos hídricos.
- **Represas altoandinas:** Construyeron represas en las zonas altas de las cuencas para almacenar agua de lluvia, evitando situarlas en los cauces principales de los ríos para reducir el riesgo de erosión y sedimentación.
- **Sistemas de andenería:** Perú tiene aproximadamente un millón de hectáreas de andenes, de las cuales solo un 25% se utilizan actualmente. Estos sistemas permiten el cultivo en pendientes y la conservación del suelo.
- **Sistemas de amunas:** Usaban zanjas de infiltración para recargar acuíferos, una práctica aún vigente en lugares como Tupicocha en Lima. Esta técnica, conocida como “siembra del agua”, consiste en usar zanjas que llevan el agua de lluvia a cochas (lagunas), donde se filtra en el suelo y reaparece como manantiales en épocas secas.
- **Puquios (ojos de agua):** Sistemas de fuentes naturales de agua que eran mantenidos mediante la siembra del agua. Hoy en día, muchos están deteriorados debido a la deforestación y la contaminación.

2.2.19 Levantamiento topográfico LiDAR aéreo

“El LiDAR (Light Detection and Ranging) es una tecnología de teledetección que utiliza pulsos de luz láser para medir distancias entre el sensor y un objeto o superficie. Esta técnica

permite la creación de modelos tridimensionales precisos del entorno y es ampliamente utilizada en diversos campos como la topografía, la arqueología, la geología, la silvicultura y la planificación urbana.”(Dong & Chen, 2017). constituye el principio físico fundamental del levantamiento topográfico LiDAR aéreo realizado mediante plataformas no tripuladas. En particular, el uso del dron DJI Matrice 350 RTK, equipado con el sensor LiDAR Zenmuse L2, permite aplicar esta tecnología desde una plataforma aérea con altos niveles de estabilidad, precisión y control. Así mismo el dron tiene los diferentes componentes.

2.2.19.1 Plataforma aérea

Actúa como vehículo aéreo no tripulado (UAV) encargado de transportar el sensor LiDAR y mantener una trayectoria de vuelo estable y controlada durante el levantamiento, el UAV que se utilizó es el DJI Matrice 350 RTK

2.2.19.2 Sistema de Posicionamiento RTK (Real Time Kinematic)

Proporciona coordenadas geográficas de alta precisión (centimétrica) para cada punto capturado por el sensor LiDAR.

2.2.19.3 Sensor LiDAR (Zenmuse L2)

Emitir pulsos láser y registrar su retorno para generar una nube de puntos tridimensional (X, Y, Z) del terreno y las estructuras. Sus componentes son:

- **Emisor láser:** genera pulsos de luz que impactan sobre el terreno.
- **Receptor láser:** capta el pulso reflejado.
- **Sensor IMU de alta precisión:** mide orientación y movimiento del sensor.
- **Cámara RGB integrada:** permite colorizar la nube de puntos y generar ortofotos.
- **Sistema de sincronización GNSS–IMU–LiDAR:** garantiza coherencia espacial y temporal de los datos.

2.2.19.4 GNSS (GPS) Diferencial – Sistema Topcon

El GPS diferencial es una técnica de posicionamiento satelital que mejora la precisión del GPS convencional mediante la aplicación de correcciones generadas por una estación base de coordenadas conocidas. En los sistemas Topcon, esta tecnología permite alcanzar precisiones centimétricas mediante métodos RTK o PPK, siendo ampliamente utilizada en levantamientos topográficos y LiDAR de alta resolución.

2.2.20 Levantamiento Topográfico LiDAR con IPHONE 15 PRO-MAX

El iPhone 15 Pro-Max integra un sensor LiDAR de corto alcance, el cual fue diseñado inicialmente para aplicaciones de realidad aumentada, pero que puede emplearse para la generación de nubes de puntos tridimensionales (3D), modelos digitales del terreno (MDT) y modelos digitales de superficie (MDS) en levantamientos topográficos de pequeña escala (Apple Inc., 2023; Cai et al., 2024). Este sensor funciona mediante la emisión de pulsos de luz infrarroja y el registro del tiempo de retorno tras impactar en los objetos, permitiendo calcular distancias y representar la geometría del entorno (DigiKey, 2020).

Para el levantamiento topográfico, el dispositivo se apoya en aplicaciones especializadas como 3D Scanner App, Polycam, SiteScape y Pix4Dcatch, las cuales procesan la información proveniente del sensor LiDAR y los datos de posicionamiento del sistema GNSS integrado del dispositivo móvil (Polycam Inc., 2024; PIX4D, 2023). El procedimiento general consiste en recorrer el área de estudio de forma sistemática, manteniendo un movimiento uniforme del equipo para asegurar la cobertura completa y la adecuada captura de superficies, obstáculos y variaciones de nivel.

En términos de precisión, diversos estudios indican que el sensor LiDAR integrado en dispositivos móviles Apple puede alcanzar errores del orden de ± 2 a ± 5 cm en distancias cortas,

generalmente hasta un rango aproximado de 5 metros, dependiendo de factores como las condiciones de iluminación, la textura de las superficies y la estabilidad del operador durante la captura (Cai et al., 2024; Apple Inc., 2023).

Figura 8

Iphone 15 pro max



Nota: Se uso el sensor LiDAR

2.2.21 LSPIV

“Para analizar las velocidades superficiales del flujo utilizando la técnica de LSPIV, es necesario introducir a un programa como RIVeR (Rectification of Image Velocity Results) en la que con pares de imágenes con un intervalo de tiempo entre ellas. Estas imágenes deben ser grabadas con una cámara de video de alta definición, de recomendación esta debe tener una resolución igual o superior a 1920x 1080, con un lente tipo Carl Zeiss® Vario teassar que utiliza óptica que permite obtener imágenes nítidas y cuenta con una velocidad de 60 a 240 fotogramas por segundo” (Bodart et al., 2024)

Una vez obtenidas las imágenes del flujo superficial en el sistema hidráulico de Tipón, se procede con su procesamiento mediante un software especializado. En este caso, se utilizará RIVeR (River Image Velocity Radar), un programa ampliamente empleado para análisis de imágenes en hidrodinámica fluvial. El programa y el manual se puede descargar del siguiente enlace <https://riverdischarge.blogspot.com/p/download.html>. El proceso LSPIV consta de tres etapas fundamentales:

2.2.21.1 Orto-rectificación:

Esta etapa tiene como finalidad corregir las distorsiones geométricas de las imágenes debido a la perspectiva de la cámara y convertirlas a un sistema de coordenadas plano real, alineado con el terreno. Para lograrlo, se emplean puntos de control (Ground Control Points, GCPs) extraídos del levantamiento topográfico (con LiDAR o dron), que permiten ajustar la imagen a coordenada reales del terreno (Fujita et al., 1998):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} = H \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Donde:

$X = (X, Y, 1)^T$: Coordenadas reales en el sistema del terreno.

H = Matriz de transformación de homografía

$x = (u, v, 1)^T$: Coordenadas del píxel en la imagen.

2.2.21.2 Análisis del PIV

En esta fase se calcula el campo de velocidad superficial del agua a partir del desplazamiento de patrones o partículas visibles (por ejemplo, burbujas, espuma o semillas flotantes) entre dos imágenes consecutivas. El algoritmo LSPIV se basa en la ecuación:

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad (22)$$

Donde:

$v = (v_x, v_y)$: Vector de velocidad superficial.

$\Delta r = (\Delta x, \Delta y)$: Desplazamiento promedio de partículas entre imágenes.

$\Delta t = t_2 - t_1$: Intervalo de tiempo entre imágenes. (Fujita et al., 1998)

El desplazamiento ($\Delta x, \Delta y$) se calcula mediante la función de correlación cruzada entre las ventanas de análisis (sub - imágenes) de las dos tomas consecutivas:

$$C(\Delta x, \Delta y) = \sum_{ij} [I_1(i, j) \cdot I_2(i + \Delta x, j + \Delta y)] \quad (23)$$

Donde:

$C(\Delta x, \Delta y)$ = Función de correlación cruzada. Indica el desplazamiento más probable.

$I^1(i, j)$ e $I^2(i, j)$ = Intensidades de píxeles en las imágenes 1 y 2

i, j = Coordenadas de píxeles en la ventana de análisis. (Estruch – Samper, 2012)

2.2.21.3 Post procesamiento

Esta etapa incluye la corrección de vectores erróneos, suavizado del campo de velocidades y exportación de los resultados para el análisis hidrodinámico. También se lleva a cabo la validación con datos de campo cuando están disponibles.

Corrección de la Velocidad Superficial a Velocidad Media

La metodología LSPIV mide la velocidad superficial del flujo, pero en aplicaciones hidráulicas se requiere la velocidad media del flujo. Para ello se aplica un factor de corrección α , el cual depende del régimen hidráulico y del perfil de velocidades del flujo. En este estudio, al tratarse de canales con tirantes bajos, se emplea un valor de $\alpha = 0.8$ comúnmente utilizado en flujos subcríticos en canales estrechos y someros. (Estruch-Samper, 2012)

$$V_m = \alpha \cdot V_s \quad (24)$$

Donde:

V_m = Velocidad media ($m \cdot s^{-1}$)

V_s = Velocidad superficial ($m \cdot s^{-1}$)

α = factor de corrección (adimensional)

Este factor empírico ha sido validado en múltiples estudios experimentales y se ajusta adecuadamente a las condiciones observadas en el sistema hidráulico de Tipón.

2.2.22 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

“La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es un método que permite el análisis y diseño de sistemas hidráulicos. Esta metodología permite simular el comportamiento de fluidos, proporcionando una comprensión detallada del flujo de agua en diversas estructuras y entornos. El modelado hidráulico con CFD se ha convertido en una herramienta indispensable en la ingeniería moderna, facilitando la toma de decisiones informadas en proyectos de ingeniería civil y ambiental.” (Tu et al., 2018).

2.2.22.1 Principios Básicos De CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se fundamenta en la formulación integral de las leyes de conservación, las cuales se expresan mediante el Teorema del Transporte de Reynolds. Este teorema permite relacionar un sistema material con un volumen de control, dando origen a las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y conservación de la energía. A partir de estas formulaciones se obtienen las ecuaciones de Navier–Stokes, cuya resolución numérica constituye la base del análisis CFD”(Anderson, 1995).

“La ecuación de continuidad asegura la conservación de la masa, mientras que las ecuaciones de Navier-Stokes describen la conservación del momento.”(Anderson, 1995). Todo lo expuesto se desarrollará con mayor detalle en la sección dedicada al software FLOW-3D, que constituye la herramienta principal utilizada para la resolución numérica del modelo hidráulico propuesto en esta investigación. Así como también en la presentación de resultados.

2.2.22.2 Procesos de modelamiento hidráulico con CFD

2.2.22.2.1 Definición del problema

“El primer paso en el modelado hidráulico con CFD es definir claramente el problema a resolver. Esto incluye determinar los objetivos del estudio, **identificar las condiciones de**

contorno y las propiedades del fluido. Esta etapa es crucial para garantizar que el modelo CFD sea representativo del sistema real y que los resultados obtenidos sean válidos para las decisiones de ingeniería.”(Patankar, 1980).

2.2.22.2.2 Geometría y Malla

“La creación de un modelo geométrico de la región de interés es el siguiente paso en el proceso. La geometría debe dividirse en una malla que contiene celdas pequeñas donde se resolverán las ecuaciones de flujo. La calidad de la malla es fundamental para la precisión del modelo, ya que una malla fina puede capturar mejor los detalles del flujo, pero también aumenta los requisitos computacionales.”(Moin, 2010).

2.2.22.2.3 Configuración del Modelo

“Una vez que la geometría y la malla están listas, se configuran las propiedades del fluido y las condiciones de contorno. Esto incluye asignar parámetros como la densidad y la viscosidad del fluido, y definir las condiciones en las fronteras del dominio de estudio, como la velocidad de entrada, la presión de salida y las condiciones de las paredes.”(Blazek, 2015).

2.2.22.2.4 Solución Numérica

“La resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes se realiza utilizando un software de CFD. Este proceso implica iterar hasta que se alcanza la convergencia de la solución, asegurando que los resultados sean precisos y estables. Durante esta etapa, se monitorean las variables clave del flujo para verificar la correcta resolución de las ecuaciones” (Chanson, 2002).

2.2.22.2.5 Post procesamiento y análisis

“El post procesamiento incluye la visualización y el análisis de los resultados del flujo. Esto puede involucrar la generación de gráficos y mapas de variables como la velocidad, la presión

y las líneas de corriente. El análisis de estos resultados permite evaluar el desempeño del sistema y realizar comparaciones con datos experimentales o teóricos para validar el modelo”(Rodi, 1984).

2.2.22.3 Aplicaciones del modelado hidráulico con CFD

“El modelado hidráulico con CFD tiene numerosas aplicaciones prácticas. En el diseño de estructuras hidráulicas, CFD permite evaluar y optimizar la eficiencia y seguridad de presas, vertederos y compuertas. También se utiliza para analizar sistemas de distribución de agua potable, redes de alcantarillado y drenaje, y para estudiar el impacto de estructuras en el flujo durante eventos extremos.(Tu J et al., 2018).

2.2.23 FLOW – 3D

FLOW-3D es un software de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) ampliamente utilizada en investigación y aplicaciones de ingeniería. Su capacidad para **modelar flujos con superficie libre, geometrías complejas y fenómenos transitorios** la convierte en una herramienta idónea para el análisis de sistemas hidráulicos, incluidos aquellos desarrollados por civilizaciones antiguas. Mediante FLOW-3D es posible recrear y evaluar el comportamiento hidráulico de infraestructuras históricas, permitiendo una comprensión más profunda de las soluciones constructivas y de gestión del agua implementadas en el pasado (Chen et al., 2014).

2.2.23.1 Principios y fundamentos de la simulación en FLOW-3D

Para comprender de manera precisa el comportamiento hidráulico de las estructuras del sistema hidráulico incaico de Tipón, la simulación computacional en Flow – 3D se fundamenta en los principios de la mecánica de fluidos formulados mediante el Teorema del Transporte de Reynolds. Este teorema establece una equivalencia matemática entre la razón de cambio de una propiedad extensiva en un sistema material y el cambio de dicha propiedad dentro de un volumen de control fijo en el espacio. Dado que el seguimiento de una masa fluida específica es impráctico

debido a su deformabilidad y movilidad, resulta mucho más eficiente realizar el análisis sobre volúmenes de control fijos, dentro de los cuales se evalúan las leyes de conservación (Flow Science, 2023).

$$\frac{dB_{sist.}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b \, dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA \quad (25)$$

Donde:

$B_{sist.}$ = Propiedad total del sistema (masa, momento, energía)

b = Propiedad específica o intensiva (propiedad por unidad de masa)

ρ = Densidad del fluido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

\vec{V} = Vector velocidad del fluido ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

\vec{n} = Vector normal unitario que apunta hacia afuera de la sc (adimensional)

VC = Volumen de control (la región espacial que contiene el fluido).

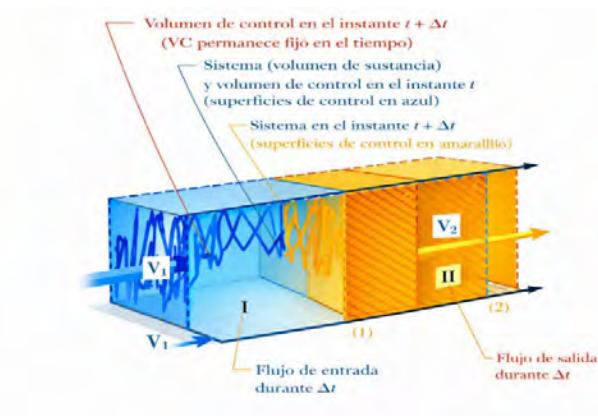
SC = Superficie de control (frontera que limita al volumen de control).

dV = Elemento diferencial de volumen.

dA = Elemento diferencial de área en la superficie de control.

Figura 9

Teorema de Transporte de Reynolds Volúmenes de control



Nota: Extraído de Hidráulica General de Sotelo Avila.

La ecuación expresa que la **variación temporal de una propiedad extensiva de un sistema** es igual a la **acumulación de dicha propiedad dentro de un volumen de control** más el **flujo neto de la propiedad a través de su superficie**, constituyendo la base para las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía en mecánica de fluidos.

Tabla 1*Resumen propiedades extensiva e intensiva*

Fenómeno físico	Qué se conserva	Valor de (b)	Unidades de (b)
Continuidad	Masa	1	adimensional
Cantidad de movimiento	Momento lineal	\vec{V}	m/s
Energía	Energía mecánica específica	e	J/kg

Nota: elaboración propia

Tabla 2*Resumen Significados físicos*

Término	Significado físico	Unidades SI
B_{sist}	Cantidad total de la propiedad en el sistema material	depende del fenómeno
$\frac{dB_{sist}}{dt}$	Variación temporal de la propiedad del sistema	kg/s, N o W
ρ	Densidad del fluido	kg/m ³
b	Propiedad específica (por unidad de masa)	ver tabla 1
dV	Volumen diferencial	m ³
$\int_{VC} \rho b dV$	Cantidad de la propiedad dentro del volumen de control	kg, kg·m/s, J
$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b dV$	Acumulación temporal dentro del VC	kg/s, N, W
\vec{V}	Velocidad del flujo	m/s
\vec{n}	Vector normal saliente	adimensional
$\vec{V} \cdot \vec{n}$	Componente normal de la velocidad	m/s
dA	Área diferencial	m ²
$\int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA$	Flujo neto de la propiedad a través de la superficie	kg/s, N, W

Nota: elaboración propia

Tabla 3*Resumen valores que toma el TTR*

Conservación	Unidades del término completo
Masa	kg/s
Cantidad de movimiento	N (kg·m/s ²)
Energía	W (J/s)

Nota: elaboración propia

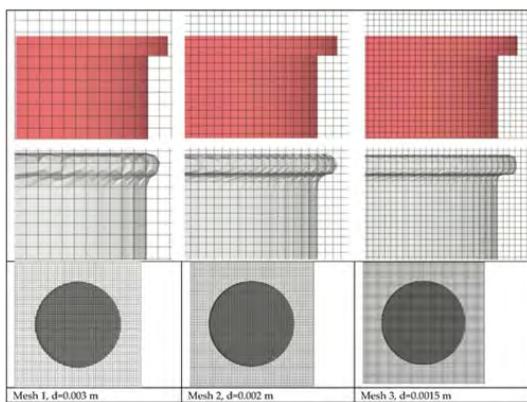
En este contexto, FLOW-3D utiliza el método de volúmenes finitos, una técnica de discretización espacial donde el dominio computacional (la geometría del canal, acueducto o estructura hidráulica) se subdivide en múltiples celdas o volúmenes de control pequeños. En cada uno de estos volúmenes se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento (Navier-Stokes) y, de ser necesario, la energía todas ellas derivadas del Teorema General del Transporte de Reynolds. (Flow Science, 2023).

2.2.23.2 Método FAVOR en FLOW-3D

El software FLOW-3D emplea el método FAVOR (Fractional Area/Volume Obstacle Representation) para la representación de geometrías complejas dentro de una malla cartesiana, mediante el cálculo de fracciones de área y volumen ocupadas por los sólidos en cada celda de control. Este enfoque permite una aproximación precisa de obstáculos y estructuras hidráulicas sin necesidad de mallas no estructuradas, mejorando la estabilidad numérica y la eficiencia computacional. La exactitud geométrica del método FAVOR depende directamente de la resolución del mallado. (Flow Science, Inc., 2023).

Figura 10

FAVOR



Nota: Cuanto más fino es el mallado es mejor la resolución Extraído de Flow Science, Inc., 2023.

2.2.23.3 Método volumen del fluido (VOF) en FLOW 3D

Una de las características distintivas de FLOW-3D es su capacidad para modelar flujos con superficie libre mediante la implementación del método del Volumen de Fluido (VOF, por sus siglas en inglés Volume of Fluid). Este método permite rastrear con alta precisión la interfaz entre el agua y el aire, asignando a cada celda del dominio computacional un valor de fracción de volumen comprendido entre 0 y 1. Dicho valor representa la proporción del volumen de la celda ocupada por el fluido, lo que permite definir de forma clara y precisa la ubicación de la superficie libre sin necesidad de deformar la malla. De esta manera, el método VOF posibilita la simulación robusta y estable en el tiempo de fenómenos complejos como saltos hidráulicos, caídas de agua, desbordes e interacción fluido-estructura, manteniendo una alta fidelidad en la representación del comportamiento físico del flujo.(Flow Science, 2023).

El método VOF se basa en el concepto de fracción de volumen, generalmente representada por la variable F :

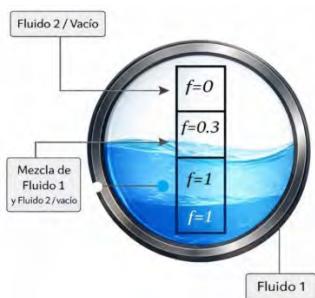
$F = 1 \rightarrow$ la celda está completamente llena de fluido (agua).

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

$0 < F < 1 \rightarrow$ la celda contiene la interfaz agua–aire.

Figura 11

VOF



Nota: extraido de Flow Science

2.2.23.4 Ecuación de continuidad o conservación de masa

Este principio establece que la masa no se puede crear ni destruir. La masa en un sistema cerrado permanece constante, mientras que en un volumen de control existe libertad, pues la masa puede ingresar y salir del volumen de control; sin embargo, el cambio neto de la masa es igual a cero.

Para encontrar la ecuación de continuidad vamos a partir del teorema de Reynolds:

$$\frac{dB_{sist.}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b \, dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA \quad (26)$$

Para este caso:

$$B_{sist.} = m$$

$$b = 1 (\text{porque masa por unidad de masa es } = 1)$$

Sustituyendo en (23):

$$\frac{dM_{sist}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \, dV + \int_{SC} \rho V \cdot n \, dA \quad (27)$$

Por la conservación de la masa del sistema:

$$\frac{dM_{sist}}{dt} = 0 \quad (28)$$

Se obtiene la ecuación integral de continuidad:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \, dV + \int_{SC} \rho V \cdot n \, dA \quad (29)$$

Teorema de la divergencia de Gauss: El flujo neto de un campo vectorial que atraviesa una superficie cerrada es igual a la integral del volumen de la divergencia de ese campo dentro del volumen encerrado por dicha superficie.

$$\int_{SC} \vec{F} \cdot n \, dA = \int_{VC} \nabla \cdot \vec{F} \, dV \quad (30)$$

Dado que $\vec{F} = \rho \vec{V}$, entonces la ecuación (27) queda así:

$$\int_{SC} \rho \vec{V} \cdot n \, dA = \int_{VC} \nabla \cdot \rho \vec{V} \, dV \quad (31)$$

Ahora remplazamos en la ecuación (26)

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \, dV + \int_{VC} \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \, dV \quad (32)$$

Agrupando términos dentro de la integral:

$$\int_{VC} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right) dV = 0 \quad (33)$$

Dado que el volumen de control es arbitrario y la integral se anula para cualquier volumen, **el integrando debe ser nulo en cada punto del dominio:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (34)$$

Donde ∇ (nabla) es un operador vectorial que permite escribir derivadas espaciales de forma compacta:

- Gradiente φ :

$$\nabla \varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (35)$$

- Divergencia $V = (u, v, w)$:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (36)$$

En el caso de la ecuación de continuidad se usa la divergencia del campo de flujo másico ρV , es decir= $\nabla \cdot (\rho \vec{V})$.

Entonces la expresión general de la ecuación de conservación de masa quedaría así: (Flow Science, 2023)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (37)$$

En este caso al ser un fluido incompresible la densidad es constante por ende se anula y la ecuación queda simplificada:

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (38)$$

Esto significa que la suma de las variaciones espaciales de las componentes de la velocidad es nula. En otras palabras, la masa que entra a un volumen de control es igual a la que sale, sin que el volumen de fluido se expanda o contraiga.

Esta expresión indica que la suma de las variaciones espaciales de la velocidad debe ser cero. En la práctica, al usar CFD, no se trabaja con derivadas exactas, sino con aproximaciones en celdas o volúmenes finitos.

En síntesis, la ecuación nos indica que el volumen del fluido no se expande ni se contrae; la masa que entra a un volumen de control es igual a la que sale

Forma integral

$$\begin{aligned} \int_{Vc} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) dV &= 0 \\ \Rightarrow \int_{Vc} (\nabla \cdot \vec{V}) dV &= 0 \end{aligned} \quad (39)$$

Aplicando la ecuación (27) que es el teorema de divergencia de gauss se obtiene la siguiente ecuación

$$\int_{Sc} \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (40)$$

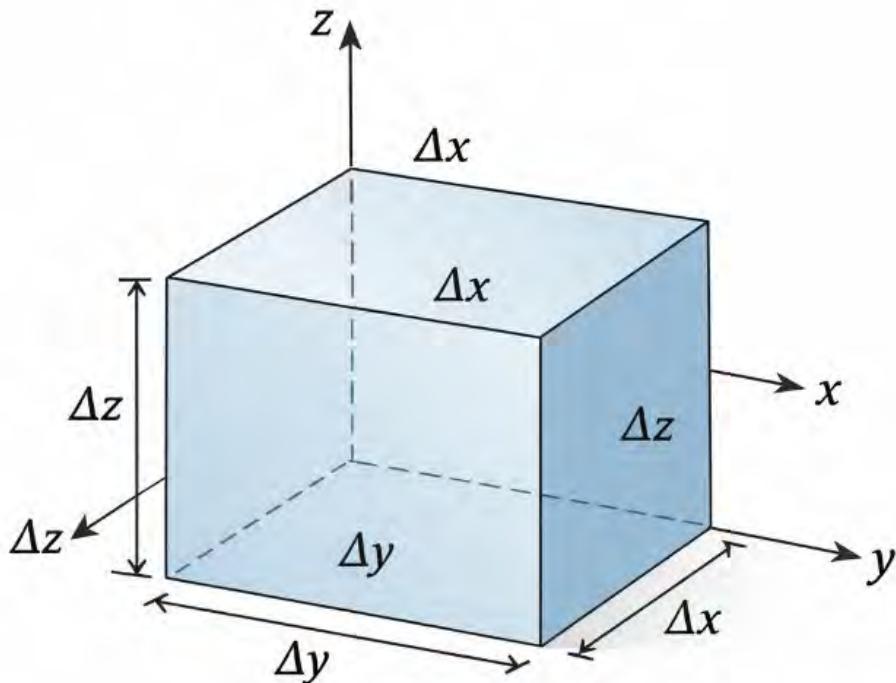
Esta ecuación se entiende que el flujo neto que entra y sale del volumen de control es nulo.

Discretización en un volumen finito cúbico

Imaginemos un cubo con dimensiones $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. La integral se convierte en sumas de flujos en las caras del cubo:

Figura 12

Cubo para poder entender la discretización



Nota: Extraído de Hidráulica General de Sotelo Avila

$$[u \cdot \Delta y \Delta z]_x^{x+\Delta x} + [v \cdot \Delta x \Delta z]_y^{y+\Delta y} + [w \cdot \Delta x \Delta y]_z^{z+\Delta z} = 0 \quad (41)$$

Expandiendo los términos tenemos

$$(u_{x+\Delta x} - u_x) \Delta y \Delta z + (v_{y+\Delta y} - v_y) \Delta x \Delta z + (w_{z+\Delta z} - w_z) \Delta x \Delta y = 0 \quad (42)$$

Cada término representa el flujo que entra y sale por las caras opuestas del volumen. Al dividir entre el volumen $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$:

$$\frac{(u_{x+\Delta x} - u_x)}{\Delta x} + \frac{(v_{y+\Delta y} - v_y)}{\Delta y} + \frac{(w_{z+\Delta z} - w_z)}{\Delta z} = 0 \quad (43)$$

Como el tamaño de estas celdas son pequeñas cada cociente incremental se convierte en una derivada parcial, por definición matemática lo llevamos al límite y nos da la ecuación diferencial de continuidad para flujo incompresible.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\Rightarrow \nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (44)$$

La discretización de la ecuación de continuidad garantiza que, en cada volumen finito de la malla, el balance de flujo volumétrico sea nulo, asegurando así la conservación de masa para un fluido incompresible.

2.2.23.5 Ecuación de conservación de momento

La cantidad de movimiento en un sistema es el producto entre su masa y la velocidad. Este principio es una reafirmación de la Segunda Ley de Newton, la cual afirma que la aceleración de un cuerpo es proporcional a la fuerza neta que actúa sobre el sistema e inversamente proporcional a su masa. Por lo tanto, la cantidad de movimiento en un sistema se conserva: (Flow Science, 2023).

Para poder encontrar la ecuación de conservación de momento partimos de la ecuación de transporte de Reynolds.

$$\frac{dB_{sist.}}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho b \, dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} \, dA \quad (45)$$

Para hallar la ecuación de momentum

$$B = \vec{P}, \text{Propiedad extensiva}$$

$$\vec{P} = m \vec{V}$$

$$b = \frac{B}{m}, \text{Propiedad intensiva}$$

$$B_{sist.} = \int_{sist} \rho b \, dV$$

$$\frac{d}{dt} \left(\int_{sist} \rho \vec{V} dV \right) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA \quad (46)$$

El primer término significa el cambio temporal del momentum dentro del volumen de control

EL segundo termino significa el momentum que entra o sale del volumen por movimiento del fluido.

Segunda Ley de Newton (forma integral)

$$\frac{d}{dt} \int_{sist} \rho \vec{V} dV = \sum \vec{F} \quad (47)$$

Según la mecánica de fluidos las fuerzas se dividen en fuerzas de volumen y fuerzas de superficie las cuales son:

Las fuerzas de volumen actúan sobre toda la masa del fluido.

$$\vec{F}_{vol} = \int_{VC} \rho \vec{g} dV \quad (48)$$

Las fuerzas de superficie actúan a través de las fronteras del fluido (esfuerzos).

$$\vec{F}_{sup} = \int_{SA} \sigma \cdot \vec{n} dA \quad (49)$$

Entonces la ecuación (43) quedaría así :

$$\frac{d}{dt} \int_{sist} \rho \vec{V} dV = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SA} \sigma \cdot \vec{n} dA \quad (50)$$

Donde:

$\rho dV = dm$, Relacion entre el volumen diferencial con la masa diferencial

\vec{g} = aceleración de la gravedad

σ = tensor de tensiones

Igualamos la ecuación (42) con la (46)

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{SA} \sigma \cdot \vec{n} dA \quad (51)$$

Aplicando el teorema de Gauss, se convierte la integral de superficie en integral de volumen:

El lado izquierdo mide cuánto del campo “sale o entra” del volumen.

El lado derecho mide cuánto se genera o se acumula dentro del volumen.

$$\int_{SC} \vec{F} \cdot \mathbf{n} dA = \int_{VC} \nabla \cdot \vec{F} dV \quad (52)$$

En mecánica de fluidos, las fuerzas superficiales no se describen con un vector cualquiera, sino con el tensor de tensiones σ

$$\int_{SC} \sigma \cdot \mathbf{n} dA = \int_{VC} \nabla \cdot \sigma dV \quad (53)$$

teorema de Gauss de forma tensorial $\vec{F} = T = \rho \vec{V} \vec{V}$:

$$\begin{aligned} \int_{SC} T \cdot n dA &= \int_{VC} \nabla \cdot T dV \\ \Rightarrow \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA &= \int_{VC} \nabla \cdot \rho \vec{V} \vec{V} dV \end{aligned} \quad (54)$$

Ahora la ecuación (47) lo llevamos todos sus terminos a términos de volumen de control

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{VC} \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) dV = \int_{VC} \rho \vec{g} dV + \int_{VC} \nabla \cdot \sigma dV \quad (55)$$

Agrupamos todos los términos dentro de una sola integral:

$$\int_{VC} \left[\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \nabla \cdot \sigma \right] dV = 0 \quad (56)$$

Como el volumen es arbitrario y la integral es cero entonces

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) - \rho \vec{g} - \nabla \cdot \sigma = 0 \quad (57)$$

se obtiene la forma local (diferencial) de la ecuación de momentum:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho\vec{g} + \nabla \cdot \sigma \quad (58)$$

Efectuamos la igualdad que hay entre el flujo de momentum y la aceleración convectiva

$$\nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} \quad (59)$$

Remplazamos la ecuación (61) en la ecuación (60) nos quedaría la **ecuación de momentum**

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \rho\vec{g} + \nabla \cdot \sigma \quad (60)$$

Donde:

$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t}$ = Aceleración local del momentum ($N \cdot m^{-3}$)

$\nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V})$ = Aceleración convectiva ($N \cdot m^{-3}$)

$\rho\vec{g}$ = Fuerzas de cuerpo (gravedad), ($N \cdot m^{-3}$)

$\nabla \cdot \sigma$ = Fuerzas superficiales internas (tensiones) ($N \cdot m^{-3}$)

discretización de las ecuaciones de momentum

Descomposición del vector velocidad

$$\vec{V} = (u, v, \omega) \quad (61)$$

Donde:

u = Velocidad en x ($m \cdot s^{-1}$)

v = Velocidad en y ($m \cdot s^{-1}$)

ω = Velocidad en z ($m \cdot s^{-1}$)

Expansión del término transitorio

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho v)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} \right) \quad (62)$$

Expansión del término convectivo

$$(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \begin{pmatrix} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \\ u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (63)$$

Expansión del gradiente de presión

$$\nabla p = \left(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (64)$$

Expansión continua del tensor de tensores

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} + \sigma_{xy} + \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} + \sigma_{yy} + \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} + \sigma_{zy} + \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (65)$$

La divergencia quedaría:

$$\nabla \cdot \sigma = \begin{bmatrix} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (66)$$

Dirección X

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) = +\rho g_x + \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} \right) \quad (67)$$

Dirección Y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) = +\rho g_y + \left(\frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} \right) \quad (68)$$

Dirección Z

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) = +\rho g_z + \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) \quad (69)$$

2.2.23.6 Ecuación de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes se obtienen a partir de la ecuación general de conservación de cantidad de movimiento al introducir un modelo constitutivo para las tensiones viscosas, asumiendo un fluido newtoniano e incompresible, lo que permite expresar las fuerzas internas en función del campo de velocidades. Para poder desarrollar la ecuación de Navier-Stokes partimos de la ecuación de momentum

Primero descomponemos el tensor de tensores

$$\sigma = -pI + \tau \quad (70)$$

Donde:

p = Presión (Pa)

I = Tensor identidad

τ = Tensor viscoso

sustituimos el tensor de tensores en la ecuación (60)

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho\vec{g} + \nabla \cdot (-pI + \tau) \quad (71)$$

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho\vec{g}$$

Expansión del término convectivo

$$\nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} + \vec{V}(\nabla \cdot \rho\vec{V}) \quad (72)$$

Como en este caso el fluido es incompresible entonces:

$$\rho = cte$$

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Entonces $\nabla \cdot (\rho\vec{V}) = 0$, la ecuación (63) quedaría así:

$$\nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} \quad (73)$$

Remplazamos la ecuación (64) en la ecuación (62) nos quedaría

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho\vec{g} \quad (74)$$

Para un **fluido newtoniano** el tensor viscoso tiene el siguiente valor:

$$\tau = \mu [\nabla\vec{V} + [\nabla\vec{V}]^T] \quad (75)$$

Así mismo aplicando divergencia (fluido incompresible)

$$\nabla \cdot \tau = \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (76)$$

Donde ∇^2 es el laplaciano vectorial,

Entonces remplazamos la ecuación (78) en la ecuación (76) obtenemos la ecuación de **NAVIER-STOKES**

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho\vec{g} \quad (77)$$

Donde:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} &= Aceleración local (N \cdot m^{-3}) \\
 \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} &= Aceleración convectiva (N \cdot m^{-3}) \\
 -\nabla p &= Fuerza de presión (N \cdot m^{-3}) \\
 \mu\nabla^2\vec{V} &= Fuerzas viscosas (N \cdot m^{-3}) \\
 \rho\vec{g} &= Fuerzas de cuerpo (N \cdot m^{-3})
 \end{aligned}$$

discretización de la ecuación de Navier-Stokes

Descomposición del vector velocidad

$$\vec{V} = (u, v, \omega) \quad (78)$$

Donde:

u = Velocidad en x ($m \cdot s^{-1}$)

v = Velocidad en y ($m \cdot s^{-1}$)

ω = Velocidad en z ($m \cdot s^{-1}$)

Expansión del término transitorio

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} = \left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho v)}{\partial t}, \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} \right) \quad (79)$$

Expansión del término convectivo

$$(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = \begin{pmatrix} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \\ u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (80)$$

Expansión del gradiente de presión

$$\nabla p = \left(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right) \quad (81)$$

Expansión del laplaciano de velocidad

$$\nabla^2\vec{V} = (\nabla^2 u, \nabla^2 v, \nabla^2 \omega) \quad (82)$$

$$\begin{aligned}\nabla^2 u &= \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \\ \Rightarrow \nabla^2 v &= \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \\ \nabla^2 \omega &= \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2}\end{aligned}$$

Ecuaciones de NAVIER–STOKES por dimensión (forma continua)

$$\frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \quad (83)$$

Dirección X

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (84)$$

Dirección Y

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \quad (85)$$

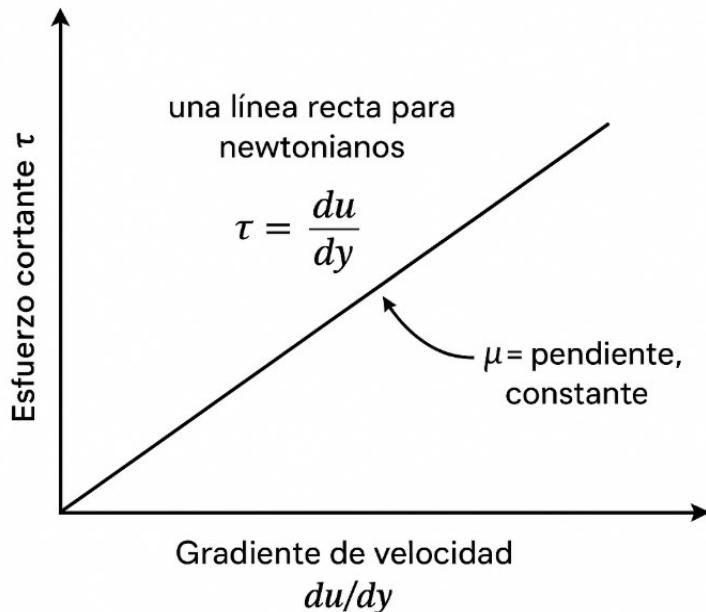
Dirección Z

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \rho \left(u \frac{\partial \omega}{\partial x} + v \frac{\partial \omega}{\partial y} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \quad (86)$$

Formulación particular de la conservación de momento para fluidos newtonianos, integrando aceleraciones, presiones y esfuerzos viscosos. En la simulación de Tipón, reproducen transiciones de régimen, disipación de energía y patrones de recirculación en estructuras hidráulicas.

Figura 13

Relación esfuerzo cortante y gradiente de velocidad, Conservación de momento



Nota: Extraído de Chow 2010.

Explica la conservación del momento en fluidos newtonianos

Para comprender mejor estas ecuaciones discretizaremos las ecuaciones para CFD con volúmenes finitos considerando una malla cartesiana uniforme, para ello definimos los siguientes términos

$i, j, k = \text{Nodo}$

$\Delta x, \Delta y, \Delta z = \text{Espaciamientos}$

$paso n = \text{Tiempo}$

$u_{i,j,k}^n, v_{i,j,k}^n, w_{i,j,k}^n = \text{velocidades en el centro de la celda.}$

$p_{i,j,k}^n = \text{presión en el centro}$

$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \text{viscosidad cinemática}$

Ecuaciones de NAVIER–STOKES por dimensión (forma continua)

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla p + \mu\nabla^2\vec{V} + \rho\vec{g} \quad (87)$$

Ordenamos la ecuación para discretizar

$$\frac{\partial(\vec{V})}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{V} + \vec{g} \quad (88)$$

$$\frac{\partial(u)}{\partial t} + \left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + \omega\frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} + \nu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) + \rho g_x \quad (89)$$

Discretización del tiempo (Forward Euler) en el punto(i,j,k):

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{i,j,k}^n \approx \frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} \quad (90)$$

Discretización termino convectivo

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j,k}^n \approx \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (91)$$

Multiplicamos por la velocidad y repetimos en x, y ,z

Derivada en x

$$u \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{i,j,k}^n \Rightarrow u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (92)$$

Derivada en y

$$v \frac{\partial u}{\partial y} \Big|_{i,j,k}^n \Rightarrow v_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta y} \quad (93)$$

Derivada en z

$$\omega \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{i,j,k}^n \Rightarrow \omega_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta z} \quad (94)$$

Termino convectivo completo

$$(\vec{V} \cdot \nabla)u \approx \left(u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta y} + \omega_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta z} \right) \quad (95)$$

Discretización del gradiente de presión

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{i,j,k}^n \approx \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (96)$$

Entonces

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \Rightarrow -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} \quad (97)$$

Discretización termino viscoso (Laplaciano)

En x

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} \quad (98)$$

En y

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \approx \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} \quad (99)$$

En z

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \approx \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \quad (100)$$

Termino Laplaciano completo

$$\nabla^2 u_{i,j,k}^n \approx \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \quad (101)$$

Con todos estos términos discretizados remplazamos en cada componente de la ecuación general

Componente en X

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \left(u_{i,j,k}^n \frac{u_{i+1,j,k}^n - u_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j+1,k}^n - u_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + w_{i,j,k}^n \frac{u_{i,j,k+1}^n - u_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \right) = \\ & -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j,k}^n - p_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + \nu \left(\frac{u_{i+1,j,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1,k}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{u_{i,j,k+1}^n - 2u_{i,j,k}^n + u_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \end{aligned} \quad (102)$$

Componente en Y

$$\frac{v_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \left(u_{i,j,k}^n \frac{v_{i+1,j,k}^n - v_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j+1,k}^n - v_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + \omega_{i,j,k}^n \frac{v_{i,j,k+1}^n - v_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j+1,k}^n - p_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + \nu \left(\frac{v_{i+1,j,k}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{v_{i,j+1,k}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{v_{i,j,k+1}^n - 2v_{i,j,k}^n + v_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \quad (103)$$

Componente en Z

$$\frac{\omega_{i,j,k}^{n+1} - \omega_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \left(u_{i,j,k}^n \frac{\omega_{i+1,j,k}^n - \omega_{i-1,j,k}^n}{2\Delta x} + v_{i,j,k}^n \frac{\omega_{i,j+1,k}^n - \omega_{i,j-1,k}^n}{2\Delta y} + \omega_{i,j,k}^n \frac{\omega_{i,j,k+1}^n - \omega_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{p_{i,j,k+1}^n - p_{i,j,k-1}^n}{2\Delta z} + \nu \left(\frac{\omega_{i+1,j,k}^n - 2\omega_{i,j,k}^n + \omega_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \frac{\omega_{i,j+1,k}^n - 2\omega_{i,j,k}^n + \omega_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \frac{\omega_{i,j,k+1}^n - 2\omega_{i,j,k}^n + \omega_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2} \right) \quad (104)$$

2.2.23.7 Ecuación de conservación de energía

El principio de conservación de la energía establece que la variación o razón de cambio de la energía interna dentro de un volumen de control es igual a la diferencia entre las razones de transferencia de calor y trabajo hacia dicho volumen. En los flujos de fluidos, este principio se formula considerando la energía total del sistema, compuesta por la energía interna, cinética y potencial del fluido. (Flow Science, 2023)

En el contexto de flujos incompresibles donde no se considera la transferencia de calor, puede asumirse un flujo isotérmico (a temperatura constante), lo cual implica que no se requiere resolver la ecuación de conservación de la energía. Sin embargo, cuando se requiere evaluar la transferencia de calor o procesos termodinámicos, esta ecuación toma la siguiente forma general: (Flow Science, 2023)

$$\frac{\partial(ep)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \vec{v} (e + \frac{P}{\rho}) \right] = \nabla \cdot (k \nabla T + \vec{\tau} \cdot \vec{v}) \quad (105)$$

Donde:

ep = Energia total por unidad de masa

\vec{v} = vector velocidad

P = Presion

ρ = Densidad

T = Temperatura

k = Conductividad térmica

$\vec{\tau}$ = Tensor de esfuerzos viscosos

2.2.23.8 Modelos de turbulencia:

Los modelos de turbulencia son fundamentales para resolver las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía en flujos turbulentos, donde la naturaleza caótica y multifacética del movimiento del fluido dificulta la resolución directa de las ecuaciones de Navier-Stokes. En particular, los modelos de turbulencia permiten aproximar el efecto de los remolinos y fluctuaciones pequeñas sobre el flujo promedio, facilitando la simulación numérica y el análisis computacional con un costo computacional razonable. (Flow Science, 2023)

Uno de los modelos más utilizados es el RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), que consiste en promediar las variables de flujo en el tiempo, separándolas en una componente media y una fluctuante. Esto transforma las ecuaciones de Navier-Stokes originales en un conjunto de ecuaciones promedio, en las cuales se introduce el término de tensiones de Reynolds, que representan el efecto de la turbulencia en el flujo promedio. Este método es ampliamente empleado debido a su balance entre precisión y eficiencia computacional, siendo ideal para simular flujos turbulentos de gran escala en ingeniería hidráulica y ambiental (Flow Science, 2023).

Dentro de los modelos basados en RANS, destaca el modelo $k-\omega$ (k-omega), desarrollado por Wilcox, que modela la turbulencia a través de dos variables transportadas: la energía cinética turbulenta (k) y la tasa de disipación específica (ω). Este modelo es particularmente efectivo en regiones cercanas a las paredes sólidas, zonas con recirculación, curvaturas intensas y flujos internos con separación de flujo y chorros, donde los modelos convencionales pueden perder precisión. Además, el modelo $k-\omega$ se adapta bien a flujos con números de Reynolds bajos, lo que lo hace una herramienta robusta para simular sistemas hidráulicos complejos como los canales y acueductos del complejo arqueológico de Tipón (Flow Science, 2023).

2.2.23.8.1 Ecuaciones K-w

Ecuación de la energía cinética turbulenta (k):

$$\frac{\partial(pk)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = P_k - \beta \times \rho k w + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (106)$$

Ecuación de la tasa de disipación específica (ω):

$$\frac{\partial(pw)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w u_j)}{\partial x_j} = \alpha \frac{w}{k} P_k - \beta \rho w^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_w \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x_j} \right] \quad (107)$$

En el modelo de turbulencia k- ω utilizado en la simulación CFD, la ecuación de transporte de k cuantifica la generación y difusión de energía cinética turbulenta producida por gradientes de velocidad, mientras que la ecuación de ω determina la tasa a la que dicha turbulencia se disipa en el flujo. Su resolución conjunta en FLOW-3D permitió caracterizar con precisión la intensidad y el decaimiento de la turbulencia en el sistema hidráulico de Tipón, reproduciendo fenómenos como remolinos, zonas de recirculación y disipación de energía en estructuras de caída y cambios de sección.

2.2.24 Parámetros del CFD en FLOW-3D

En el contexto de la dinámica de fluidos computacional (CFD), los parámetros de configuración determinan el comportamiento físico y numérico del modelo. En **FLOW-3D**, estos parámetros se clasifican en físicos, geométricos y numéricos, y deben definirse con precisión para garantizar la validez de los resultados (Flow Science, 2023).

2.2.24.1 Parámetros físicos del fluido

Densidad (ρ): masa por unidad de volumen del fluido, influye en el cálculo de la inercia y presión.

Viscosidad dinámica (μ): resistencia interna del fluido al movimiento.

Compresibilidad: define si el fluido se modela como compresible o incompresible.

Tensión superficial (σ): relevante en flujos con interfaz aire–agua o microescala.

Propiedades térmicas: conductividad térmica y calor específico, cuando se simula transferencia de calor (Flow Science, 2023).

2.2.24.2 Parámetros de geometría y dominio:

Dimensiones del dominio de simulación: espacio físico en el que se resuelven las ecuaciones.

Resolución de la malla: tamaño y refinamiento de celdas cartesianas, influye directamente en la precisión y el tiempo de cálculo.

Representación de obstáculos (FAVORTM): definición de la fracción de volumen/área ocupada por sólidos en cada celda (Flow Science, 2023).

2.2.24.3 Parámetros de condiciones de contorno:

Entrada: caudal, velocidad, presión o perfil de velocidad.

Salida: presión constante, flujo libre o condiciones de amortiguamiento.

Paredes: rugosidad, fricción y tipo de condición (deslizante o no deslizante).

Condiciones periódicas: para simular secciones repetitivas (Flow Science, 2023).

2.2.24.4 Parámetros numéricos:

Tamaño de paso de tiempo (Δt): determinado por el número de Courant–Friedrichs–Lewy (CFL) para garantizar estabilidad.

Esquemas de discretización: centrados, upwind, o híbridos, según estabilidad y precisión deseada.

Criterios de convergencia: tolerancia del error residual para considerar la solución estable.

Modelos adicionales: transporte de partículas, sedimentación, cavitación, disipación de energía, entre otros (Flow Science, 2023).

La correcta selección de estos parámetros es esencial para representar fielmente el fenómeno físico y obtener resultados que sean comparables con mediciones experimentales o datos teóricos

2.2.25 Aplicaciones del CFD en sistemas hidráulicos ancestrales

2.2.25.1 Diseño y eficiencia de acueductos

“El análisis de acueductos antiguos mediante CFD puede revelar detalles sobre su capacidad de transporte de agua y eficiencia. Por ejemplo, estudios han utilizado CFD para investigar el acueducto de Segovia, determinando cómo se gestionaba el flujo de agua y minimizaban las pérdidas.”(Anderson, 1995).

2.2.25.2 Sistemas de drenaje y alcantarillado

“Los sistemas de drenaje y alcantarillado de antiguas ciudades como Roma y Mohenjo-Daro también han sido objeto de estudio con CFD. Estas simulaciones ayudan a comprender cómo se manejaban las aguas residuales y se evitaban inundaciones, proporcionando información valiosa sobre las prácticas de saneamiento de la época.”(Anderson, 1995).

2.2.25.3 Gestión de recursos hídricos.

“CFD se ha aplicado para modelar la gestión de recursos hídricos en civilizaciones como los mayas, quienes construyeron complejos sistemas de cisternas y canales para almacenar y distribuir agua. Estos estudios revelan cómo estas sociedades lograron sobrevivir en ambientes áridos y manejaron sus recursos de manera eficiente.”(Anderson, 1995).

2.3 Hipótesis

2.3.1 *Hipótesis General:*

La Dinámica de Fluidos Computacional permite evaluar las características y principios fundamentales del diseño del sistema hidráulico inca, evidenciando que este optimiza el uso del agua a través de estructuras adaptativas y eficientes, que minimizan pérdidas y se integran de manera sostenible y en armonía con la topografía y el entorno natural de Tipón.

2.3.2 *Hipótesis Específicas:*

La ubicación de Tipón responde a la **topografía** regional y al acceso a fuentes hídricas, aprovechadas mediante terrazas y pendientes que optimizan el control del flujo por gravedad y aseguran el funcionamiento eficiente y sostenible del sistema hidráulico inca.

Los **materiales naturales** empleados en las obras hidráulicas incas de Tipón, como la piedra tallada y materiales terrosos, presentan propiedades de rugosidad y permeabilidad que contribuyen a la disipación de energía, control de filtraciones y al control de la erosión.

Las **características geométricas** de los canales y estructuras hidráulicas de Tipón presentan secciones y pendientes diseñadas para evitar desbordamientos y optimizar de manera eficiente el comportamiento del flujo.

Las **propiedades del fluido** del sistema hidráulico inca de Tipón se caracterizan por una viscosidad baja y una distribución de presión uniforme a lo largo del sistema, lo que evita puntos de alta presión que puedan generar daños estructurales y asegura un flujo estable.

El **flujo** del sistema hidráulico inca de Tipón es predominantemente subcrítico en secciones largas y condiciones críticas en áreas específicas, lo que favorece la estabilidad y eficiencia en la conducción del agua.

2.4 Variables

2.4.1 Identificación de variables

Sistema hidráulico inca Tipón

2.4.2 Operacionalización de variables

Tabla 4

Matriz de operacionalización de variables

VARIABLE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN	INSTRUMENTOS
			Topografía del terreno	*Pendiente *Elevaciones digitales *Curvas de Nivel	*Metros *msnm	
			Materiales de conformación	*Características físicas del enrocamiento *Rugosidad	*Tipo de roca *Coeficiente de rugosidad(n)	*Dron rtk con sensor LiDAR *Lspiv *Camaras fotograficas a 120fps
Sistema hidráulico inca de Tipón	Infraestructura destinada a fines agrícolas y ceremoniales desarrollada por los incas para captar y conducir el agua de manera sostenible y eficiente	Se evaluará el sistema hidráulico de Tipón definiendo sus características principales para entender su funcionamiento y diseño hidráulico.	Características geométricas	*Forma Geométrica *Pendiente *Ancho *Altura *Radio Hidráulico *Perímetro mojado	- *% *Metros *Metros *Metros *Metros	*Flow - 3d *Trípodes *Vertederos *Termómetros *Gps diferencial *winchas *escalímetros *flotadores
			Fluido	*Densidad *Viscosidad *Temperatura	kg/m ³ Pa-s C°	
			Flujo	*Caudal liquido *Velocidad promedio *Régimen hidráulico	*m ³ /s *m/s *Número de Froude	

Nota: Elaboración propia

2.5 Definición de términos básicos:

2.5.1 Sistema hidráulico inca:

Conjunto de obras y estructuras destinadas a la captación, conducción, almacenamiento y distribución del agua, caracterizadas por su precisión, durabilidad y adaptación al entorno andino.

2.5.2 Tipón:

Parque arqueológico ubicado en Cusco, considerado una de las más grandes expresiones de ingeniería hidráulica inca, con canales, fuentes y andenes que ejemplifican el dominio técnico de esta civilización.

2.5.3 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD):

Herramienta de la mecánica de fluidos que utiliza algoritmos numéricos para analizar y simular el comportamiento de los fluidos en diferentes condiciones y geometrías.

2.5.4 Modelo matemático:

Esquema de representación simplificada de un fenómeno físico a través de ecuaciones que permiten describir y predecir su comportamiento.

2.5.5 Simulación computacional:

Técnica que permite recrear fenómenos físicos en un entorno virtual para observar su dinámica sin necesidad de experimentación directa.

2.5.6 Ecuaciones de Navier-Stokes:

Ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de los fluidos considerando la conservación de la masa, la cantidad de movimiento y la energía.

2.5.7 Número de Reynolds:

Parámetro adimensional que determina el régimen de flujo (laminar o turbulento) al relacionar las fuerzas inerciales y viscosas.

2.5.8 *Ecuación de continuidad:*

Expresión matemática que garantiza la conservación de la masa en un sistema de flujo.

2.5.9 *Andenes:*

Terrazas agrícolas construidas en laderas, que además de permitir el cultivo, actúan como reguladores del agua y mecanismos de control de erosión.

2.5.10 *Canal hidráulico:*

Infraestructura construida para conducir agua desde una fuente hacia un área de uso; en Tipón se caracteriza por su diseño en piedra y precisión en la nivelación.

2.5.11 *Acueducto:*

Conducto que transporta agua a largas distancias mediante canales abiertos, túneles o puentes, permitiendo superar la topografía accidentada.

2.5.12 *Fuente ceremonial:*

Estructura hidráulica destinada no solo a la distribución del agua, sino también a fines rituales y simbólicos dentro de la cosmovisión andina.

2.5.13 *Turbulencia:*

Estado del flujo caracterizado por movimientos irregulares, vórtices y variaciones de velocidad en el tiempo y espacio.

2.5.14 *Flujo laminar:*

Tipo de flujo en el cual las partículas de fluido se mueven en trayectorias paralelas, ordenadas y estables.

2.5.15 *Viscosidad:*

Propiedad del fluido que mide su resistencia interna al movimiento o deformación.

2.5.16 Presión hidrostática:

- Fuerza ejercida por un fluido en reposo sobre las superficies en contacto, proporcional a la profundidad y densidad de este.

2.5.17 Caudal:

Volumen de fluido que atraviesa una sección de un conducto por unidad de tiempo, expresado generalmente en m³/s.

2.5.18 Gradiente hidráulico:

Variación de la energía o presión en un fluido a lo largo de una distancia determinada, clave en el diseño y análisis de sistemas de flujo.

2.5.19 Teorema de Reynolds:

Principio matemático que permite transformar la formulación integral de la conservación de propiedades en un volumen de control a una forma diferencial.

2.5.20 Malla computacional:

División del dominio de estudio en pequeñas celdas o elementos que permiten la resolución numérica de las ecuaciones de flujo en CFD.

2.5.21 Condiciones de frontera:

Restricciones o parámetros impuestos en los límites del modelo de simulación para definir cómo entra, sale o interactúa el flujo con las superficies.

2.5.22 FLOW-3D:

Software especializado de CFD que permite modelar fenómenos hidráulicos complejos como turbulencia, transporte de sedimentos, presión, caudales y disipación de energía.

2.5.23 Energía hidráulica:

Energía total de un fluido en movimiento, compuesta por la energía de presión, cinética y potencial.

2.5.24 Perdida de carga:

Disminución de energía en un sistema hidráulico debido a la fricción o a singularidades en la conducción.

CAPITULO III: METODOLOGIA

3.1 Ámbito de estudio: localización política y geográfica

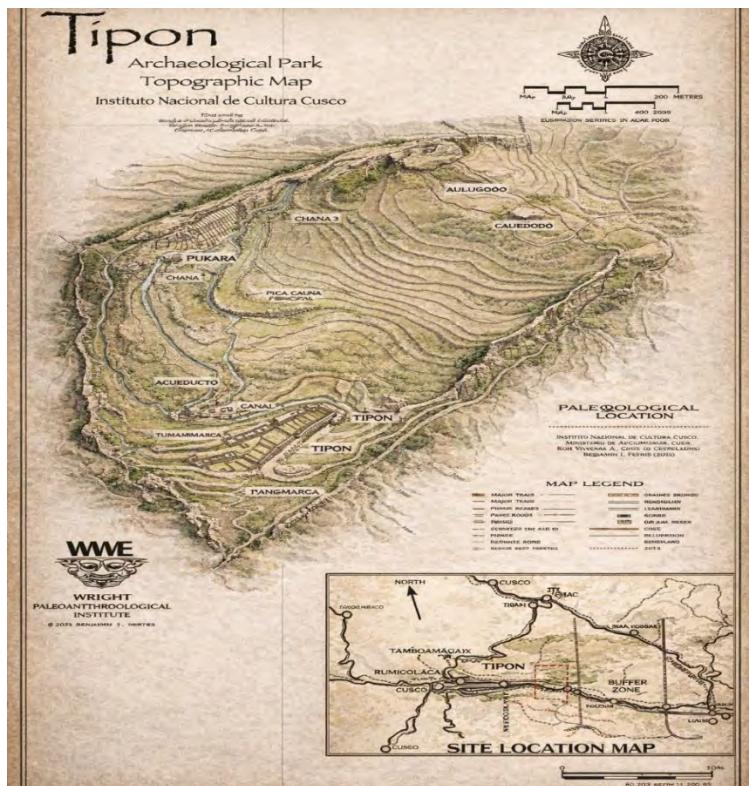
El complejo arqueológico de Tipón se encuentra ubicado a 21 Km al sureste de Cusco, en la comunidad de Choquepata, en el distrito de Oropesa, provincia de Quispicanchis, departamento del Cusco. A una altitud entre 3650 y 3950 metros sobre el nivel del mar. (Ministerio de Cultura, s. f.).

En las coordenadas latitud 13°34'15"Sur y longitud 71°46'59"Oeste. De acuerdo con el sistema de coordenadas WGS84.(Wright et al., 2021).

Tipón tiene una extensión de 240 hectáreas aproximadamente en un perímetro de 6,445 metros lineales representados en la siguiente imagen (Wright et al., 2021).

Figura 14

Mapa topográfico y foto aérea del parque arqueológico de Tipón



Nota: Extraído del libro: Tipón: masterpiece of hydraulic engineering from the Inca Empire (P-6)

3.2 Tipo de investigación

La investigación tiene “Un enfoque **cuantitativo**”, ya que las variables fueron medidas numéricamente, lo que permitió medir y analizar datos cuantitativos para determinar las características y el comportamiento del sistema hidráulico de Tipón permitiéndonos evaluar su funcionamiento y eficiencia. (Elaboración propia)

Según Sampieri (2014), una investigación bajo el enfoque cuantitativo busca **describir, explicar, comprobar y predecir los fenómenos** (causalidad), generar y probar teorías. Por eso, se recolectan datos con instrumentos estandarizados y validados, para demostrar su confiabilidad; de esa manera se acota intencionalmente la información, midiendo con precisión las variables del estudio. (Hernández Sampieri, 2014)

3.3 Alcance de la investigación

El alcance de la investigación es “**Exploratorio – Descriptivo**” debido a que no se cuenta con muchos estudios acerca del sistema hidráulico de este parque arqueológico y esta investigación sería una base para futuros estudios. La investigación se centra en estudiar la variable de estudio “Sistema Hidráulico inca” con el fin de evaluar sus características y comportamiento, con ayuda del CFD.

“El nivel de investigación descriptivo recoge datos de manera independiente sobre las variables analizadas sin establecer relaciones entre ellas.”(Hernández Sampieri, 2014)

Por otro lado, según Hernández Sampieri (2014), los estudios de alcance exploratorios se realizan cuando el objetivo del estudio es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes con mayor amplitud. (Hernández Sampieri, 2014)

3.4 Diseño de investigación

Según el diseño, la investigación es **no experimental**, ya que no se manipula de manera intencional la variable de estudio: “Sistema hidráulico inca”. En este tipo de investigaciones, las variables independientes no son alteradas deliberadamente, sino que los fenómenos se analizan tal como se presentan en su contexto natural.

En este caso, el análisis del sistema hidráulico de Tipón se desarrolló a través de la observación, registro y caracterización de sus condiciones reales. Para ello, se realizaron levantamientos topográficos con tecnología LiDAR, con el objetivo de obtener el relieve detallado del parque arqueológico; posteriormente, se aplicó la metodología LSPIV para caracterizar el flujo, y finalmente se llevaron a cabo simulaciones tridimensionales mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) en el software FLOW-3D, con la finalidad de evaluar el comportamiento hidráulico de las estructuras.

De acuerdo con (Hernández Sampieri, 2014), la investigación no experimental se define como aquella en la que “no se manipulan intencionalmente las variables independientes, sino que se observan fenómenos tal como se dan en su contexto natural, para después analizarlos” (p. 152). En este sentido, el presente estudio corresponde a un diseño **no experimental de tipo transversal**, dado que la recolección de datos se realizó en un solo momento, específicamente a fines del año 2024, con el propósito de describir y evaluar las características hidráulicas del sistema inca de Tipón en su estado actual.

3.5 Unidad de análisis

La unidad de análisis está constituida por las estructuras que conforman el sistema hidráulico inca del Parque Arqueológico de Tipón, tales como canales, acueductos, caídas de agua,

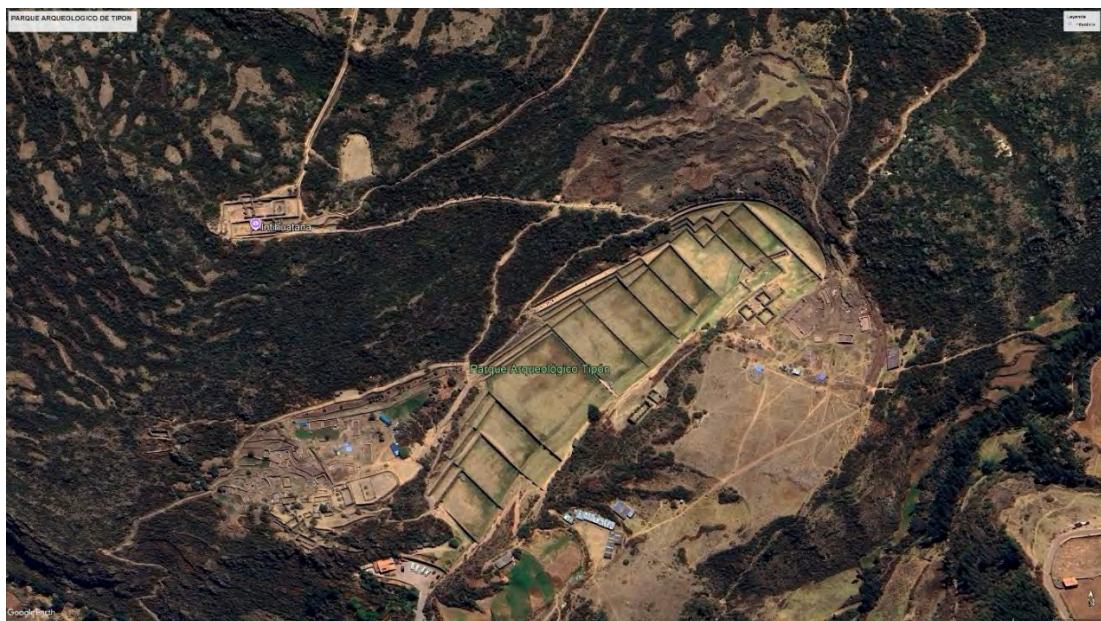
obras de arte hidráulicas y terrazas agrícolas, sobre las cuales se realiza el análisis hidráulico y la modelación numérica. (Elaboración propia).

3.6 Población de estudio

La población de estudio está conformada por la totalidad de las estructuras hidráulicas del sistema hidráulico inca del Parque Arqueológico de Tipón, ubicadas en el distrito de Oropesa, provincia de Quispicanchi, departamento de Cusco. Esta población incluye canales principales y secundarios, acueductos, caídas de agua, obras de arte hidráulicas y terrazas agrícolas que conforman el sistema de conducción y distribución de agua.

Figura 15

Imagen satelital del parque arqueológico de Tipón



Nota: Extraído de Google Earth.

3.7 Tamaño de muestra

El tamaño de la muestra fue definido mediante un muestreo no probabilístico por criterio técnico, debido a que la selección de las estructuras hidráulicas analizadas respondió a

consideraciones de representatividad funcional, relevancia hidráulica y viabilidad de modelación numérica tridimensional.

En ese sentido, la muestra estuvo conformada por estructuras hidráulicas representativas del sistema hidráulico inca del Parque Arqueológico de Tipón, las cuales permitieron caracterizar el comportamiento del flujo y los principales mecanismos de conducción y disipación de energía del sistema. Las estructuras seleccionadas fueron:

- El canal principal longitudinal al flujo de Tipón.
- El primer tramo del acueducto principal en la parte alta de Tipón.
- La caída de agua ubicada en la terraza N° 2
- Templo del agua.

La selección de estas estructuras permitió realizar simulaciones detalladas mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), garantizando resultados técnicamente representativos del funcionamiento hidráulico global del sistema, sin necesidad de analizar la totalidad de las estructuras existentes.

3.8 Técnicas de recolección de datos

Las técnicas de recolección de datos son:

3.8.1 Observación

Se realizaron visitas técnicas al Parque Arqueológico de Tipón con la finalidad de efectuar una inspección directa del sistema hidráulico inca, permitiendo identificar sus características geométricas, estado de conservación y comportamiento hidráulico general. La observación en campo facilitó el reconocimiento de los tramos y estructuras hidráulicas relevantes para el análisis y la posterior selección de las unidades de estudio.

3.8.2 *Mediciones*

Se realizó un levantamiento topográfico de alta resolución mediante tecnología LiDAR, lo que permitió obtener información detallada del relieve y la geometría del Parque Arqueológico de Tipón. Asimismo, se efectuaron mediciones de las variables hidráulicas del sistema mediante el método Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), complementadas con mediciones directas en campo.

Los datos obtenidos fueron registrados en fichas y formatos de recolección de datos, los cuales se presentan en los anexos de la presente tesis. Ver anexos.

3.8.3 *Revisión de la literatura*

Se realizó una revisión sistemática de estudios históricos, arqueológicos e investigaciones de ingeniería previamente desarrolladas sobre la hidráulica inca y, en particular, sobre el sistema hidráulico de Tipón, con el propósito de contextualizar y complementar la información obtenida mediante el trabajo de campo y el modelamiento numérico.

3.9 Validez y confiabilidad de instrumentos

3.9.1 *Confiabilidad de instrumentos*

La confiabilidad de los instrumentos empleados se garantizó mediante el uso de tecnologías de medición reconocidas por su precisión y reproducibilidad en estudios hidráulicos. Los datos obtenidos a partir del levantamiento topográfico mediante LiDAR y del método LSPIV fueron contrastados con mediciones directas realizadas *in situ* y posteriormente comparados con los resultados de las simulaciones numéricas efectuadas en el software FLOW-3D.

Este procedimiento permitió evaluar la repetibilidad y estabilidad de los valores obtenidos, aplicando un enfoque de triangulación metodológica, lo que contribuyó a minimizar posibles

errores instrumentales y a asegurar la consistencia de la información empleada en el análisis hidráulico.

3.9.2 *Validación de instrumentos*

La validez de los instrumentos empleados se sustentó en su amplia aceptación científica y en su uso recurrente en investigaciones hidráulicas a nivel internacional. En la presente investigación, el LiDAR para levantamientos topográficos, el LSPIV para la caracterización del flujo y el software FLOW-3D para simulaciones de dinámica de fluidos computacional fueron considerados técnicamente válidos al contrastarse sus resultados con mediciones directas en campo y con antecedentes reportados en estudios similares.

La triangulación metodológica permitió corroborar la información desde distintos enfoques, fortaleciendo la validez de los resultados del análisis del sistema hidráulico inca de Tipón.

3.10 Plan de análisis de datos

El análisis de los datos se desarrolló mediante un enfoque comparativo y de triangulación metodológica. Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones numéricas realizadas en FLOW-3D fueron contrastados con los datos hidráulicos recolectados en campo mediante el método LSPIV y mediciones directas, con el fin de evaluar la coherencia y consistencia de los valores obtenidos.

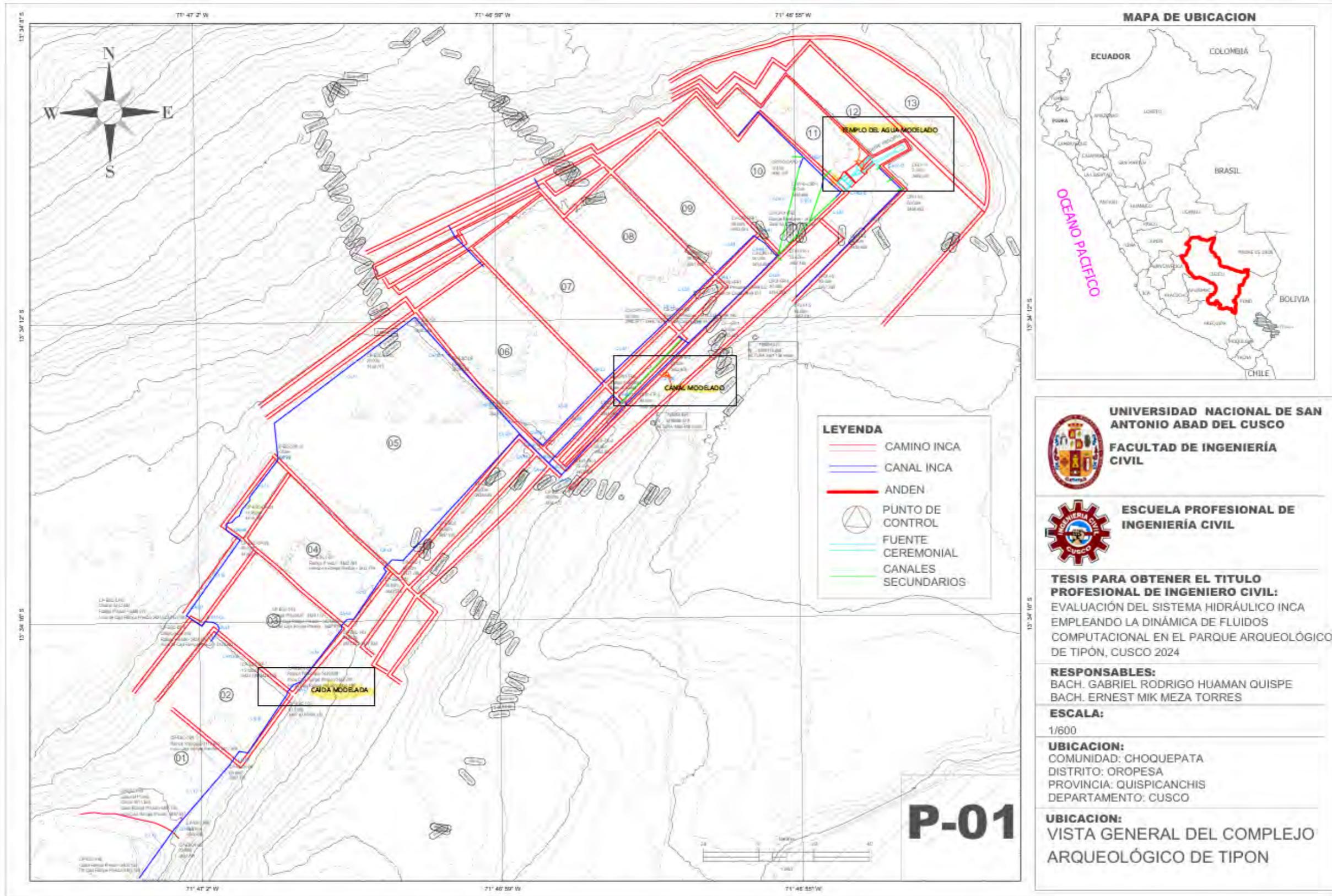
Los resultados se compararon con investigaciones previas sobre el sistema hidráulico de Tipón, lo que permitió validar las hipótesis y fortalecer la solidez y confiabilidad del estudio.

3.11 Planteamiento hidráulico e Inventarios de Canales y caídas de Tipón

Se realizó para tener un mejor control de los canales un mapa de relación de estos, así como el número de terrazas, todo esto se muestra a continuación.

Figura 16

Mapa de inventario de canales y caídas en Tipón



Nota: Se puede apreciar los canales, códigos de canales y caídas, así como el número de terrazas, y esto se ve con mejor resolución y detalle en anexos.

Tabla 5*Inventario de canales y caídas de Tipón*

Nº	Código	Tipo de obra hidráulica	Ubicación
1	F01	Fuente de captación de agua ceremonial (templo del agua)	Terraza 11-12
2	C-H01-D	Canal transversal al flujo que proviene de la fuente F01	Terraza 11
3	C-L01	Canal Longitudinal que proviene de la fuente ceremonial principal	Terraza 11
4	C-H02-D	Canal transversal al flujo que va a la derecha y proviene de la fuente F01	Terraza 10
5	C-H03-I	Canal transversal al flujo que va a la izquierda y proviene de la fuente F01	Terraza 10
6	C-D01	Canal Diagonal principal que sale del canal C-H03-I y una fuente subterránea	Terraza 10
7	C-D02	Canal Diagonal principal que sale del canal C-H03-I y una fuente subterránea	Terraza 10
8	C-L02	Canal longitudinal principal que continua del canal C-H02-D y F01	Terraza 10
9	C-H04-I	Canal transversal al flujo que acaba en la caída CA-H1	Terraza 11
9	CA-H1	Caída transversal al flujo donde inicia el canal C-L04	Terraza 12
10	C-L03	Canal que continua el canal C-L02	Terraza 10
10	F02	Fuente de captación de agua ceremonial 02	Terraza 10
11	C-L04	Canal que continua el canal C-H04-I	Terraza 9
11	CA-L1	Caída donde acaba el canal C-L04 e inicia el canal C-L05	Terraza 9 - 8
12	C-L05	Canal longitudinal que continua el canal C-L04	Terraza 08
12	CA-L2	Caída donde acaba el canal C-L05 e inicia el canal C-L07	Terraza 8 - 7
13	C-L06	Canal longitudinal	Terraza 10
14	C-L07	Canal longitudinal que continua el canal C-L05	Terraza 07
14	CA-L3	Caída donde acaba el canal C-L07 e inicia el canal C-L08	Terraza 7-6
15	C-H05-I	Canal pequeño transversal al flujo	Terraza 6
16	C-L08	Canal longitudinal que continua el canal C-L07	Terraza 6
17	C-L09	Canal longitudinal que proviene de una fuente subterránea	Terraza 6
18	CH06-I	Canal pequeño transversal al flujo	Terraza 5
19	CA-H2	Caída transversal al flujo	Terraza 5
20	C-H07-I	Canal pequeño transversal al flujo	Terraza 5
21	CA-H3	Caída transversal al flujo	Terraza 5
22	C-H08-I	Canal pequeño transversal al flujo	Terraza 5
23	CA-H4	Caída transversal al flujo	Terraza 5

Nota: Se realizo el inventario de canales y caídas de Tipón para tener un mejor manejo de información al realizar las mediciones en campo.

Tabla 6*Inventario de canales y caídas de Tipón parte 2*

Nº	Código	Tipo de obra hidráulica	Ubicación
23	CA-H4	Caída transversal al flujo	Terraza 5
24	C-H09-I	Canal pequeño transversal al flujo	Terraza 5
25	CA-H5	Caída transversal al flujo	Terraza 5
26	C-H10-I	Canal Horizontal o transversal al flujo en dirección izquierda	Terraza 5
27	C-L10	Canal que continua el canal C-L08 y canales horizontales, termina en la caída CA-L4	Terraza 5
28	CA-L4	Caída donde termina el canal C-L10 e inicia el canal C-L12	Terraza 5
29	C-L11	Canal en la izquierda de Tipón, termina en CA-L5	Terraza 5
30	CA-L5	Caída donde termina el canal C-L11 e inicia el canal C-L13	Terraza 5-4
31	C-L12	Canal que continua el canal C-L10, termina en la caída CA-L6	Terraza 4
32	CA-L6	Caída que donde termina el canal C-L12 e inicia el canal C-L14	Terraza 4-3
33	C-L13	Canal Longitudinal en la parte izquierda de Tipón, desemboca en CA-H6	Terraza 4
34	CA-H6	Caída horizontal al flujo donde desemboca el C-L13 e inicia el C-L15	Terraza 5-4
35	C-L14	Canal derecho principal continua el canal C-L12	Terraza 3
36	CA-L7	Caída que continua el canal C-L14 e inicia el canal C-L16	Terraza 3-4
37	C-L15	Canal Longitudinal en la parte izquierda de Tipón, desemboca en CA-H7	Terraza 3
38	CA-H7	Caída que continua el canal C-L15 e inicia el canal C-H11-D, Horizontal al flujo	Terraza 4-3
39	C-H11-D	Pequeño canal Horizontal en la parte izquierda de Tipón que desemboca en la caída CA-L8	Terraza 3
40	CA-L8	Caída donde acaba el canal C-H11-D e inicia el canal CH12-I	Terraza 3-2
41	C-H12-I	Canal Horizontal o transversal al flujo, conecta al canal C-L16	Terraza 2
42	C-L16	Canal que continua el canal C-L15 y la caída CA-L8	Terraza 2
43	CA-L9	Caída donde acaba el canal C-L16 e inicia el canal C-L17	Terraza 2-1
44	C-L17	Canal derecho principal continua el canal C-L16	Terraza 1
45	CA-L10	Caída donde acaba el canal C-L17 e inicia el canal C-L18	Terraza 1
46	C-L18	Canal que continua el canal C-L17 y la caída CA-L10	Entrada a Tipón

Nota: Se realizo el inventario de canales y caídas de Tipón para tener un mejor manejo de información al realizar las mediciones en campo.

3.12 Escaneo y levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR

3.12.1 Descripción de la técnica

La tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) es un método de teledetección activa que permite la obtención de información tridimensional de alta precisión del terreno y de las estructuras superficiales. Su funcionamiento se basa en la emisión de pulsos láser y en la medición

del tiempo que estos tardan en regresar al sensor tras impactar en la superficie, lo que posibilita el cálculo preciso de distancias. Como resultado, se genera una nube de puntos georreferenciada, a partir de la cual se elaboran modelos digitales del terreno y de la superficie, permitiendo una representación detallada y confiable de la geometría de las estructuras hidráulicas incas.

3.12.2 Proceso de obtención de datos y aplicación en Tipón

Para el presente estudio, el levantamiento LiDAR se ejecutó con el propósito de caracterizar las secciones hidráulicas del canal principal y de los canales secundarios de Tipón. El procedimiento incluyó las siguientes etapas:

Planificación del levantamiento: se definieron los tramos prioritarios a registrar, considerando las estructuras con mayor relevancia hidráulica y arqueológica. Asimismo, se establecieron los puntos de control topográfico mediante coordenadas UTM para garantizar la georreferenciación del levantamiento.

Captura de datos en campo: se efectuaron escaneos estacionarios desde múltiples posiciones a lo largo del canal, con el fin de cubrir todo el perfil y reducir la presencia de zonas de sombra. Los equipos LiDAR empleados registraron millones de puntos por estación, permitiendo capturar detalles de la geometría de los muros de piedra, escalones y pendientes.

Procesamiento de nubes de puntos: las distintas capturas se integraron mediante técnicas de registro y alineación, utilizando los puntos de control establecidos en campo. Posteriormente, se filtraron los datos para eliminar ruido (vegetación, objetos externos, interferencias) y se generó una nube de puntos depurada.

Construcción de modelos digitales: a partir de la nube de puntos procesada se elaboraron **Modelos Digitales de Superficie (MDS)** que representan la geometría tridimensional de los

canales. Sobre estos modelos se trazaron perfiles longitudinales y transversales, fundamentales para el análisis hidráulico.

Integración con la modelación computacional: finalmente, la geometría obtenida se exportó a formatos compatibles con el software de simulación hidráulica **FLOW-3D**, permitiendo reproducir en el entorno computacional las condiciones reales del sistema hidráulico inca.

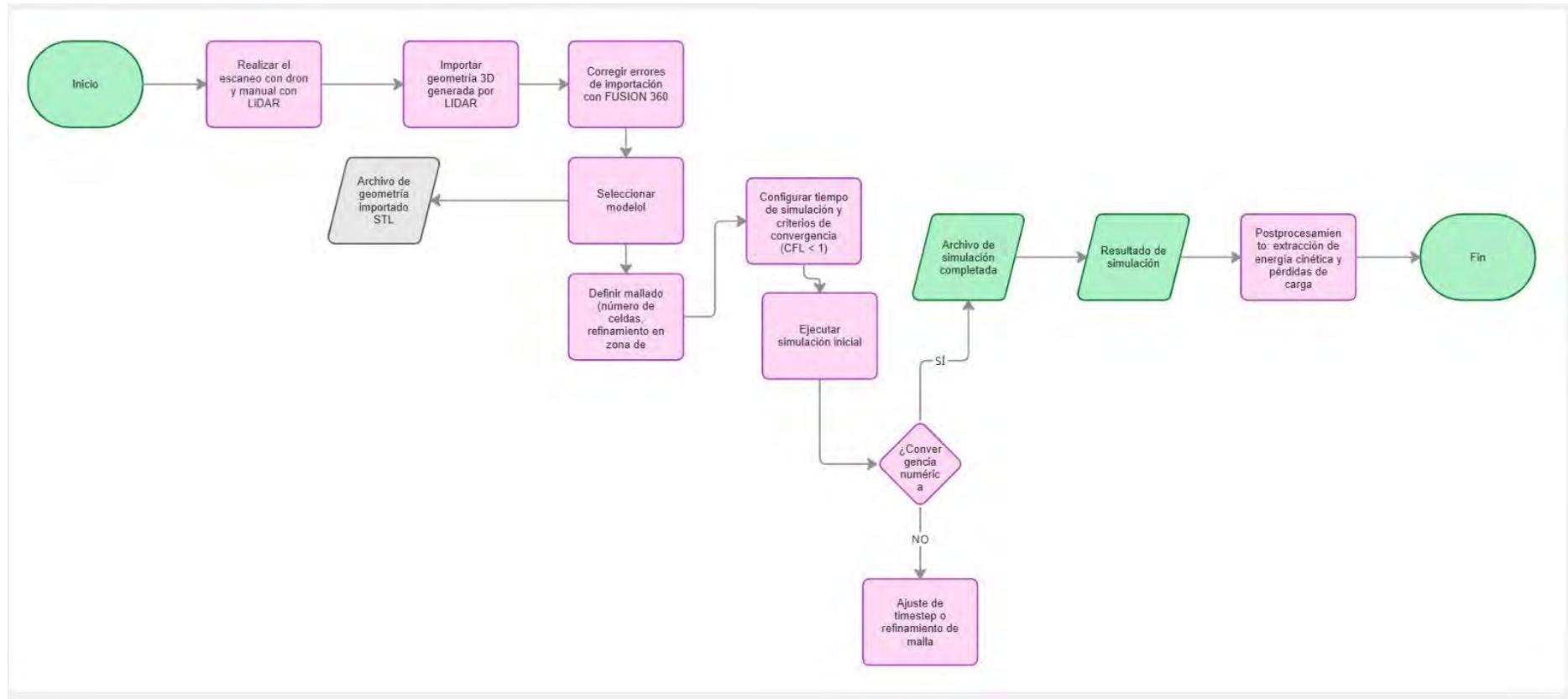
3.12.3 Alcances del levantamiento

El levantamiento LiDAR en Tipón proporcionó información precisa y confiable de las dimensiones y formas de los canales, constituyendo la base geométrica del análisis numérico y experimental. Los resultados completos del procesamiento, así como ejemplos de las nubes de puntos generadas y de los modelos tridimensionales, se presentan en el Anexos.

3.12.4 Fluograma

Figura 17

Fluograma del levantamiento topográfico con LiDAR



Nota: Elaboración propia

3.13 Análisis de flujo superficial (LSPIV)

3.13.1 Descripción de la técnica.

Para la estimación de los campos de velocidad superficial se empleó la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), un método óptico no intrusivo basado en el análisis de secuencias de video. La técnica consiste en identificar el desplazamiento de patrones visibles en imágenes consecutivas y, mediante correlación cruzada, calcular los vectores de velocidad sobre una malla espacial. Debido a su aplicación en condiciones de campo, el procedimiento incluyó la rectificación geométrica de las imágenes, la calibración métrica y el control de efectos asociados a la iluminación y reflejos. La LSPIV fue seleccionada por su capacidad para obtener información continua del flujo sin contacto directo, resultando adecuado para el estudio de canales históricos y estructuras hidráulicas incas.

3.13.2 Proceso de obtención de datos y aplicación en Tipón

Para el caso de Tipón, el protocolo LSPIV se diseñó para un régimen preferentemente subcrítico en tramos representativos del canal principal y de un canal secundario. El procedimiento metodológico se detalla a continuación:

Planificación y selección de tramos

- Delimitación de segmentos con accesibilidad visual, baja interferencia de vegetación y geometría adecuada (rectas o curvaturas suaves).
- Definición de longitudes de análisis y puntos fijos visibles desde los que asegurar la georreferenciación (coincidentes con el plano CAD y puntos de control del levantamiento LiDAR).

Condiciones de trazadores (seeding)

- Priorización de trazadores naturales presentes (espuma fina, texturas de lámina o microondas superficiales).
- Solo si fuese necesario, uso de trazadores biodegradables y neutros (sin impacto arqueológico/ambiental), coordinado con la administración del sitio.

Configuración de adquisición de video

- Ubicación de cámaras fijas en trípodes con campo visual que cubra el tramo de interés, evitando vibraciones.
- Definición de velocidad de cuadro y resolución suficientes para capturar la cinemática del flujo (criterio: desplazamiento de patrón menor a $\sim\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ del tamaño de la ventana de interrogación entre cuadros).
- Registro de metadatos (hora, temperatura ambiente, condiciones de cielo, observaciones de brillo/oleaje).

Calibración geométrica y escala

- Colocación/identificación de marcas de escala y puntos homólogos visibles en el video, previamente medidos en campo o extraídos del modelo LiDAR/Plano CAD.
- Cálculo de la homografía para rectificar la imagen al plano del agua, eliminando la perspectiva y estableciendo la relación píxel–metro.

Adquisición y preprocesamiento

- Filmación continua en condiciones quasi-estacionarias del flujo.
- Estabilización digital (corrección de micro-movimientos), recorte de la ROI (región de interés) y mejora de contraste.
- Enmascaramiento de reflejos especulares, bordes de canal y occlusiones.

Cálculo LSPIV (correlación y estimación vectorial)

- División de la ROI en ventanas de interrogación con estrategia multipaso (ventanas grandes → refinamiento a ventanas pequeñas con solape).
- Cálculo de correlación cruzada entre fotogramas consecutivos y localización subpíxel del pico de correlación.
- Conversión de desplazamientos (píxeles/cuadro) a velocidades (m/s) con la escala y la frecuencia de cuadro.

Post - procesamiento y control de calidad

- Filtrado de vectores espurios (criterios de SNR, coherencia espacial, mediana vecinal).
- Suavizado moderado respetando gradientes hidráulicos; eliminación de artefactos en zonas de estela o brillo.
- Proyección de los vectores al eje hidráulico local (componente tangencial a la talweg).
- Conversión de velocidades superficiales a caudales
- Obtención de velocidad superficial representativa por sección (promedio espacial/temporal controlado).
- Aplicación de un coeficiente de traslación para estimar la velocidad media en la vertical (determinado experimentalmente para el tramo; el procedimiento y valor se documentan en Anexos).
- Cálculo de caudal mediante integración con el área mojada de la sección (derivada de perfiles LiDAR) y contraste con el método de vertedero (véase Sección 4.15).

Integración con la modelación computacional

- Comparación de los campos de velocidad superficial LSPIV con los campos de superficie de FLOW-3D (re-muestreo espacial y temporal).
- Ajuste de parámetros de borde en el modelo numérico cuando corresponda, dentro del marco de validación planteado en el Cap. 5.

3.13.3 Control de calidad, validación y alcances

Calidad de datos: se implementaron listas de verificación para iluminación, estabilidad de cámara, porcentaje de solape entre ventanas y métricas de correlación (SNR). Los vectores que incumplieron umbrales de calidad fueron descartados o reestimados.

Validación: la consistencia de velocidades y caudales se verificó mediante mediciones por vertedero y con los resultados del modelo CFD (criterios de error relativos y bandas de aceptación definidos a priori).

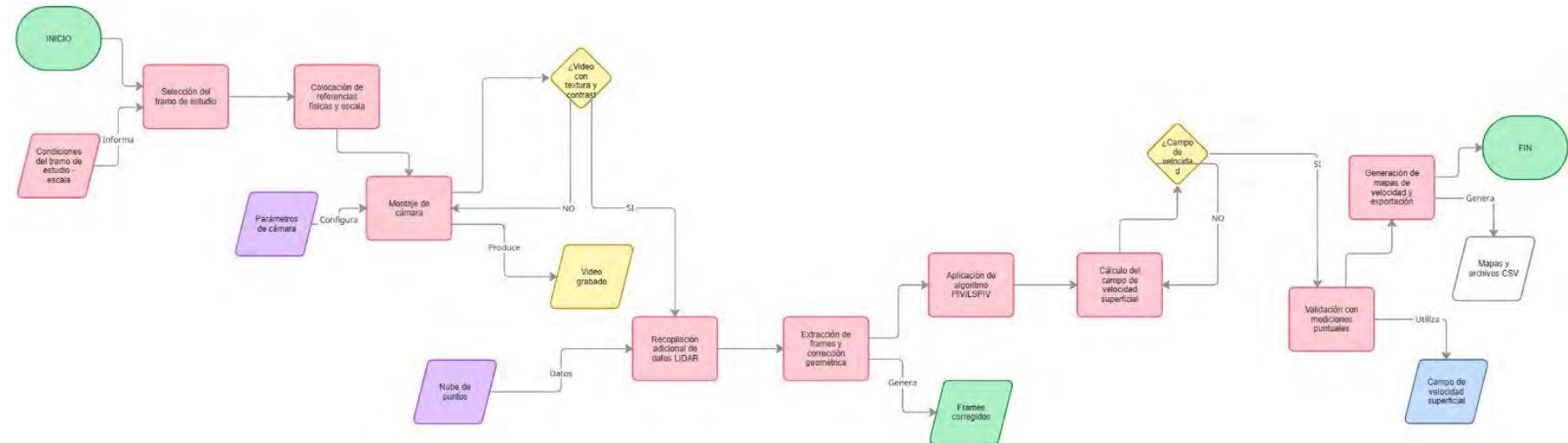
Alcances y limitaciones: la LSPIV es sensible a reflejos, sombras, viento y vegetación flotante; su precisión depende de la escala métrica y de la textura superficial disponible. En Tipón, su carácter no intrusivo y la posibilidad de cobertura real la convierten en una herramienta idónea para un entorno arqueológico.

Trazabilidad: los parámetros de adquisición, archivos de rectificación, máscaras, ventanas de interrogación, umbrales de calidad y factores de conversión se documentan íntegramente en el Anexo 2, junto con ejemplos de campos vectoriales depurados y tablas de control.

3.13.4 Fluograma

Figura 18

Fluograma del LSPIV



Nota: Elaboración propia

3.14 Determinación de caudales utilizando el método de vertederos.

3.14.1 Descripción de la técnica

El método de vertedero es una técnica hidráulica tradicional empleada para calcular caudales a partir de la relación entre la altura de lámina de agua sobre la cresta y el flujo descargado. Se fundamenta en ecuaciones empíricas que dependen de la geometría del vertedero (rectangular, triangular, trapezoidal, entre otros) y de la condición de flujo (libre o sumergido). En este estudio, se aprovechó la existencia de vertederos pétreos en Tipón, construidos como parte de las estructuras hidráulicas incas, para estimar de manera directa y validada el caudal circulante en determinados tramos de canal.

3.14.2 Proceso de aplicación en Tipón

El procedimiento seguido para la determinación de caudales en campo fue el siguiente:

Identificación de estructuras adecuadas:

- Se seleccionaron vertederos labrados en piedra, en buen estado de conservación y con condiciones de flujo libre (sin sumersión en la descarga).
- Se verificó la estabilidad del régimen durante la medición, a fin de evitar fluctuaciones de caudal.

Medición de parámetros hidráulicos

- Se utilizó una regla milimétrica instalada temporalmente para medir la altura de lámina (h) sobre la cresta del vertedero.
- Se registraron múltiples lecturas en intervalos de tiempo cortos, promediando los valores para reducir el error instrumental.

Correcciones y validación

- Se aplicaron correcciones por contracción lateral cuando correspondía, considerando la geometría de la sección aguas arriba.
- Los caudales obtenidos se compararon con los estimados mediante LSPIV y los simulados en FLOW-3D, lo que permitió establecer márgenes de coherencia entre métodos.

3.14.3 Alcances de la aplicación en Tipón

El método de vertedero permitió disponer de una medición experimental directa de caudales en un entorno patrimonial, con la ventaja de requerir instrumentación sencilla y de no alterar las estructuras incas. Si bien presenta limitaciones relacionadas con la calibración del coeficiente de descarga y con las condiciones de flujo estable, su inclusión en el presente estudio aportó una referencia empírica indispensable para validar tanto los cálculos experimentales por LSPIV como los resultados obtenidos en las simulaciones CFD. El detalle de las mediciones realizadas en campo, tablas de datos y cálculos específicos se encuentra documentado en Anexos.

3.15 Simulación hidráulica mediante dinámica de fluidos computacional (FLOW-3D)

3.15.1 Descripción de la técnica

El software FLOW-3D es una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) diseñada para resolver problemas de flujo libre de superficie, turbulencia y transporte de masa, mediante la aplicación de las ecuaciones de NAVIER–STOKES en su forma promediada de Reynolds (RANS). Su fortaleza radica en el uso del método Volume of Fluid (VOF) para el seguimiento de la superficie libre del agua, así como en la implementación de modelos especializados para simular estructuras hidráulicas, vertederos, canales y fenómenos de disipación de energía.

En esta investigación se utilizó FLOW-3D como técnica principal de simulación hidráulica para reproducir digitalmente el comportamiento de los canales y estructuras incas de Tipón, evaluando variables como tirantes, velocidades, distribución de presiones, líneas de energía y disipación de caudal en cada tramo del sistema.

3.15.2 Proceso de construcción del modelo y aplicación en Tipón

El procedimiento seguido para la simulación hidráulica de los canales incas de Tipón fue el siguiente:

Definición del dominio de estudio

- Se seleccionaron tramos representativos del canal principal y un canal secundario, considerando la geometría obtenida del levantamiento LiDAR y la información planimétrica procesada en AutoCAD.
- Se delimitó un dominio tridimensional que incluyó la sección de entrada, el canal propiamente dicho y la salida, garantizando la estabilidad numérica del flujo.

Generación de geometría computacional

- La nube de puntos LiDAR fue procesada para generar una superficie cerrada y limpia, libre de ruidos.
- Esta geometría fue importada al entorno de FLOW-3D y adaptada al mallado computacional mediante técnicas de simplificación controlada, asegurando la conservación de la forma original de los canales incas.

Definición de condiciones de frontera

- Condición de entrada: se especificaron los caudales obtenidos mediante mediciones experimentales (LSPIV y método de vertedero).

- Condición de salida: se estableció una cota de lámina libre, permitiendo la descarga natural del flujo.
- Condiciones de contorno: se asignaron paredes rígidas e impermeables en los límites del canal, representando la estructura pétrea.

Malla computacional

- Se utilizó un esquema de malla cartesiana adaptada al dominio (grids estructurados), con refinamientos locales en zonas críticas como caídas, bifurcaciones y transiciones.
- Se efectuó un análisis de independencia de malla para garantizar que los resultados no dependan excesivamente de la discretización.

Selección de modelo de turbulencia y parámetros físicos

- Se aplicó el modelo **k-w renormalizado (RNG)**, adecuado para flujos con recirculaciones y condiciones subcríticas.
- Se asumió agua como fluido incompresible, homogéneo y con propiedades físicas determinadas en campo (densidad y viscosidad dinámicas).
- La temperatura del agua se mantuvo constante según mediciones de campo.

Simulación y convergencia

- Se realizaron corridas transitorias hasta alcanzar condiciones quasi-estacionarias.
- Se monitorearon variables de control (caudal en entrada/salida, energía específica, estabilidad del paso de tiempo) para verificar la convergencia numérica.

Procesamiento de resultados

- Se generaron campos tridimensionales de velocidad, distribución de presiones, perfiles de tirante y líneas de corriente. Estos resultados se utilizaron

posteriormente para comparar con los valores medidos en campo y validar el comportamiento hidráulico de las estructuras.

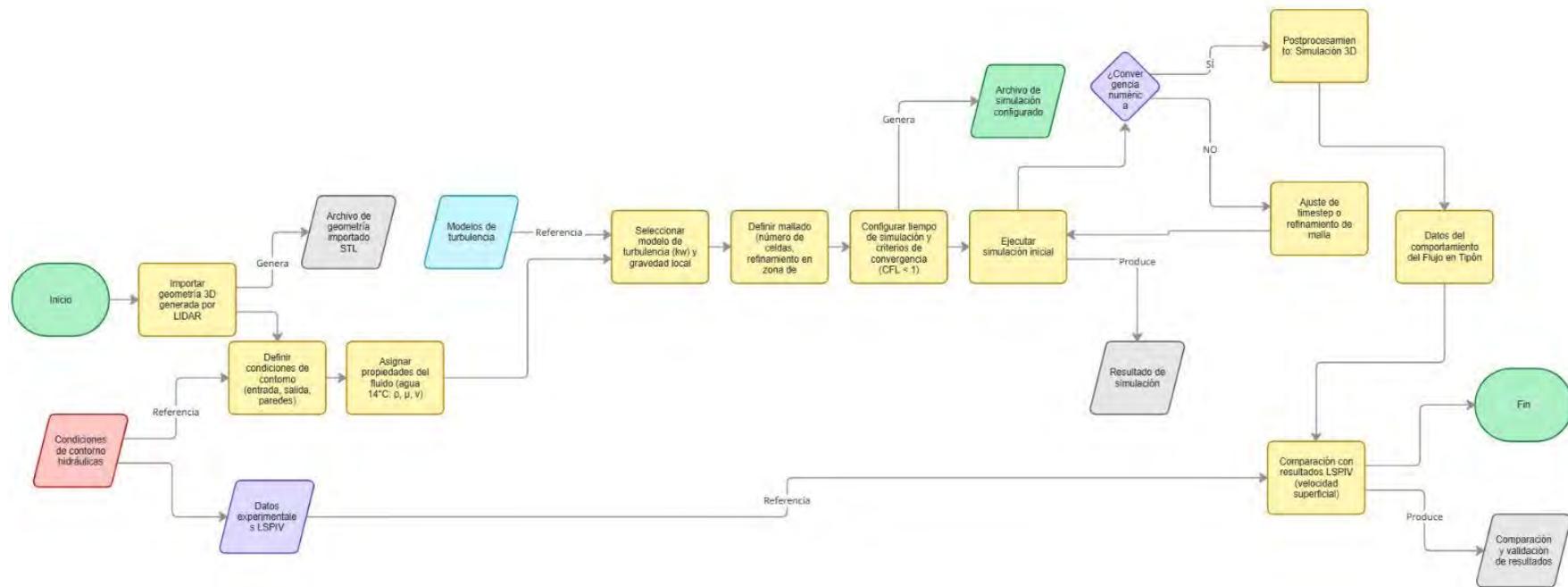
3.15.3 Alcances de la simulación hidráulica

La simulación hidráulica realizada en FLOW-3D permitió reproducir digitalmente el comportamiento de los canales incas de Tipón con un alto grado de detalle, posibilitando el análisis de variables hidráulicas clave como caudales, velocidades, presiones, tirantes. El modelo alcanzó a representar tramos seleccionados del canal principal, el acueducto inicial y la caída de agua en la terraza n.º 2, lo que permitió caracterizar procesos locales de transporte de flujo, disipación de energía y estabilidad estructural. Asimismo, la herramienta CFD brindó la posibilidad de visualizar escenarios tridimensionales que serían imposibles de medir directamente en campo, aportando una visión integral del sistema hidráulico.

La simulación se limitó a sectores representativos del complejo debido a restricciones de tiempo y recursos, sin considerar variaciones estacionales de caudal ni procesos de infiltración, enfocándose únicamente en el flujo superficial; no obstante, los resultados obtenidos son confiables y abren la posibilidad de futuras investigaciones con un dominio y escenarios hidrológicos más amplios.

3.15.4 Flujoograma

Figura 19 Flujoograma del FLOW-3D

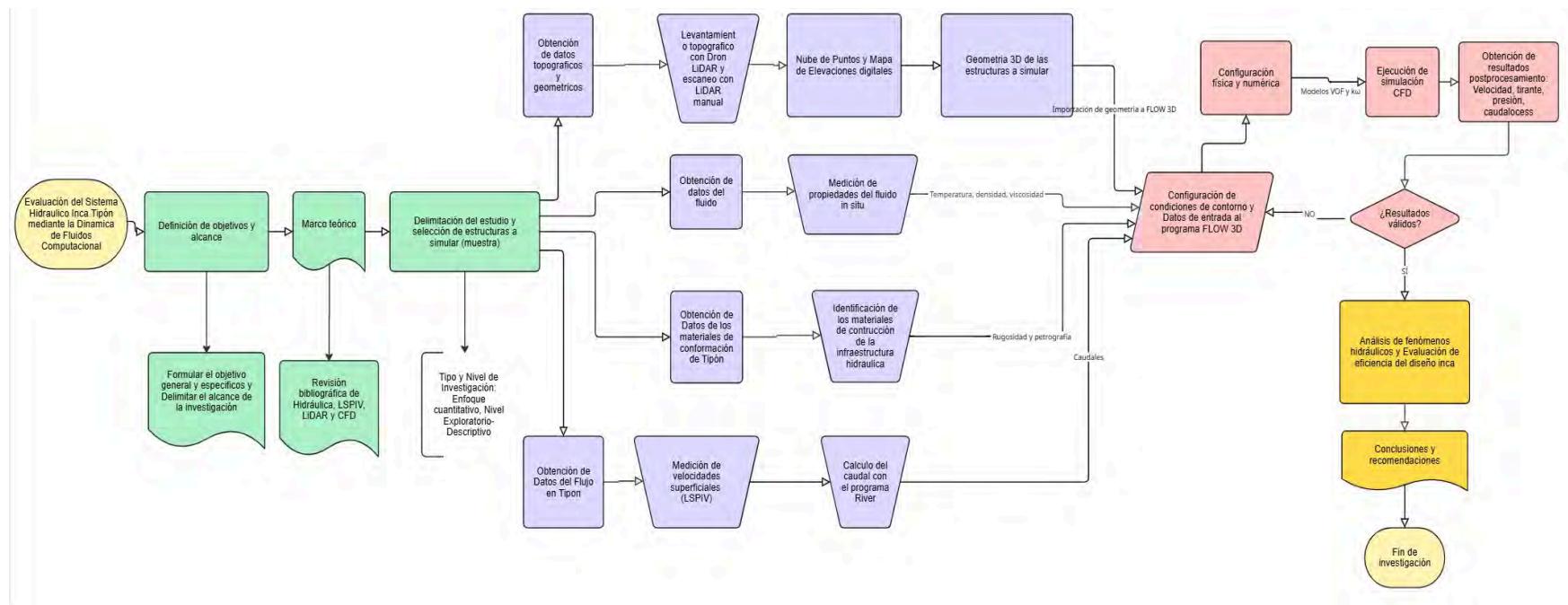


Nota: Elaboración propia

3.16 Flujograma de la investigación:

Figura 20

Flujograma de la investigación



Nota: Se puede apreciar los canales, códigos de canales y caídas, así como el número de terrazas, y esto se ve con mejor resolución y detalle en anexos

CAPITULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación orientada a la evaluación del sistema hidráulico inca del Parque Arqueológico de Tipón. Los resultados se exponen de manera objetiva y ordenada en función de los objetivos específicos planteados, sin incorporar interpretaciones, las cuales se desarrollan en el capítulo de discusión.

En primer lugar, se muestran los resultados relacionados con la determinación de la topografía y de la geometría hidráulica del sistema, obtenidos a partir del levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR, lo que permitió caracterizar con precisión el terreno y las obras hidráulicas del sitio.

Seguidamente, se presentan los resultados correspondientes a la caracterización del flujo en los diferentes canales del complejo arqueológico, a partir de la aplicación de la metodología LSPIV, lo que permitió estimar campos de velocidad superficial y caudales.

Asimismo, se incluyen los resultados de las mediciones directas realizadas en campo, las cuales permitieron complementar y validar la información geométrica de los canales, así como obtener datos de caudal y temperatura del agua, necesarios para la descripción de las propiedades del fluido.

Finalmente, se presentan los resultados del modelamiento hidráulico mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), aplicado a estructuras hidráulicas representativas del sistema de Tipón, permitiendo obtener la distribución espacial de velocidades, presiones y patrones de flujo que describen el comportamiento hidráulico del sistema.

4.1 Resultados respecto a los objetivos específicos

4.1.1 Caracterización topográfica mediante levantamiento LiDAR

Se realizó un levantamiento topográfico integral empleando tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging), el cual abarcó tanto el entorno natural circundante del Parque Arqueológico de Tipón como la zona turística donde se emplazan las principales estructuras hidráulicas monumentales. Este levantamiento permitió la generación de un modelo digital tridimensional del terreno con alta precisión espacial, alcanzando una exactitud del orden de ± 2 cm. La información obtenida facilitó un análisis detallado de la morfología del terreno y de la geometría hidráulica de las estructuras, aspectos fundamentales para comprender el funcionamiento, comportamiento hidráulico y eficiencia del sistema hidráulico ancestral inca.

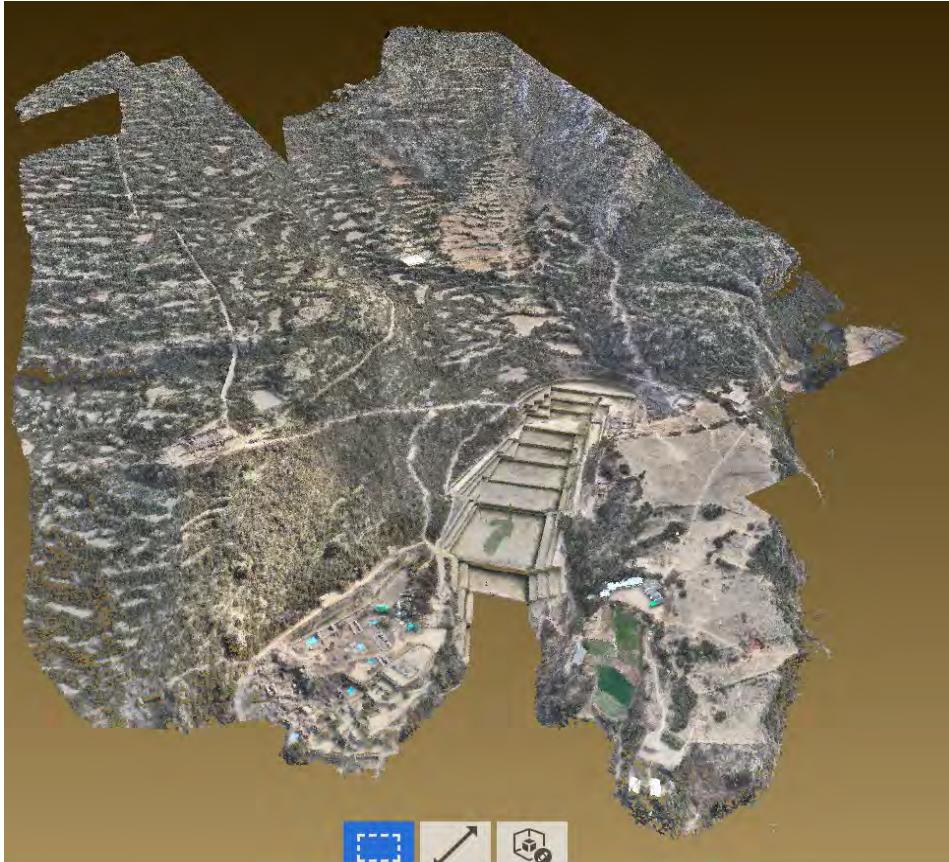
4.1.1.1 Levantamiento LiDAR de todo el complejo arqueológico de Tipón

El levantamiento topográfico se efectuó mediante un dron DJI Matrice 350 RTK, equipado con un sensor LiDAR Zenmuse L2, cubriendo un área aproximada de 240 hectáreas, correspondiente a la totalidad del complejo arqueológico de Tipón. El plan de vuelo se diseñó y ejecutó a una altura promedio de 150 m sobre el nivel del terreno, con un solapamiento frontal del 70 % y lateral del 60 %, siguiendo un patrón de líneas paralelas que garantizó una cobertura continua y homogénea de los andenes agrícolas, canales y demás estructuras hidráulicas.

La nube de puntos generada alcanzó una densidad promedio de 150 puntos por metro cuadrado (pts/m^2), con una precisión vertical de ± 3 cm y una precisión horizontal de ± 4 cm, lo que permitió identificar con alto nivel de detalle la geometría de las estructuras hidráulicas y agrícolas presentes en el sitio. La georreferenciación de la información se realizó en el sistema de coordenadas WGS84, UTM zona 19S, apoyada mediante puntos de control en tierra (GCPs) levantados con GPS diferencial, obteniéndose un error cuadrático medio (RMSE) del orden de ± 4 cm, lo que garantiza la confiabilidad geométrica de los datos para su posterior análisis y modelación hidráulica.

Figura 21

Nube de puntos del complejo arqueológico de Tipón



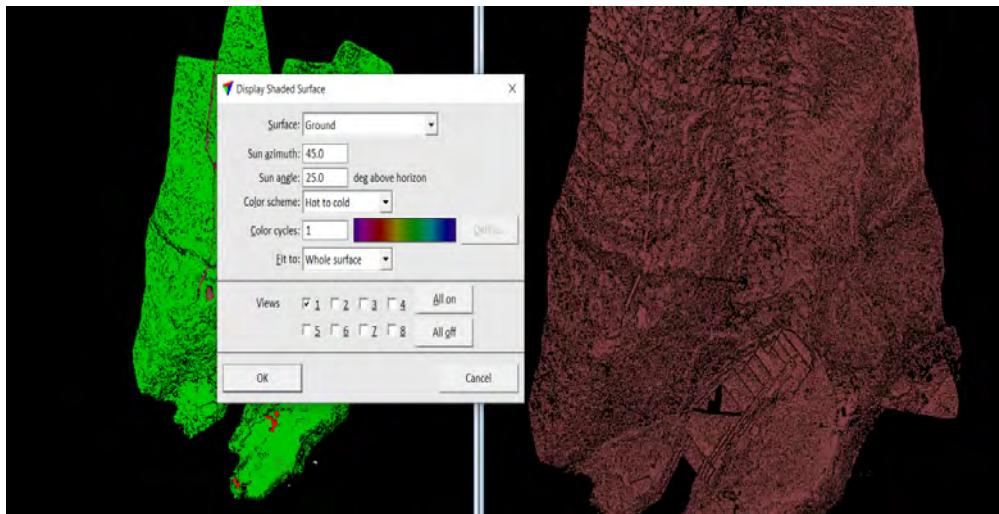
Nota: Elaboración propia, visualizado en Autodesk ReCap con 100 217 436 de puntos.

4.1.1.1 Clasificación de nube de puntos mediante Terrasolid - Spatix

Para generar un modelo digital de elevación (DEM) preciso, se realizó la clasificación de la nube de puntos con los softwares Terrasolid y Spatix, descartando aquellos puntos que no corresponden a la superficie del terreno, tales como vegetación, estructuras temporales y demás objetos externos al suelo. Esto permitió aislar únicamente los puntos correspondientes al terreno natural del complejo arqueológico.

Figura 22

Nube de puntos clasificado y nube de puntos del terreno de Tipón.



Nota: Elaboración propia, en la parte izquierda se ve la nube de puntos clasificado y en la parte derecha los puntos del terreno propio de Tipón.

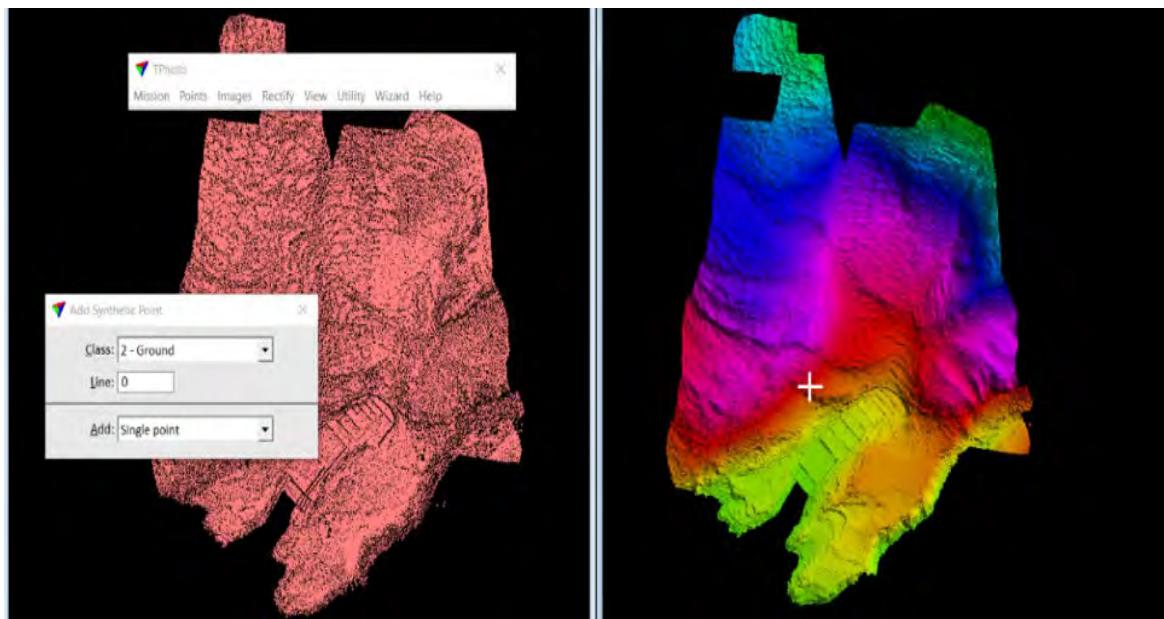
4.1.1.2 *Modelo de elevación digital y curvas de nivel a 1 metro*

Con la nube de puntos clasificada se generó el modelo digital de elevación (DEM) y se trazaron las curvas de nivel con un intervalo de 1 metro. Los resultados muestran una topografía sinuosa con pendientes pronunciadas, característica que fue aprovechada por la ingeniería hidráulica inca para optimizar el flujo del agua mediante el aprovechamiento de la gravedad. El área montañosa abarca aproximadamente 240 hectáreas, con pendientes que superan los 30°, en donde las terrazas construidas por los incas permiten una distribución eficiente del agua y control del escurrimiento.

A continuación, se presentan el modelo digital de elevación y las curvas de nivel obtenidas del levantamiento.

Figura 23

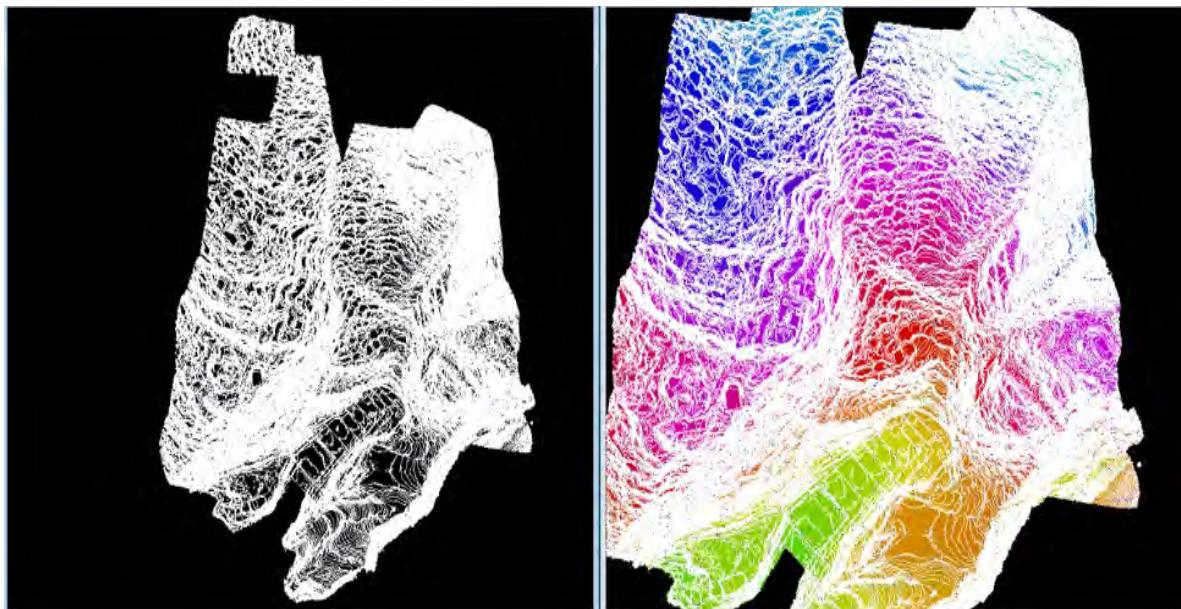
Superficie del terreno propia y modelo de elevación digital (DEM) de Tipón



Nota: Elaboración propia

Figura 24

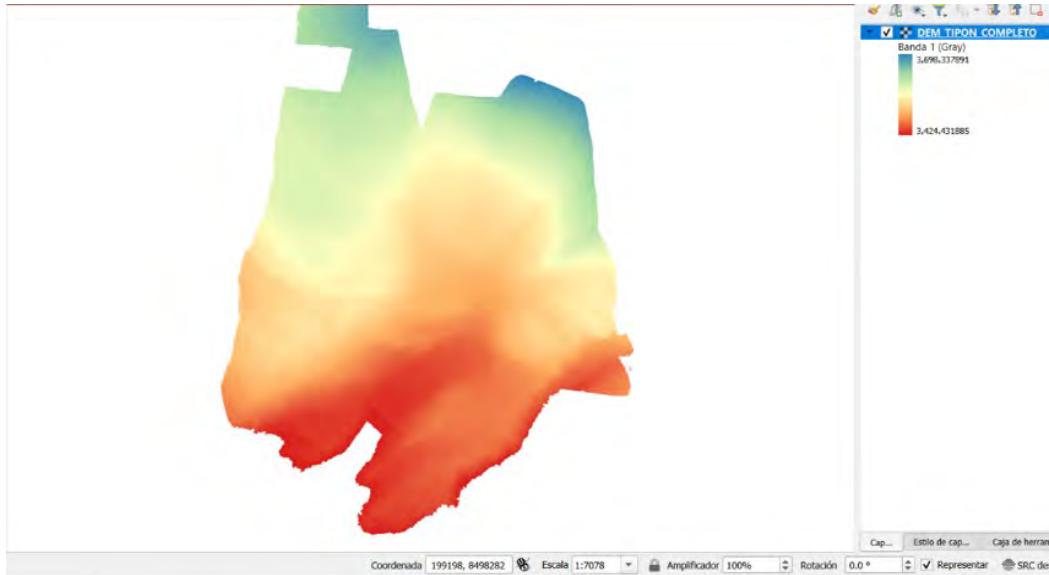
Curvas de Nivel a 1 metro de Tipón



Nota: Elaboración propia

Figura 25

Modelo de elevación digital (DEM) capa ráster en formato TIF



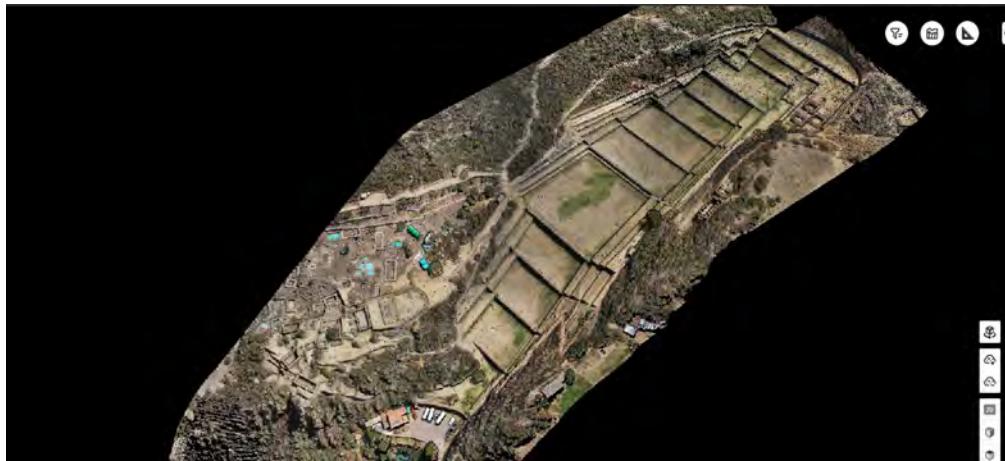
Nota: Elaboración propia

4.1.1.2 Levantamiento LiDAR de la zona turística del complejo arqueológico de Tipón

Se realizó un segundo levantamiento más detallado de Tipón utilizando un dron LiDAR, mediante el cual se obtuvo una nube de puntos georreferenciada de alta resolución correspondiente a la zona turística del complejo arqueológico. Esta nube de puntos permite una visualización precisa de los andenes, canales, área delimitada, perímetro y altitud específicos de dicha zona.

Figura 26

Nube de puntos de la zona turística del complejo arqueológico de Tipón



Nota: Elaboración propia

4.1.1.2.1 Clasificación De nube de puntos con Terrasolid - Spatix

Para la generación del modelo digital de elevación (DEM), se realizó una clasificación precisa de la nube de puntos, eliminando elementos no pertenecientes al terreno, tales como vegetación y estructuras temporales, con el apoyo de las herramientas Terrasolid y Spatix.

Figura 27

Nube de puntos clasificado y nube de puntos del terreno de Tipón



Nota: Elaboración propia

4.1.1.2.2 *Modelo de elevación digital y curvas de nivel a 1 metro*

A partir de la nube de puntos clasificada, se procedió a la generación del modelo digital de elevación (DEM) y al trazado de las curvas de nivel con un intervalo de 1 metro, utilizando herramientas especializadas en procesamiento geoespacial. El análisis topográfico derivado del DEM revela una configuración del terreno caracterizada por una topografía sinuosa, con pendientes marcadamente pronunciadas que superan los 30°, lo cual evidencia la complejidad geomorfológica de la zona turística del complejo arqueológico de Tipón.

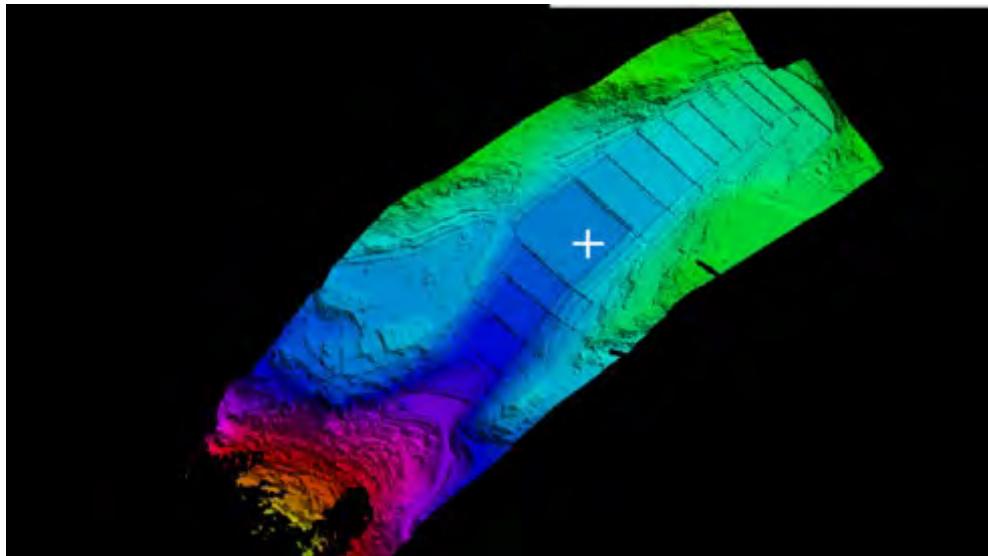
Esta área abarca aproximadamente 6 hectáreas y comprende un sistema de trece terrazas construidas por la ingeniería hidráulica inca, diseñadas estratégicamente para maximizar la eficiencia en la distribución y manejo del recurso hídrico. Dichas terrazas permiten no solo la retención y conducción controlada del agua, sino también la mitigación del riesgo de erosión y la regulación del flujo mediante la optimización del aprovechamiento de la energía potencial generada por la gravedad.

Además, el sistema hidráulico de Tipón incluye estructuras como saltos hidráulicos, que constituyen transiciones abruptas entre flujos supercríticos y subcríticos, generando turbulencia y disipación de energía. Estos elementos son fundamentales para el control efectivo del flujo y la prevención de la erosión en los canales, demostrando la avanzada ingeniería hidráulica inca para el manejo sostenible del agua.

A continuación, se presentan el modelo digital de elevación y las curvas de nivel obtenidas del levantamiento.

Figura 28

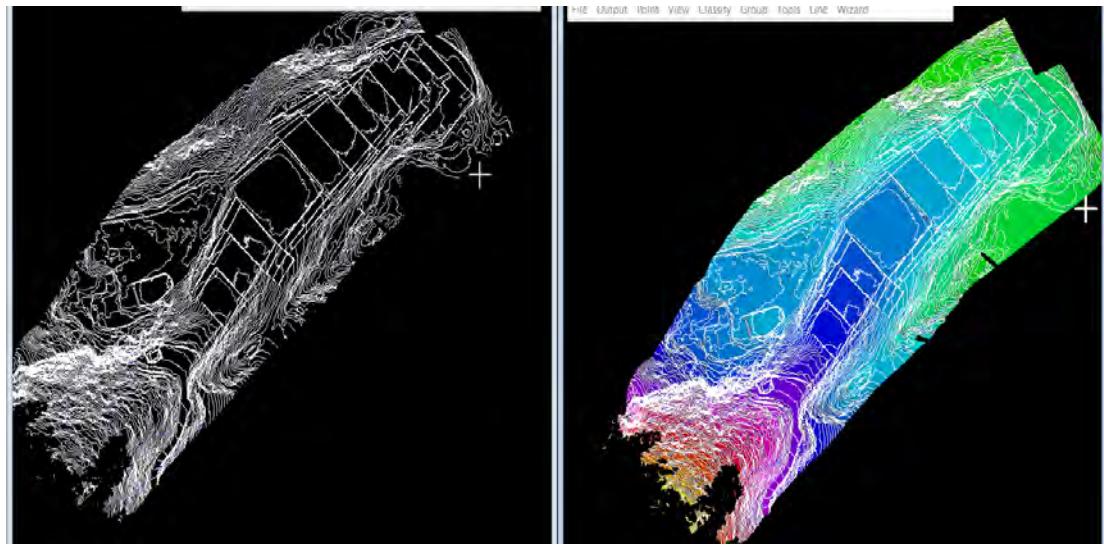
Modelo de elevación digital (DEM) de Tipón zona turística.



Nota: Elaboración propia

Figura 29

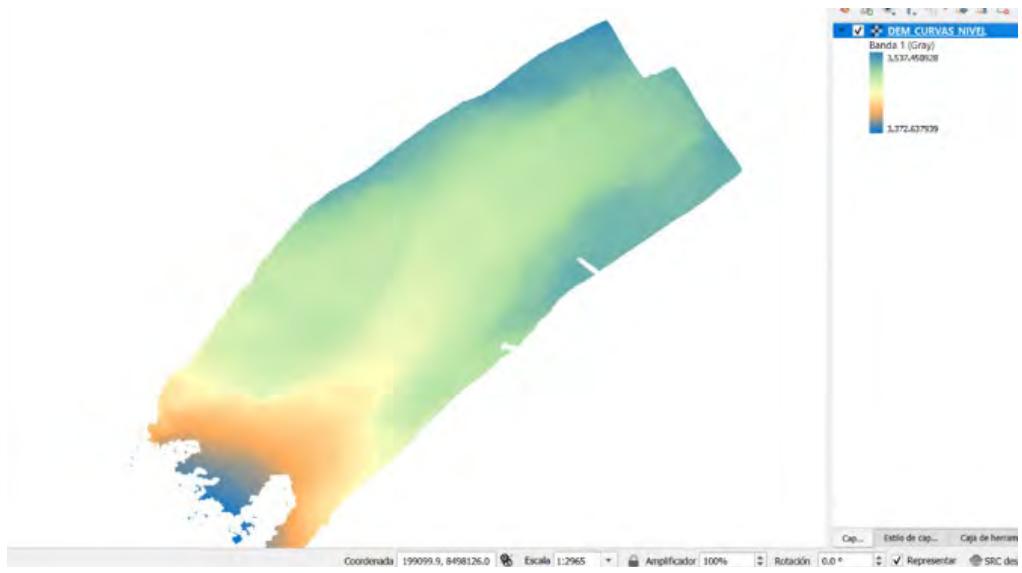
Curvas de Nivel a 1 metro de Tipón zona turística.



Nota: Elaboración propia

Figura 30

Modelo de elevación digital (DEM) capa ráster en formato TIF



Nota: Elaboración propia

En resumen, la topografía del Parque Arqueológico de Tipón se caracteriza por un relieve montañoso y accidentado, propio de la Cordillera Oriental de los Andes, con altitudes que oscilan entre 3 200 y 3 850 m.s.n.m. y pendientes pronunciadas que superan en algunos sectores el 45 %. El sitio se ubica sobre las laderas del cerro Cruzmoqo, donde el terreno irregular fue modelado mediante terrazas agrícolas y plataformas escalonadas que se adaptan al contorno natural del valle. Esta configuración topográfica permitió aprovechar de manera eficiente la gravedad para el diseño del sistema hidráulico inca, conformado por canales, fuentes y drenajes que conducen el agua con precisión desde los manantiales superiores hacia las zonas agrícolas inferiores. En conjunto, la topografía de Tipón evidencia una estrecha relación entre el paisaje natural y la ingeniería hidráulica inca, reflejando un avanzado conocimiento del manejo del relieve y del aprovechamiento del recurso hídrico.

4.1.2 Identificación de los materiales de construcción del sistema hidráulico de Tipón

4.1.2.1 Petrografía y características de los materiales de conformación en Tipón

A partir de la revisión de diversos estudios geológicos y arqueológicos, se determinó que los materiales utilizados en la construcción del sistema hidráulico de Tipón correspondían principalmente a **rocas andesíticas y dacíticas de origen volcánico**, complementadas por rocas sedimentarias en menor proporción. Dichas litologías procedían de afloramientos locales pertenecientes a la unidad volcánica andesítica-dacítica del Mioceno, identificada en los registros del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico del Perú (INGEMMET, 2013). Según lo reportado por Valencia Espinoza (2010) y el Instituto Nacional de Cultura del Cusco (2002), los constructores incas emplearon bloques pétreos de diferentes tamaños según la función estructural: los muros de contención y terrazas se conformaron con piedras de mayor volumen, mientras que los canales y conductos hidráulicos se edificaron con piezas medianas y pequeñas, finamente labradas y ensambladas con alta precisión. Esta metodología constructiva, observada también por Protzen (1993) en otros centros incaicos, permitió alcanzar una resistencia mecánica elevada, así como una durabilidad notable frente a procesos erosivos y sísmicos, garantizando la estabilidad y funcionalidad del sistema a lo largo del tiempo. Esta selección y tratamiento de los materiales confiere a las estructuras un comportamiento mecánico notablemente resistente, además de una elevada durabilidad frente a procesos erosivos, asegurando la estabilidad y funcionalidad del sistema hidráulico a lo largo del tiempo.

4.1.2.2 Rulosidad

Con el propósito de determinar un valor representativo, se efectuó una calibración de rugosidad a partir de simulaciones numéricas y contrastes con observaciones de campo,

obteniéndose una **rugosidad equivalente $ks = 0.0058 \text{ m}$** , correspondiente a un coeficiente de

$$\text{Manning } n = 0.0165 \text{ } s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$$

Para el cálculo de K_s se utilizó el levantamiento LiDAR manual, mediante el cual se determinaron las cotas de altura en cada punto del eje medio del canal. Posteriormente, se calculó el promedio de las irregularidades entre dichas cotas, obteniéndose un valor de $K_s = 0.0058 \text{ m}$

Para el desarrollo de la tesis fue necesario establecer una relación cuantitativa entre la rugosidad equivalente de Nikuradse (ks) y el coeficiente de Manning (n), con el fin de integrar los parámetros empleados en los modelos numéricos y en las formulaciones empíricas de flujo en canales abiertos. Esta relación se obtuvo a partir de estudios experimentales previos sobre la resistencia hidráulica en conductos rugosos, los cuales demostraron que la rugosidad superficial influye directamente en la disipación de energía y, por tanto, en el valor del coeficiente de fricción.

En función de estos antecedentes, se adoptó la relación empírica propuesta por Strickler (1923) y posteriormente ajustada por Yen (1991), que vincula ambos parámetros mediante la siguiente expresión:

$$n = \frac{(Ks)^{1/6}}{26} \quad (108)$$

Esta ecuación surge de igualar la ecuación de Manning y la ecuación de Darcy-Weisbach

Ecuación de Manning:

$$V = \left(\frac{1}{n}\right) * R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

Ecuación de Darcy-Weisbach:

$$V = \sqrt{\frac{8gRS}{f}} \quad (10)$$

Igualando las dos ecuaciones:

$$\left(\frac{1}{n}\right) \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\frac{8gRS}{f}} \quad (11)$$

Despejando n:

$$n = \left(\frac{1}{\sqrt{8g}}\right) * f^{\frac{1}{2}} * R^{\frac{1}{6}} \quad (12)$$

Reemplazando f

$$n = \left(\frac{R^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{8g}}\right) \cdot \left[2 \cdot \log_{10} \left(12.2 \frac{R}{k_s}\right)\right]^{-1} \quad (66)$$

Resolviendo la ecuación:

$$n = \frac{(Ks)^{\frac{1}{6}}}{26} \quad (67)$$

4.1.3 Caracterización geométrica de los canales y estructuras hidráulicas

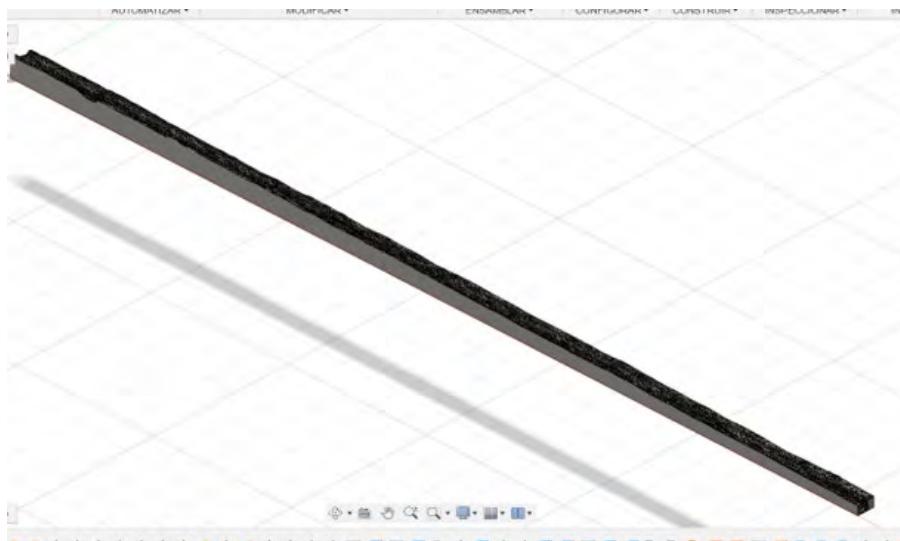
Con el fin de capturar con mayor detalle la geometría de los canales, caídas hidráulicas y fuentes ceremoniales, se realizó un escaneo de alta resolución utilizando el sensor LiDAR integrado en el iPhone 15 Pro-Max. Previa coordinación con el Ministerio de Cultura, se efectuó el secado temporal de sectores específicos del Parque Arqueológico de Tipón, lo que permitió registrar con mayor precisión las superficies internas de las estructuras hidráulicas. El escaneo se aplicó en el canal principal, la caída de la terraza 2, el Templo del Agua y el acueducto de Tipón.

El sistema LiDAR del iPhone 15 Pro-Max, basado en tecnología Time of Flight (ToF), opera a distancias cortas con un alcance de hasta 5 m y una precisión aproximada de ± 1 a ± 2 cm, siendo adecuado para levantamientos de detalle; los datos obtenidos permitieron generar mallas de superficie, posteriormente convertidas en mallas sólidas en Autodesk Fusion 360 e importadas a FLOW-3D para la simulación hidráulica, quedando las secciones medidas registradas en las fichas de recolección de datos.

4.1.3.1 Escaneo con LiDAR de mano canal principal de Tipón

Figura 31

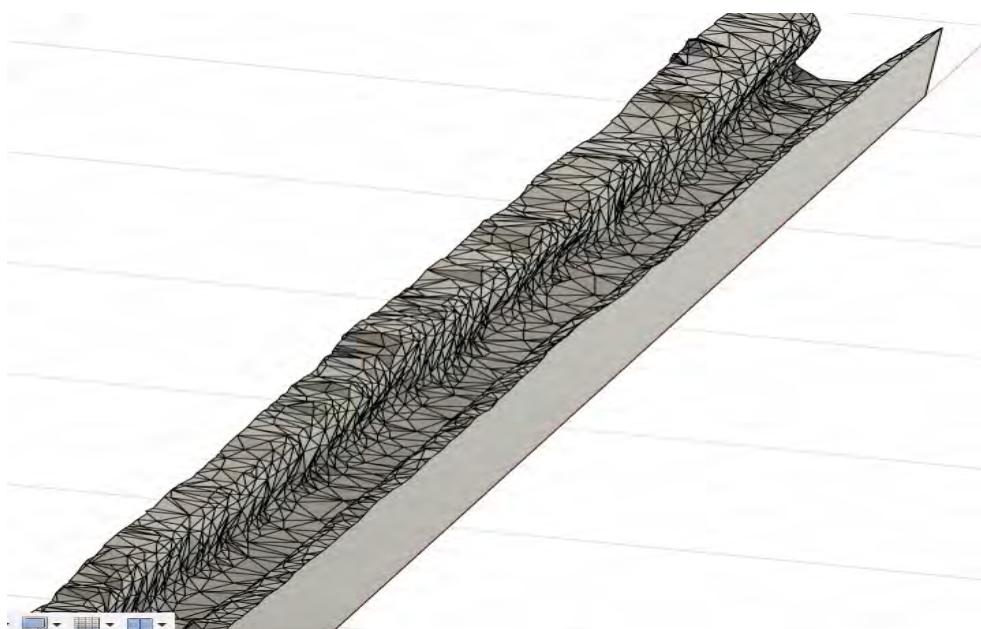
Escaneo con LiDAR de mano canal principal de Tipón



Nota: Elaboración propia

Figura 32

Detalle del canal de Tipon escaneado con LiDAR manual.

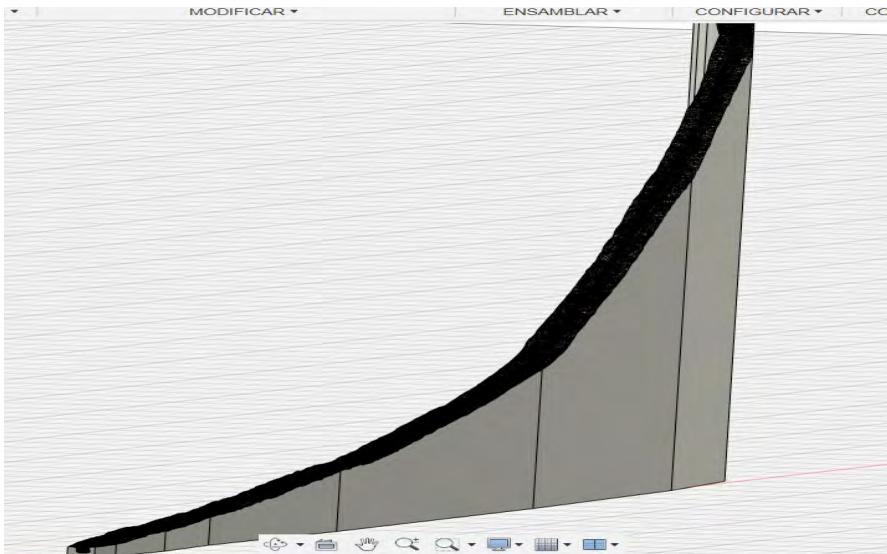


Nota: Elaboración propia

4.1.3.2 Escaneo con LiDAR de mano acueducto principal de Tipón

Figura 33

Escaneo con LiDAR de mano acueducto principal de Tipón



Nota: Elaboración propia

Figura 34

Detalles del acueducto principal de Tipón escaneado con LiDAR.

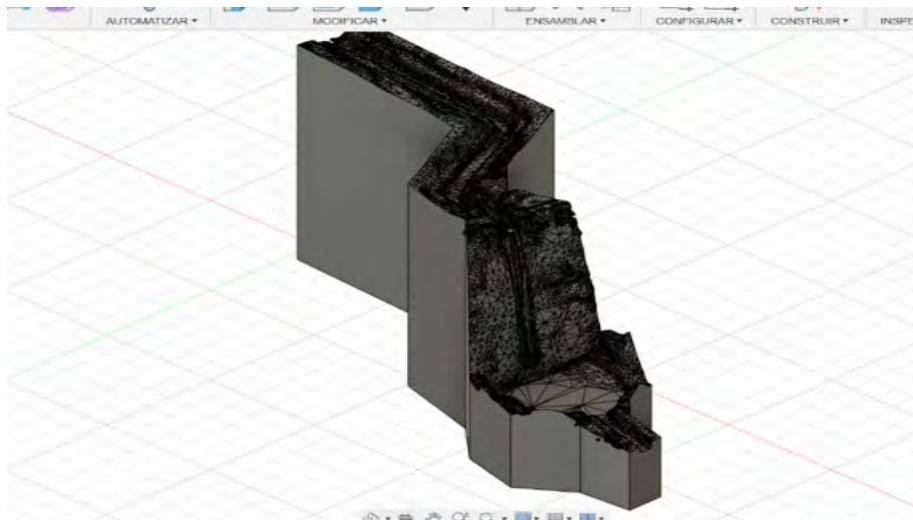


Nota: Elaboración propia

4.1.3.3 Escaneo con LiDAR de mano caída terraza 2 de Tipón

Figura 35

Escaneo con LiDAR de mano caída terraza 2 de Tipón



Nota: Elaboración propia

4.1.3.4 Escaneo con LiDAR de mano templo del agua Tipón

Figura 36

Escaneo con LiDAR de mano templo del agua de Tipón



Nota: Elaboración propia

4.1.4 Caracterización hidráulica del fluido

Las propiedades físicas del fluido en Tipón son fundamentales para la correcta representación del sistema hidráulico en las simulaciones numéricas. Este será usado como datos de entrada para las simulaciones en Flow 3D. El fluido considerado es agua natural proveniente de manantiales.

4.1.4.1 Temperatura del agua en Tipón

La temperatura del agua en los canales de Tipón se midió en campo con un termómetro de inmersión, conforme a la norma NTP 214.060, sumergiéndolo aproximadamente 10 cm durante 30 segundos, obteniéndose una temperatura uniforme de 14 °C en todos los canales evaluados.

Tabla 7

Cuadro de temperatura en los canales de Tipón

Nº	CODIGO DEL CANAL	UBICACION	TEMPERATURA °C
1	F01	Terraza 11-12	14
2	C-H01-D	Terraza 11	14
3	C-L01	Terraza 11	14
4	C-H02-D	Terraza 10	14
5	C-H03-I	Terraza 10	14
6	C-D01	Terraza 10	14
7	C-D02	Terraza 10	14
8	C-L02	Terraza 10	14
9	C-H04-I	Terraza 11	14
10	CA-H1	Terraza 12	14
11	C-L03	Terraza 10	14
12	F02	Terraza 10	14
13	C-L04	Terraza 9	14
14	CA-L1	Terraza 9 - 8	14
15	C-L05	Terraza 08	14
16	CA-L2	Terraza 8 - 7	14
17	C-L06	Terraza 10	14
18	C-L07	Terraza 07	14
19	CA-L3	Terraza 7-6	14
20	C-H05-I	Terraza 6	14

Nota: Elaboración Propia

Tabla 8*Cuadro de temperatura en los canales de Tipón 2 parte*

Nº	CODIGO DEL CANAL	UBICACION	TEMPERATURA °C
21	C-L08	Terraza 6	14
22	C-L09	Terraza 6	14
23	C-H09-I	Terraza 5	14
24	CA-H5	Terraza 5	14
25	C-H10-I	Terraza 5	14
26	C-L10	Terraza 5	14
27	CA-L4	Terraza 5	14
28	C-L11	Terraza 5	14
29	CA-L5	Terraza 5-4	14
30	C-L12	Terraza 4	14
31	CA-L6	Terraza 4-3	14
32	C-L13	Terraza 4	14
33	CA-H6	Terraza 5-4	14
34	C-L14	Terraza 3	14
35	CA-L7	Terraza 3-4	14
36	C-L15	Terraza 3	14
37	CA-H7	Terraza 4-3	14
38	C-H11-D	Terraza 3	14
39	CA-L8	Terraza 3-2	14
40	C-H12-I	Terraza 2	14
41	C-L16	Terraza 2	14
42	CA-L9	Terraza 2-1	14
43	C-L17	Terraza 1	14
44	CA-L10	Terraza 1	14
45	C-L18	Entrada a Tipón	14

Nota: Elaboración Propia

4.1.4.2 Densidad del agua en Tipón.

La densidad del agua en Tipón a una temperatura promedio de 14 °C es ligeramente superior a la densidad estándar a 20 °C. Según datos tabulados, se considera un valor de 999.2 kg/m³ para esta condición.

4.1.4.3 Viscosidad del agua en Tipón.

La viscosidad dinámica del agua a 14 °C es de aproximadamente **0.0011683 kg/(m-s)**, valor superior al registrado a temperaturas mayores debido a la menor energía térmica de las moléculas de agua. Esta propiedad incide en la resistencia interna al flujo, siendo determinante para la representación de los regímenes laminar o turbulento en las simulaciones. Asimismo, la viscosidad cinemática se estima en **1.1692 mm²/s** para la temperatura de 14 °C.

4.1.4.4 Compresibilidad del fluido en Tipón

El agua será considerada un fluido incompresible para efectos del modelado hidráulico en Tipón. Esta suposición es válida debido a que, en condiciones naturales de presión y temperatura, los cambios de volumen del agua son despreciables. Asumir la incompresibilidad simplifica las ecuaciones de conservación de masa y de momento sin comprometer la precisión de los resultados, permitiendo una representación más eficiente del flujo en Flow 3D.

4.1.5 Caracterización hidráulica del flujo mediante métodos experimentales y simulación computacional

La presente sección integra el análisis hidráulico del sistema incaico de Tipón a través de dos enfoques complementarios: la caracterización experimental del flujo superficial mediante técnicas ópticas no intrusivas, como la Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (LSPIV), Medición de caudales in situ con la metodología de los vertederos y la simulación numérica mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) utilizando el software FLOW-3D. Esta combinación metodológica permite obtener una visión integral del comportamiento del flujo en los canales históricos, considerando tanto los parámetros hidrodinámicos medidos in situ como la modelación tridimensional detallada del movimiento del agua, sus interacciones con las

estructuras hidráulicas y los efectos asociados a la topografía. El análisis resultante permite evaluar con mayor precisión la eficiencia, funcionalidad y sostenibilidad del sistema hidráulico ancestral.

4.1.5.1 Resultados hidráulicos mediante procesamiento LSPIV en canales de Tipón

Para caracterizar el flujo superficial en el sistema hidráulico de Tipón, se realizó el procesamiento mediante el software especializado RIVeR (River Image Velocity Radar), un programa ampliamente empleado para análisis de imágenes en hidrodinámica fluvial. El proceso consta de tres etapas fundamentales:

4.1.5.1.1 LSPIV Canal C-L18

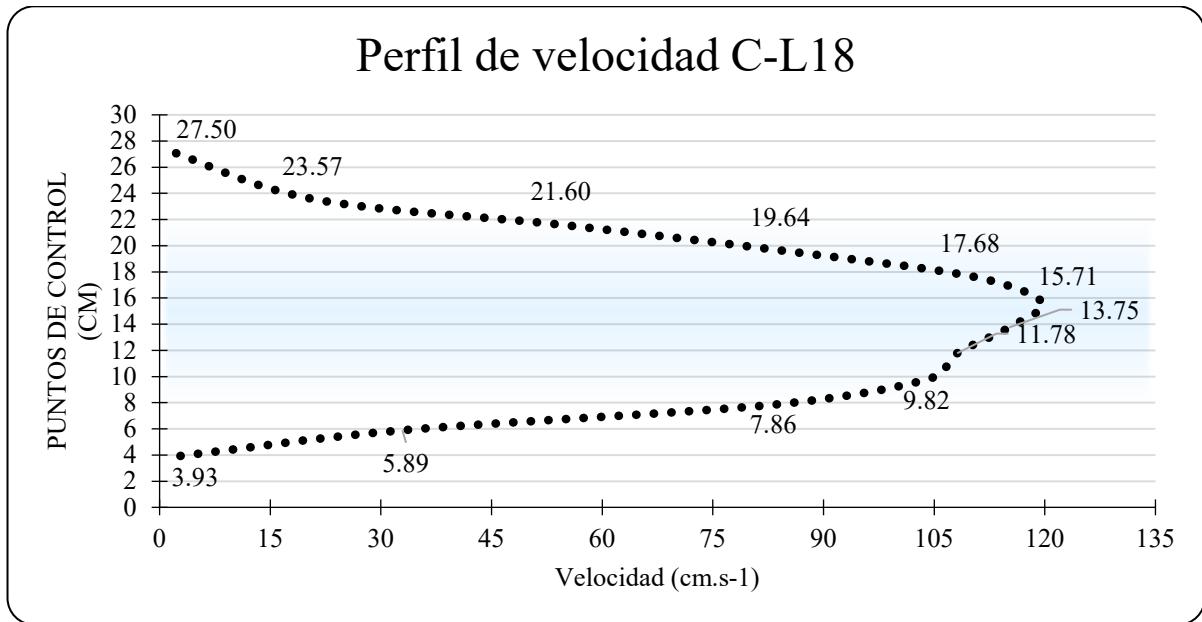
En este canal se tuvo un video 15 segundos a 120fps, donde se procesaron 10 segundos, es decir se procesaron 1200 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 55.66 cm/s un área de 179.4 cm² y un caudal de 9,985.15 cm³/s, para el cálculo del caudal se usó el método de la sección media.

Tabla 9

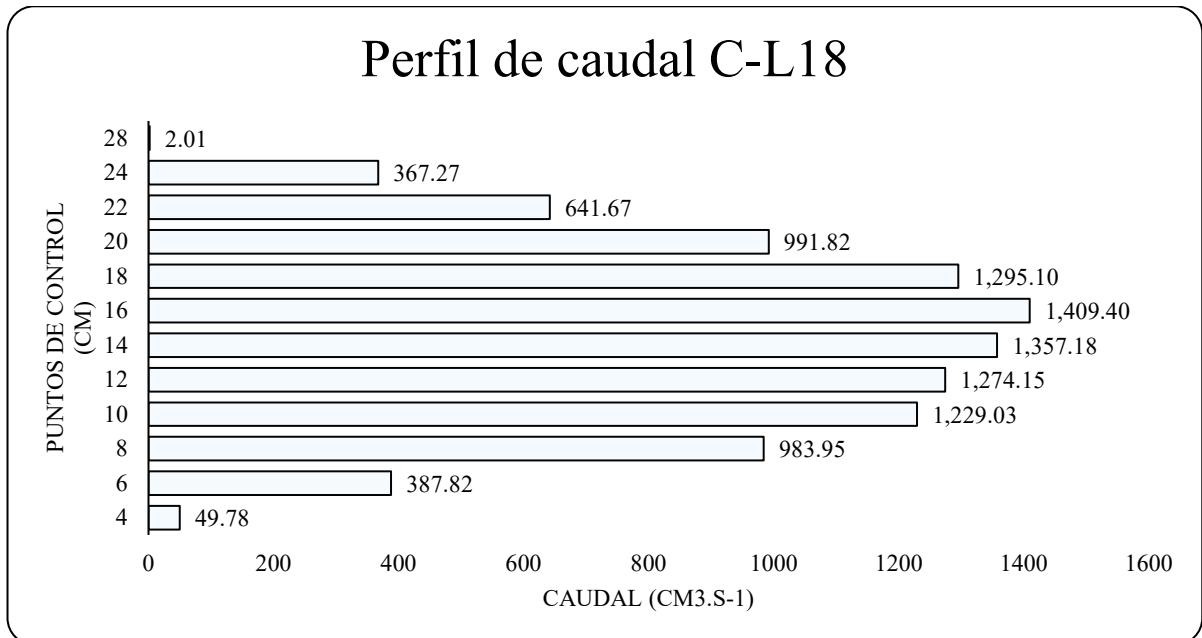
Resumen (método de la sección media) Canal C-L18

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	Caudal l.s ⁻¹
3.93	2.95	6.00	17.68	2.82	49.78	0.05
5.89	1.96	6.00	11.78	32.91	387.82	0.39
7.86	1.96	6.00	11.78	83.50	983.95	0.98
9.82	1.96	6.00	11.78	104.29	1,229.03	1.23
11.78	1.96	6.00	11.78	108.12	1,274.15	1.27
13.75	1.96	6.00	11.78	115.17	1,357.18	1.36
15.71	1.96	6.00	11.78	119.60	1,409.40	1.41
17.68	1.96	6.00	11.78	109.90	1,295.10	1.30
19.64	1.96	6.00	11.78	84.16	991.82	0.99
21.60	1.96	6.00	11.78	54.45	641.67	0.64
23.57	2.95	6.00	17.68	20.78	367.27	0.37
27.50	3.22	6.00	19.29	0.10	2.01	0.00
Caudal Total					9,989.18	cm.s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 37*Gráfico perfil de velocidad canal C-L18*

Nota: Elaboración propia

Figura 38*Gráfico perfil de caudal canal C-L18*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L17**

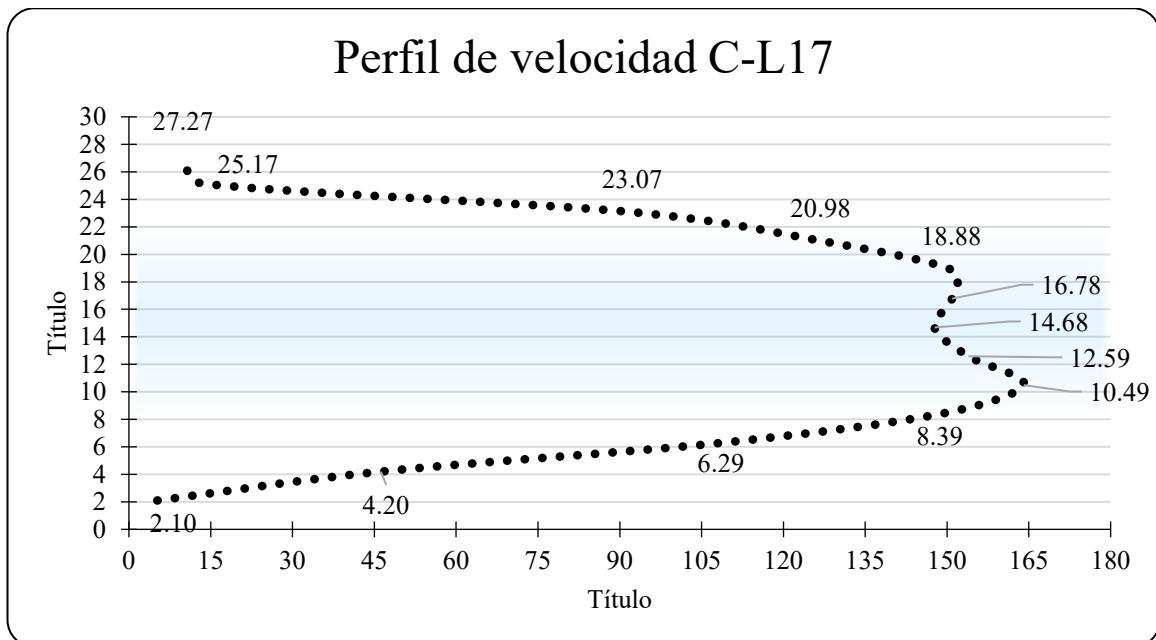
En este canal se tuvo un video 20 segundos a 120fps, donde se procesaron 10 segundos, es decir se procesaron 1200 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 97.91 cm/s un área de 310.2 cm² y un caudal de 3,0372 cm³/s, para el cálculo del caudal se usó el método de la sección media.

Tabla 10

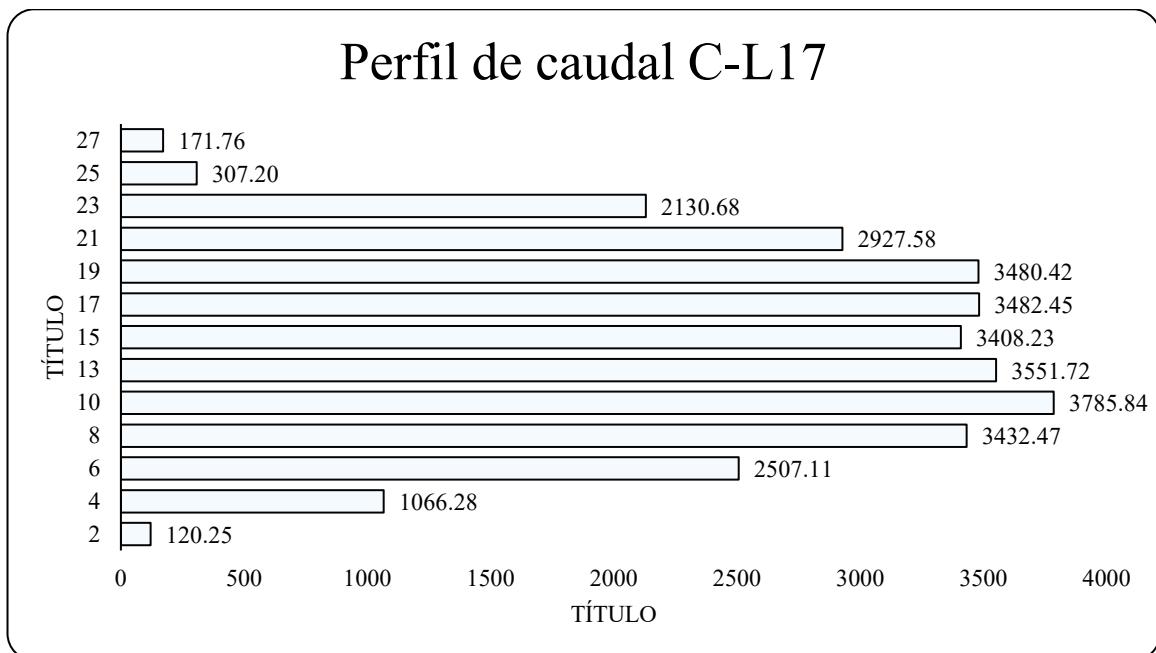
Resumen (método de la sección media) Canal C-L17

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm.s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
2.10	2.10	11.00	23.07	5.21	120.25 0.12
4.20	2.10	11.00	23.07	46.21	1,066.28 1.07
6.29	2.10	11.00	23.07	108.65	2,507.11 2.51
8.39	2.10	11.00	23.07	148.75	3,432.47 3.43
10.49	2.10	11.00	23.07	164.07	3,785.84 3.79
12.59	2.10	11.00	23.07	153.92	3,551.72 3.55
14.68	2.10	11.00	23.07	147.70	3,408.23 3.41
16.78	2.10	11.00	23.07	150.92	3,482.45 3.48
18.88	2.10	11.00	23.07	150.83	3,480.42 3.48
20.98	2.10	11.00	23.07	126.87	2,927.58 2.93
23.07	2.10	11.00	23.07	92.34	2,130.68 2.13
25.17	2.10	11.00	23.07	13.31	307.20 0.31
27.27	1.56	11.00	17.20	9.98	171.76 0.17
Caudal Total				30,371.99	Cm³/s

Nota: Elaboración Propia

Figura 39*Gráfico perfil de velocidad canal C-L17*

Nota: Elaboración propia

Figura 40*Gráfico perfil de caudal canal C-L1*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-L16***

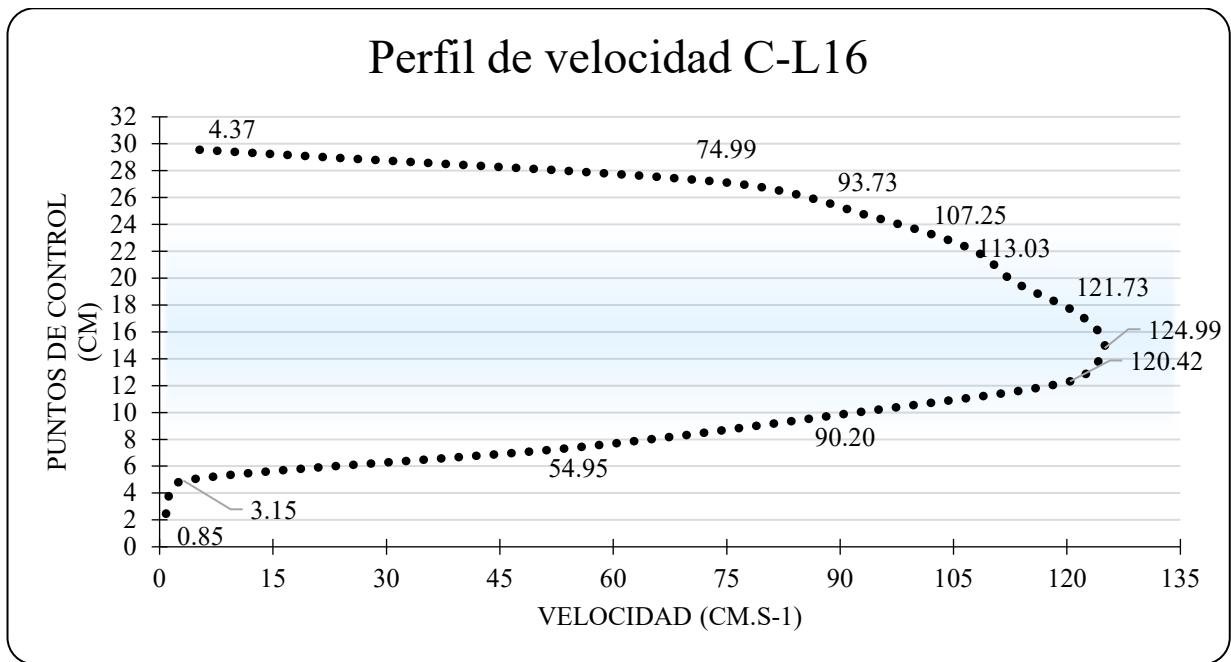
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 15 segundos, es decir se procesaron 1800 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 74.69 cm/s un área de 179.4 cm² y un caudal de 13425.2 cm³/s, para el cálculo del caudal se usó el método de la sección media.

Tabla 11

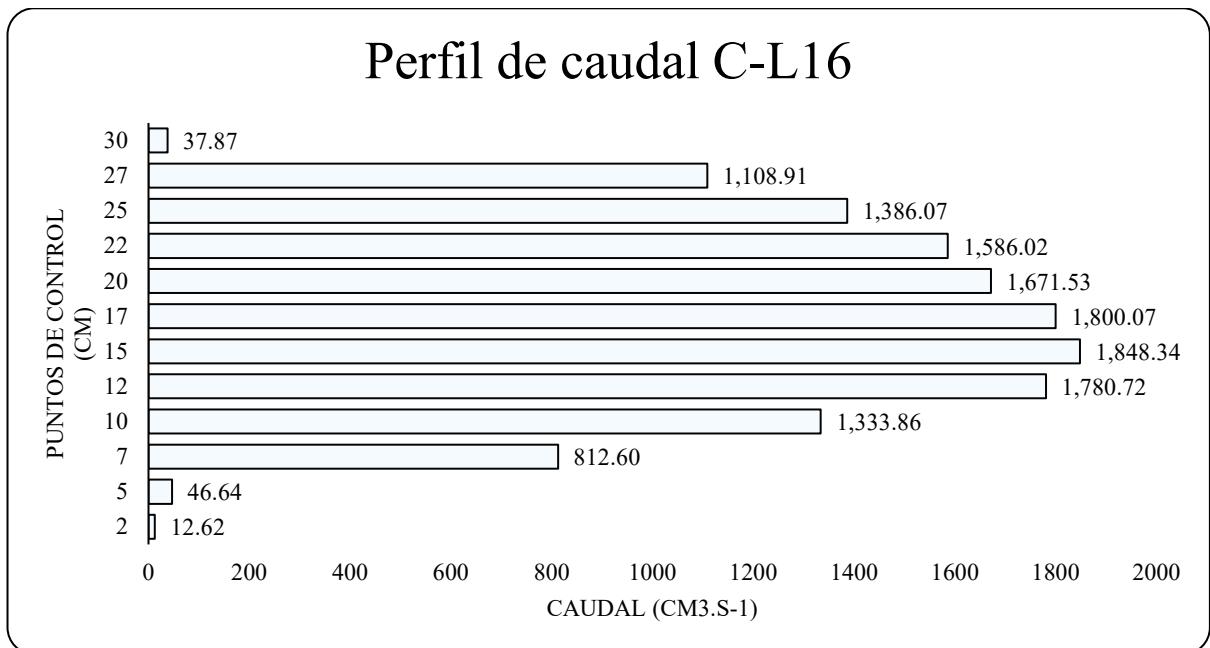
Resumen (método de la sección media) Canal C-L16

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
2.46	2.46	6.00	14.79	0.85	12.62 0.01
4.93	2.46	6.00	14.79	3.15	46.64 0.05
7.39	2.46	6.00	14.79	54.95	812.60 0.81
9.86	2.46	6.00	14.79	90.20	1,333.86 1.33
12.32	2.46	6.00	14.79	120.42	1,780.72 1.78
14.79	2.46	6.00	14.79	124.99	1,848.34 1.85
17.25	2.46	6.00	14.79	121.73	1,800.07 1.80
19.72	2.46	6.00	14.79	113.03	1,671.53 1.67
22.18	2.46	6.00	14.79	107.25	1,586.02 1.59
24.65	2.46	6.00	14.79	93.73	1,386.07 1.39
27.11	2.46	6.00	14.79	74.99	1,108.91 1.11
29.58	1.44	6.00	8.67	4.37	37.87 0.04
Caudal Total					13,425.25 Cm³/s

Nota: Elaboración Propia

Figura 41*Gráfico perfil de velocidad canal C-L16*

Nota: Elaboración propia

Figura 42*Gráfico perfil de caudal canal C-L16*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L14**

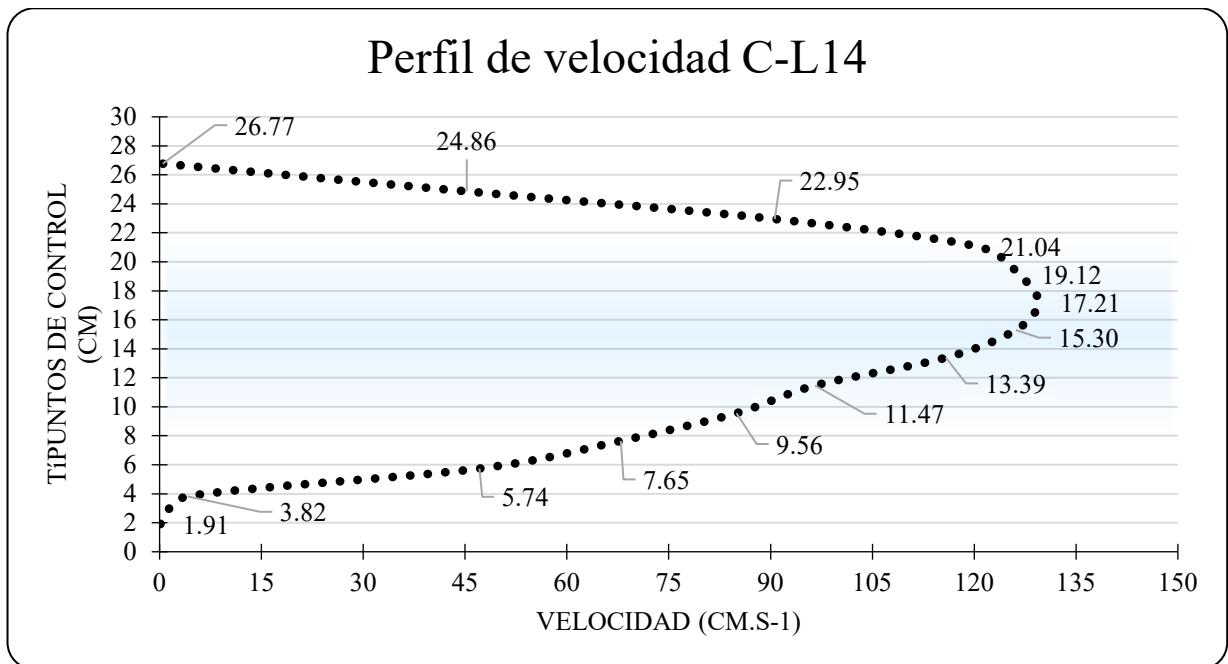
En este canal se tuvo un video 12 segundos a 120fps, donde se procesaron 10 segundos, es decir se procesaron 1200 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 72.3 cm/s un área de 292.95 cm² y un caudal de 21199.5 cm³/s.

Tabla 12

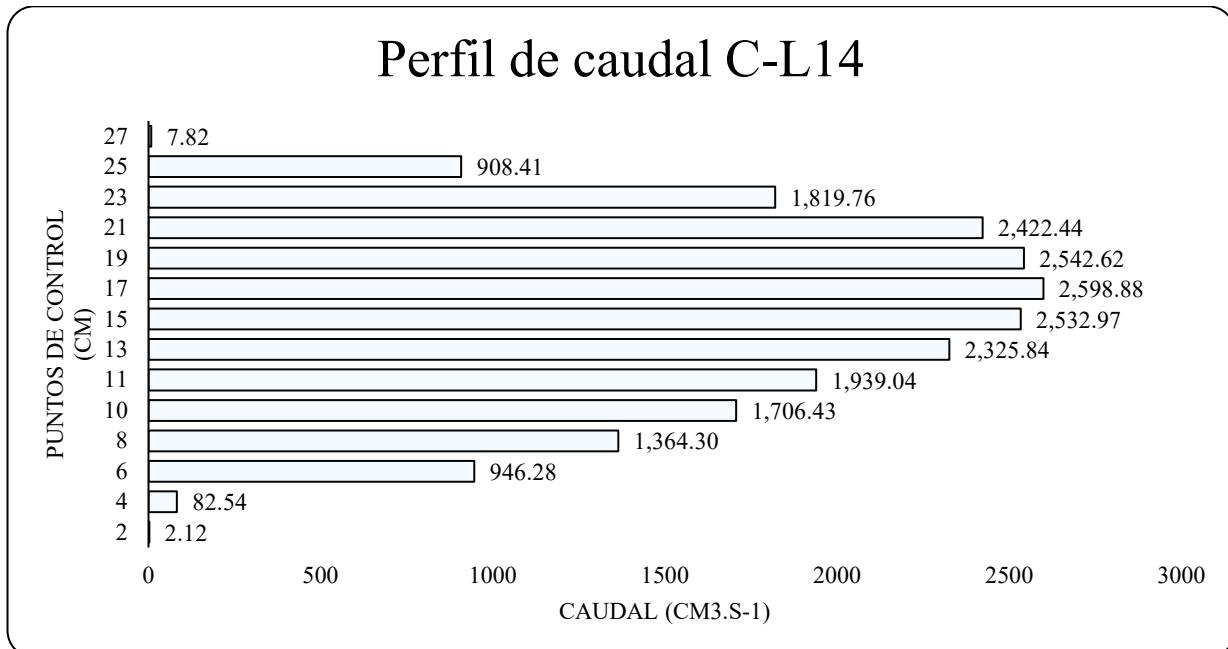
Resumen (método de la sección media) Canal C-L14

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
1.91	1.91	10.50	20.08	0.11	2.12 0.00
3.82	1.91	10.50	20.08	4.11	82.54 0.08
5.74	1.91	10.50	20.08	47.12	946.28 0.95
7.65	1.91	10.50	20.08	67.94	1,364.30 1.36
9.56	1.91	10.50	20.08	84.98	1,706.43 1.71
11.47	1.91	10.50	20.08	96.56	1,939.04 1.94
13.39	1.91	10.50	20.08	115.82	2,325.84 2.33
15.30	1.91	10.50	20.08	126.14	2,532.97 2.53
17.21	1.91	10.50	20.08	129.42	2,598.88 2.60
19.12	1.91	10.50	20.08	126.62	2,542.62 2.54
21.04	1.91	10.50	20.08	120.63	2,422.44 2.42
22.95	1.91	10.50	20.08	90.62	1,819.76 1.82
24.86	1.91	10.50	20.08	45.24	908.41 0.91
26.77	1.57	10.50	16.47	0.47	7.82 0.01
Caudal Total				21,199.45	Cm³/s

Nota: Elaboración Propia

Figura 43*Gráfico perfil de velocidad canal C-L14*

Nota: Elaboración propia

Figura 44*Gráfico perfil de velocidad canal C-L14*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-H12**

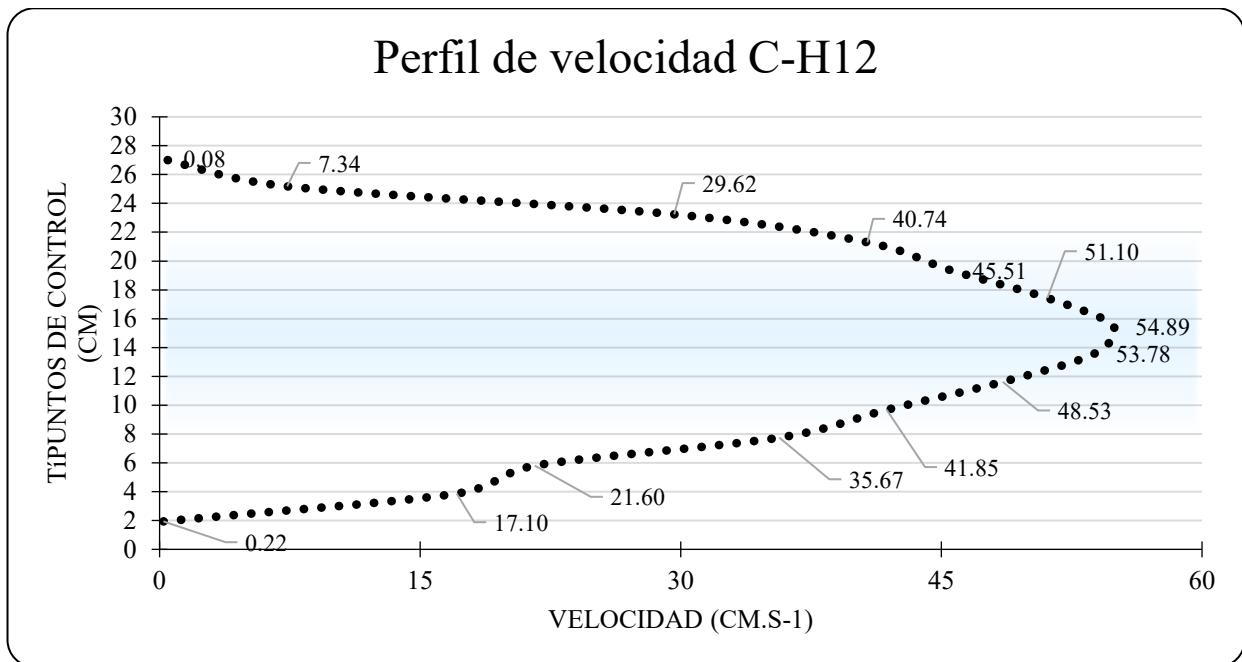
En este canal se tuvo un video 8 segundos a 120fps, donde se procesaron 8 segundos, es decir se procesaron 960 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 32.01 cm/s un área de 243.9 cm² y un caudal de 7808.4 cm³/s.

Tabla 13

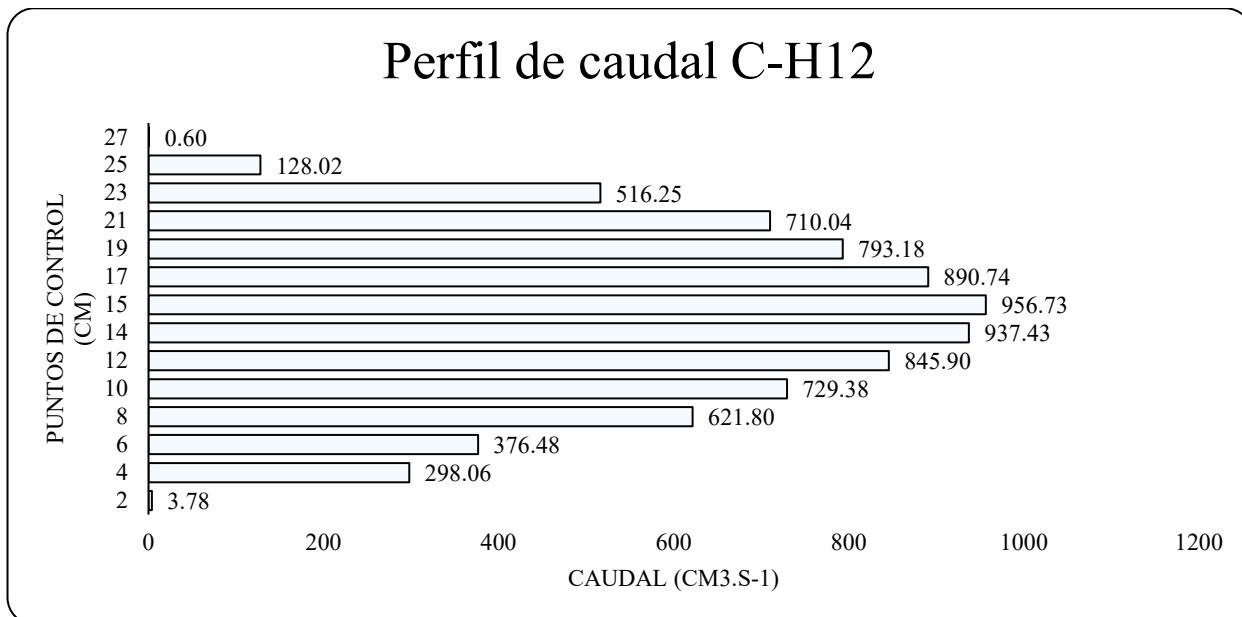
Resumen (método de la sección media) Canal C-H12

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
1.94	1.94	9.00	17.43	0.22	3.78 0.00
3.87	1.94	9.00	17.43	17.10	298.06 0.30
5.81	1.94	9.00	17.43	21.60	376.48 0.38
7.75	1.94	9.00	17.43	35.67	621.80 0.62
9.68	1.94	9.00	17.43	41.85	729.38 0.73
11.62	1.94	9.00	17.43	48.53	845.90 0.85
13.56	1.94	9.00	17.43	53.78	937.43 0.94
15.49	1.94	9.00	17.43	54.89	956.73 0.96
17.43	1.94	9.00	17.43	51.10	890.74 0.89
19.37	1.94	9.00	17.43	45.51	793.18 0.79
21.30	1.94	9.00	17.43	40.74	710.04 0.71
23.24	1.94	9.00	17.43	29.62	516.25 0.52
25.18	1.94	9.00	17.43	7.34	128.02 0.13
27.11	1.01	7.73	7.82	0.08	0.60 0.00
Caudal Total				7,808.39	Cm ³ /s

Nota: Elaboración Propia

Figura 45*Gráfico perfil de velocidad canal C-H12*

Nota: Elaboración propia

Figura 46*Gráfico perfil de caudal canal C-H12*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-H11***

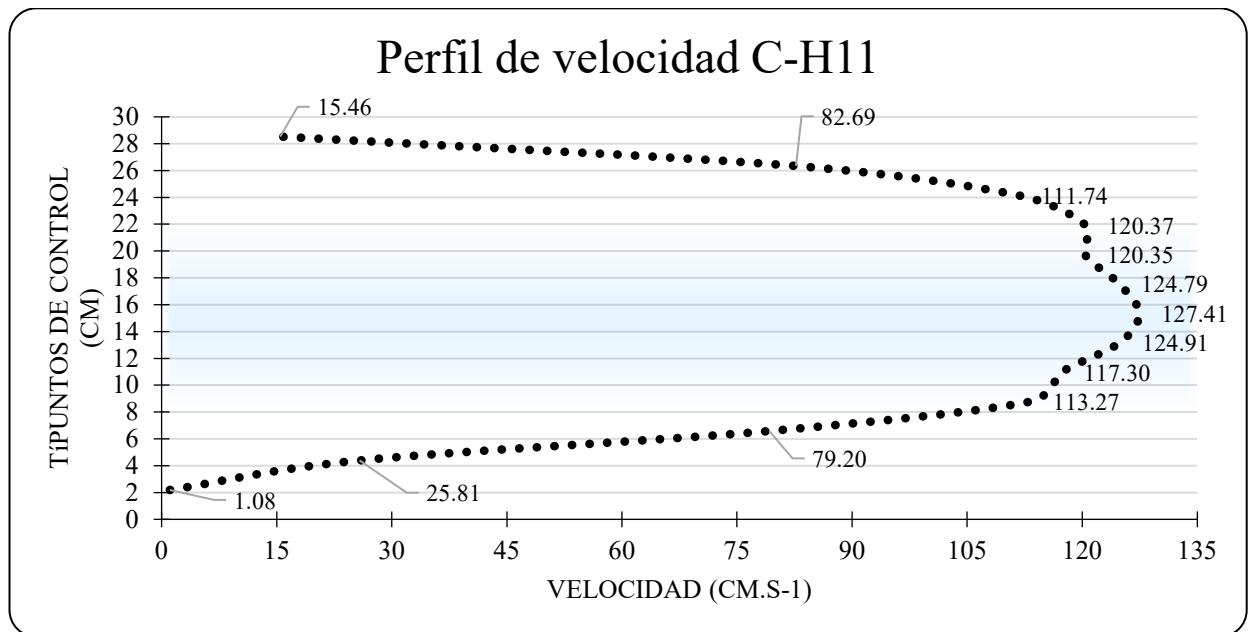
En este canal se tuvo un video 20 segundos a 120fps, donde se procesaron 15 segundos, es decir se procesaron 1800 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 85.28 cm/s un área de 179.4 cm² y un caudal de 15299 cm³/s.

Tabla 14

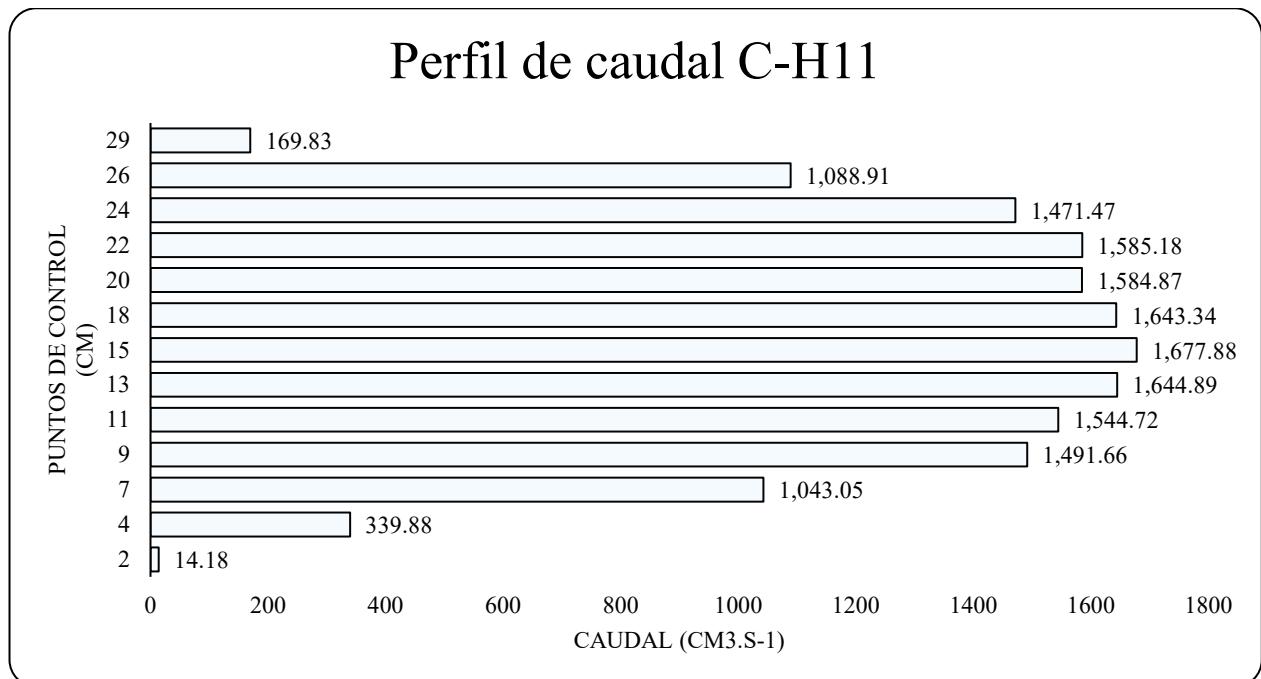
Resumen (método de la sección media) Canal C-H11

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
2.19	2.19	6.00	13.17	1.08	14.18 0.01
4.39	2.19	6.00	13.17	25.81	339.88 0.34
6.58	2.19	6.00	13.17	79.20	1,043.05 1.04
8.78	2.19	6.00	13.17	113.27	1,491.66 1.49
10.97	2.19	6.00	13.17	117.30	1,544.72 1.55
13.17	2.19	6.00	13.17	124.91	1,644.89 1.65
15.36	2.19	6.00	13.17	127.41	1,677.88 1.68
17.56	2.19	6.00	13.17	124.79	1,643.34 1.64
19.75	2.19	6.00	13.17	120.35	1,584.87 1.59
21.95	2.19	6.00	13.17	120.37	1,585.18 1.59
24.14	2.19	6.00	13.17	111.74	1,471.47 1.47
26.34	2.19	6.00	13.17	82.69	1,088.91 1.09
28.53	1.83	6.00	10.99	15.46	169.83 0.17
Caudal Total				15,299.86	Cm ³ /s

Nota: Elaboración Propia

Figura 47*Gráfico perfil de velocidad canal C-H11*

Nota: Elaboración propia

Figura 48*Gráfico perfil de caudal canal C-H11*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L15**

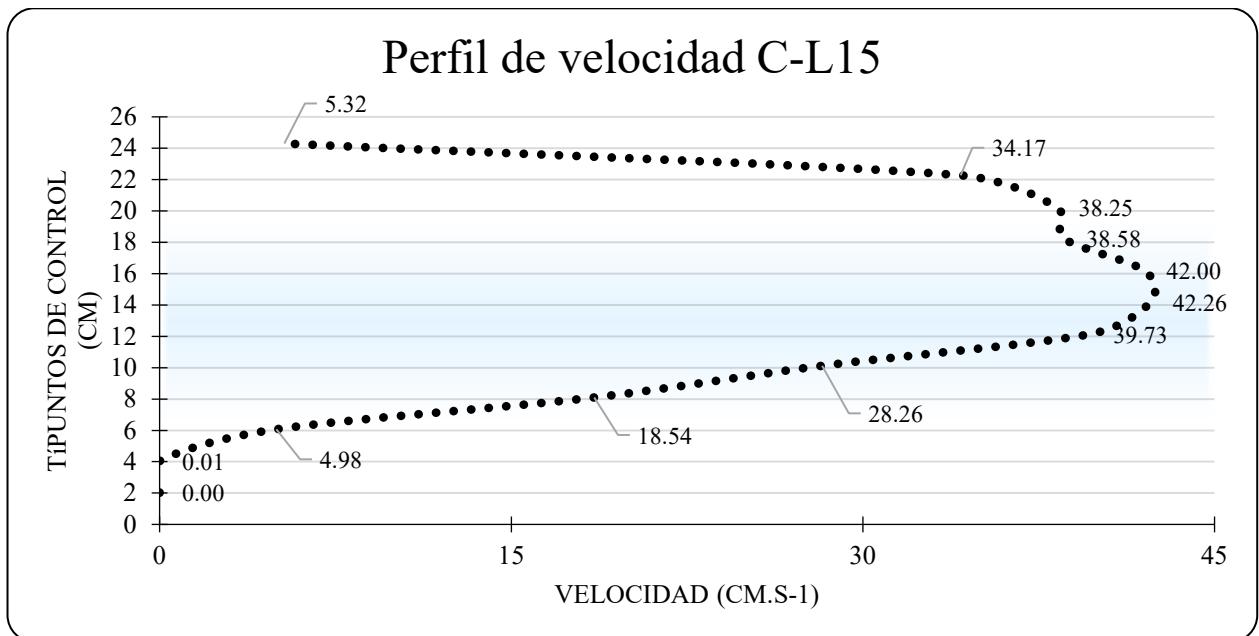
En este canal se tuvo un video 20 segundos a 120fps, donde se procesaron 15 segundos, es decir se procesaron 1800 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 23.61 cm/s un área de 124.5 cm² y un caudal de 2939.76 cm³/s.

Tabla 15

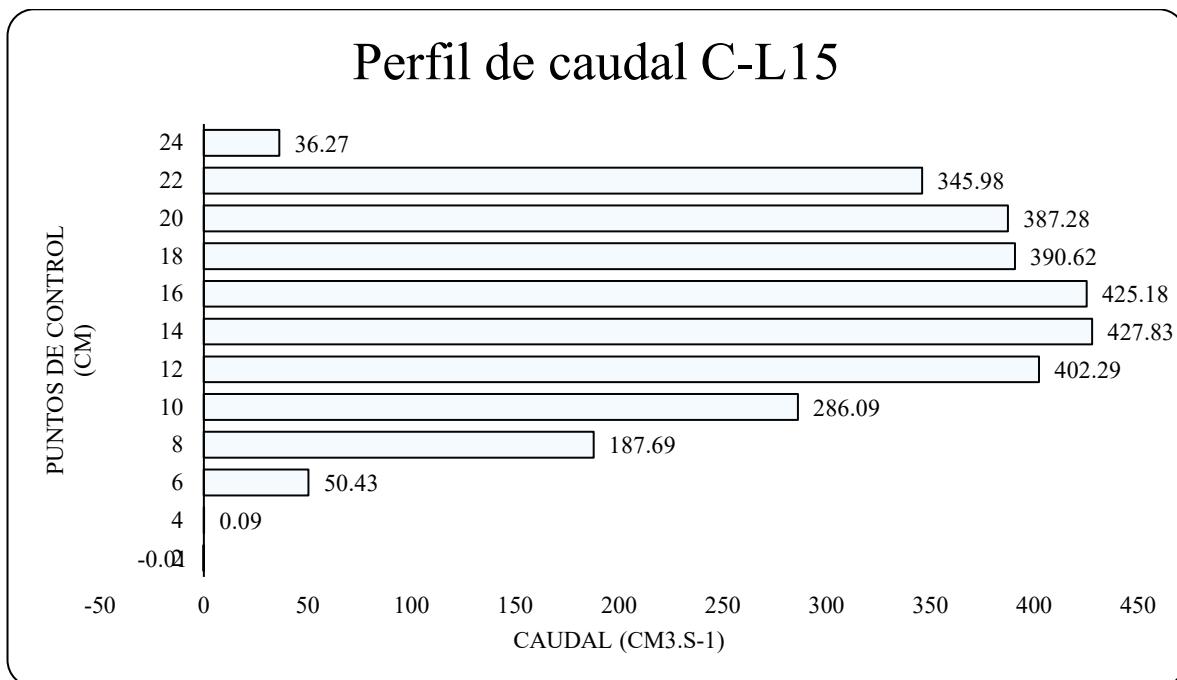
Resumen (método de la sección media) Canal C-L15

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.02	2.02	5.00	10.12	0.00	-0.01	0.00
4.05	2.02	5.00	10.12	0.01	0.09	0.00
6.07	2.02	5.00	10.12	4.98	50.43	0.05
8.10	2.02	5.00	10.12	18.54	187.69	0.19
10.12	2.02	5.00	10.12	28.26	286.09	0.29
12.15	2.02	5.00	10.12	39.73	402.29	0.40
14.17	2.02	5.00	10.12	42.26	427.83	0.43
16.20	2.02	5.00	10.12	42.00	425.18	0.43
18.22	2.02	5.00	10.12	38.58	390.62	0.39
20.25	2.02	5.00	10.12	38.25	387.28	0.39
22.27	2.02	5.00	10.12	34.17	345.98	0.35
24.30	1.36	5.00	6.82	5.32	36.27	0.04
Caudal Total					2,939.74	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 49*Gráfico perfil de velocidad canal C-L15*

Nota: Elaboración propia

Figura 50*Gráfico perfil de caudal canal C-L15*

Nota: Elaboración propia

○ **LSPIV CANAL C-L13**

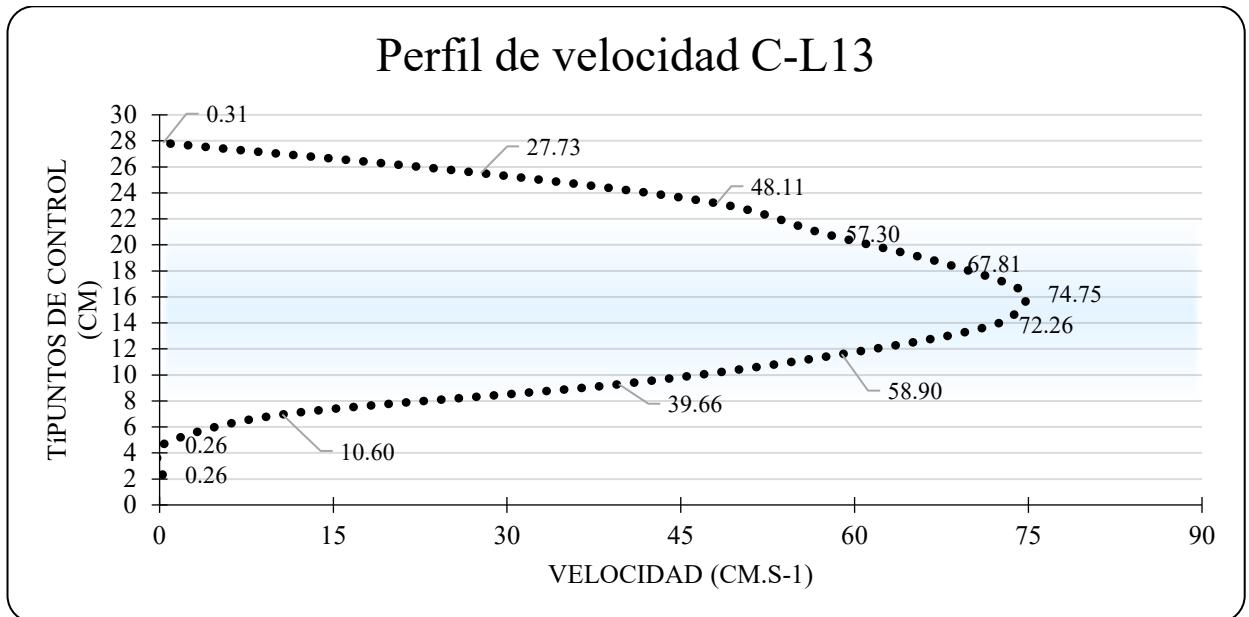
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 37.99 cm/s un área de 111.6 cm² y un caudal de 4247.82 cm³/s.

Tabla 16

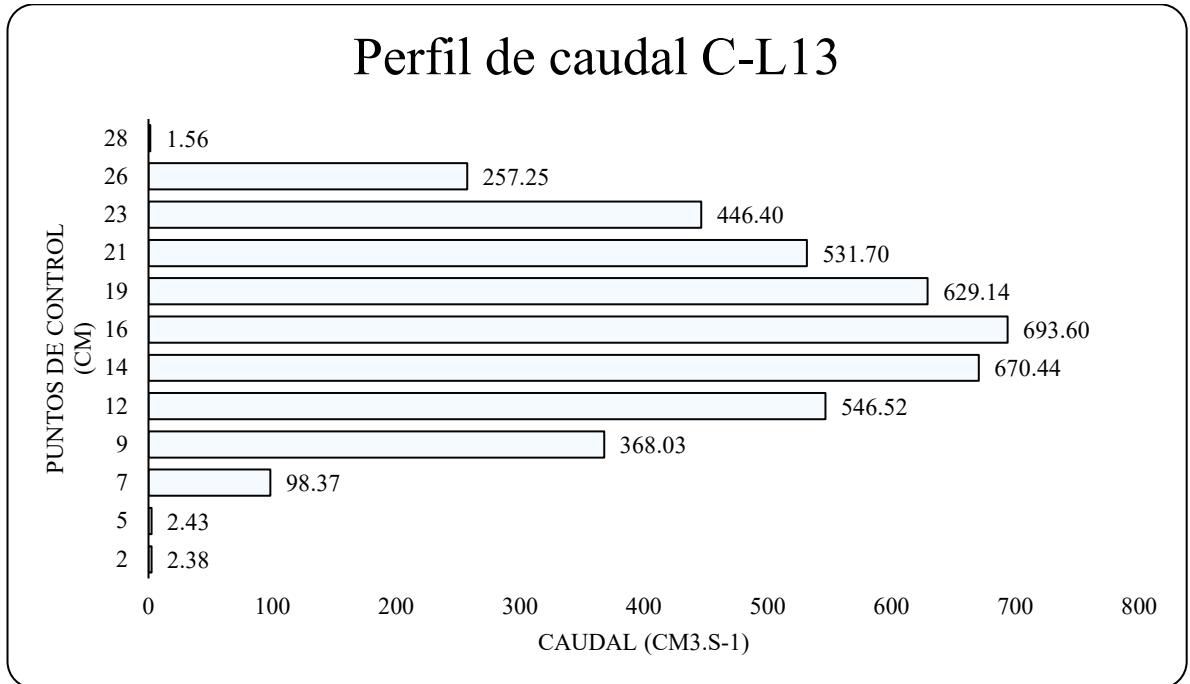
Resumen (método de la sección media) Canal C-L13

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
2.32	2.32	4.00	9.28	0.26	2.38 0.00
4.64	2.32	4.00	9.28	0.26	2.43 0.00
6.96	2.32	4.00	9.28	10.60	98.37 0.10
9.28	2.32	4.00	9.28	39.66	368.03 0.37
11.60	2.32	4.00	9.28	58.90	546.52 0.55
13.92	2.32	4.00	9.28	72.26	670.44 0.67
16.24	2.32	4.00	9.28	74.75	693.60 0.69
18.56	2.32	4.00	9.28	67.81	629.14 0.63
20.88	2.32	4.00	9.28	57.30	531.70 0.53
23.20	2.32	4.00	9.28	48.11	446.40 0.45
25.52	2.32	4.00	9.28	27.73	257.25 0.26
27.84	1.24	4.00	4.97	0.31	1.56 0.00
Caudal Total				4,247.82	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 51*Gráfico perfil de velocidad canal C-L13*

Nota: Elaboración propia

Figura 52*Gráfico perfil de caudal canal C-L13*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L12**

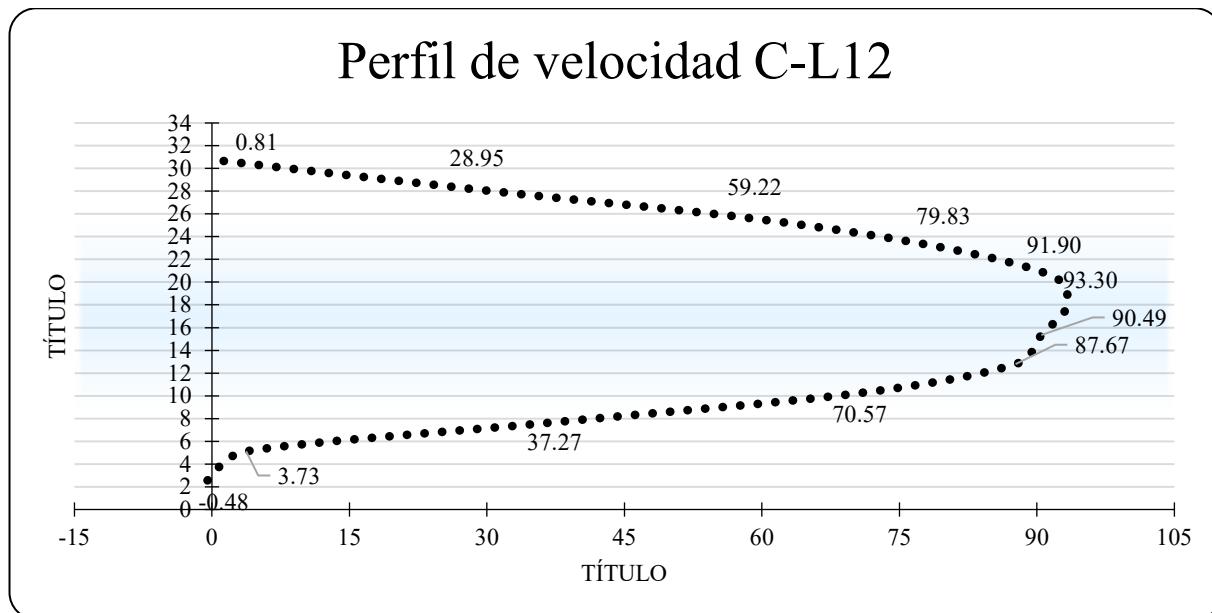
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 53.22 cm/s un área de 247.2 cm² y un caudal de 13176.89 cm³/s.

Tabla 17

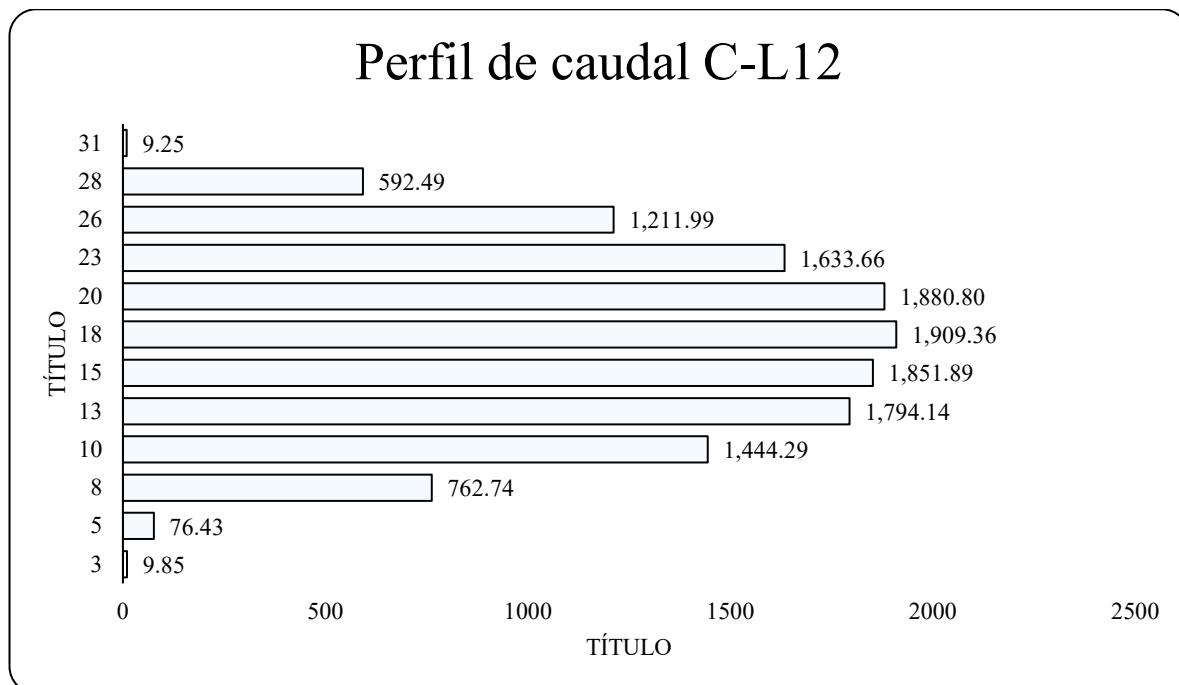
Resumen (método de la sección media) Canal C-L12

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
2.56	2.56	8.00	20.46	-0.48	9.85 0.01
5.12	2.56	8.00	20.46	3.73	76.43 0.08
7.67	2.56	8.00	20.46	37.27	762.74 0.76
10.23	2.56	8.00	20.46	70.57	1,444.29 1.44
12.79	2.56	8.00	20.46	87.67	1,794.14 1.79
15.35	2.56	8.00	20.46	90.49	1,851.89 1.85
17.91	2.56	8.00	20.46	93.30	1,909.36 1.91
20.46	2.56	8.00	20.46	91.90	1,880.80 1.88
23.02	2.56	8.00	20.46	79.83	1,633.66 1.63
25.58	2.56	8.00	20.46	59.22	1,211.99 1.21
28.14	2.56	8.00	20.46	28.95	592.49 0.59
30.70	1.43	8.00	11.44	0.81	9.25 0.01
Caudal Total				13,176.89	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 53*Gráfico perfil de velocidad canal C-L12*

Nota: Elaboración propia

Figura 54*Gráfico perfil de caudal canal C-L12*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L11**

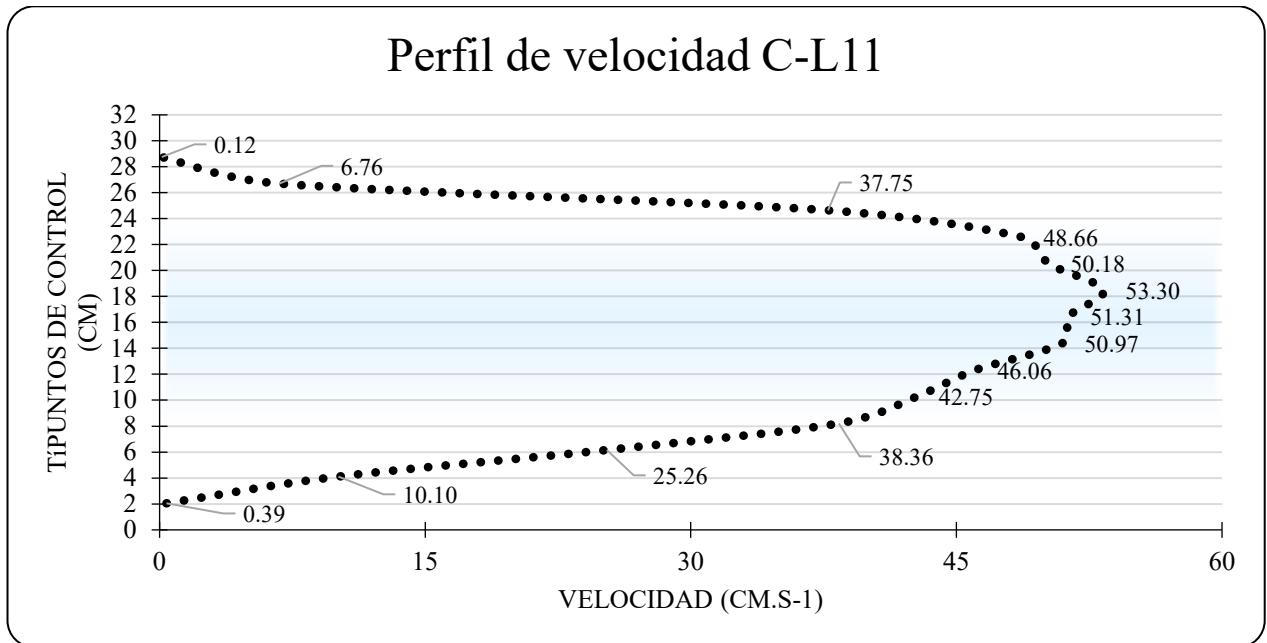
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 15 segundos, es decir se procesaron 1800 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 32.77 cm/s un área de 173.4 cm² y un caudal de 5691.55 cm³/s.

Tabla 18

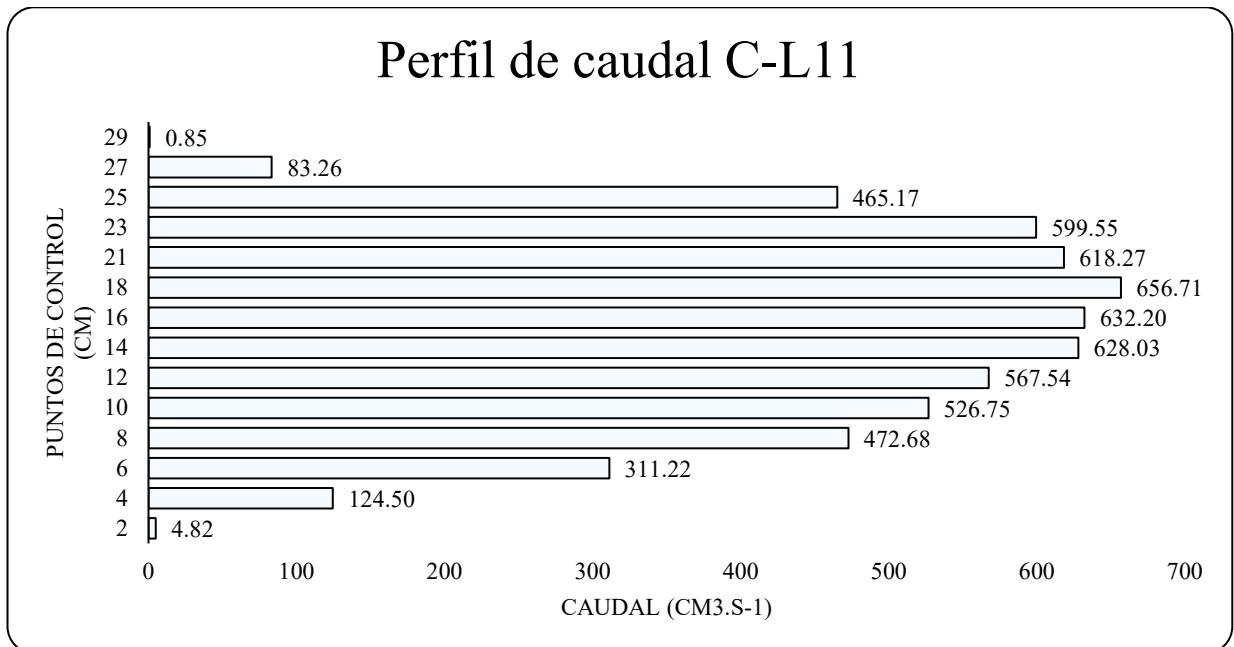
Resumen (método de la sección media) Canal C-L11

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.05	2.05	6.00	12.32	0.39	4.82	0.00
4.11	2.05	6.00	12.32	10.10	124.50	0.12
6.16	2.05	6.00	12.32	25.26	311.22	0.31
8.21	2.05	6.00	12.32	38.36	472.68	0.47
10.27	2.05	6.00	12.32	42.75	526.75	0.53
12.32	2.05	6.00	12.32	46.06	567.54	0.57
14.38	2.05	6.00	12.32	50.97	628.03	0.63
16.43	2.05	6.00	12.32	51.31	632.20	0.63
18.48	2.05	6.00	12.32	53.30	656.71	0.66
20.54	2.05	6.00	12.32	50.18	618.27	0.62
22.59	2.05	6.00	12.32	48.66	599.55	0.60
24.64	2.05	6.00	12.32	37.75	465.17	0.47
26.70	2.05	6.00	12.32	6.76	83.26	0.08
28.75	1.15	6.00	6.91	0.12	0.85	0.00
Caudal Total				5,691.55	cm ³ .s ⁻¹	

Nota: Elaboración Propia

Figura 55*Gráfico perfil de velocidad canal C-L11*

Nota: Elaboración propia

Figura 56*Gráfico perfil de caudal canal C-L11*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-H10**

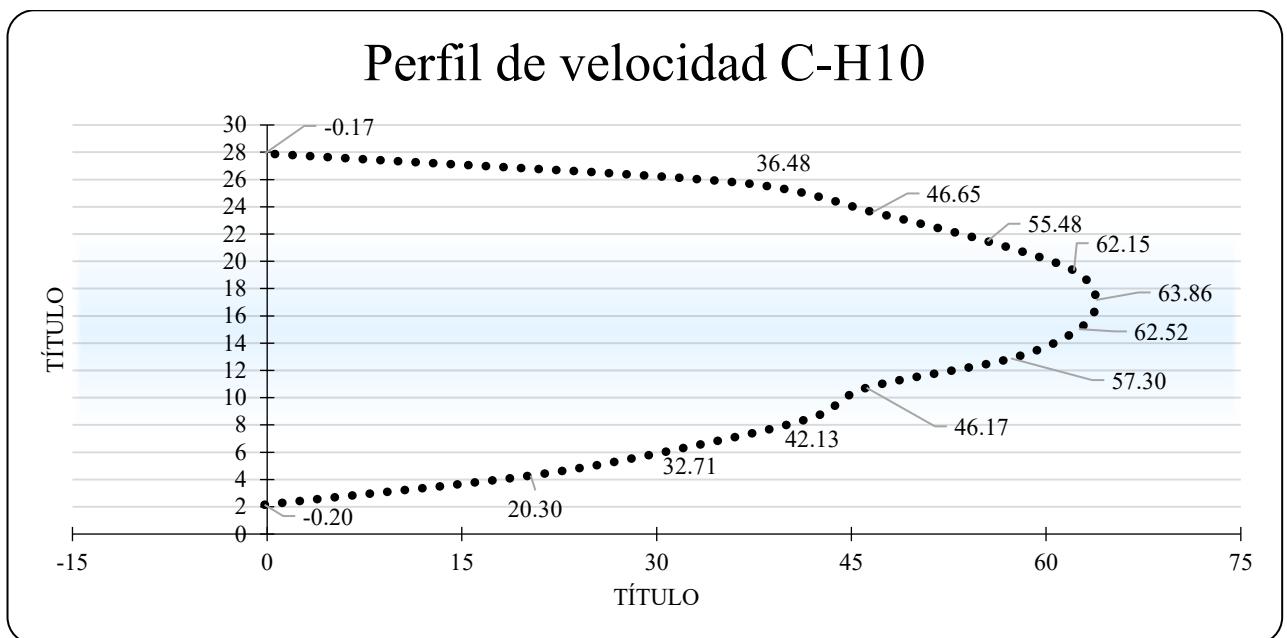
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 40.14 cm/s un área de 168.6 cm² y un caudal de 6767.43 cm³/s.

Tabla 19

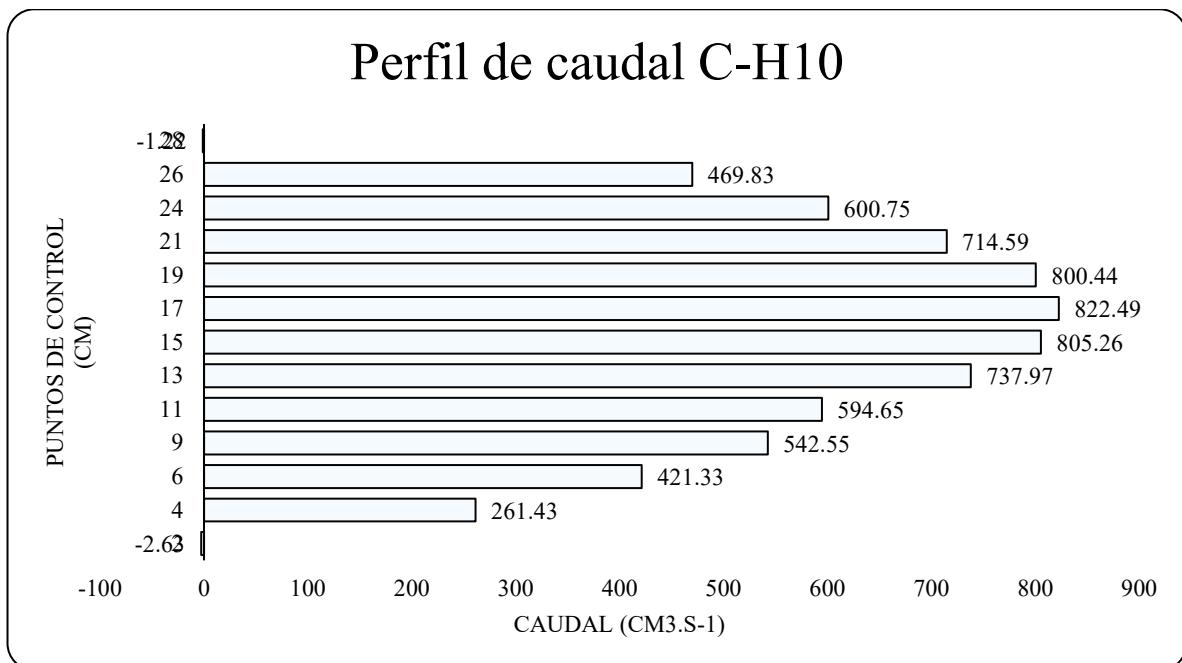
Resumen (método de la sección media) Canal C-H10

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.15	2.15	6.00	12.88	-0.20	-2.63	0.00
4.29	2.15	6.00	12.88	20.30	261.43	0.26
6.44	2.15	6.00	12.88	32.71	421.33	0.42
8.59	2.15	6.00	12.88	42.13	542.55	0.54
10.73	2.15	6.00	12.88	46.17	594.65	0.59
12.88	2.15	6.00	12.88	57.30	737.97	0.74
15.03	2.15	6.00	12.88	62.52	805.26	0.81
17.17	2.15	6.00	12.88	63.86	822.49	0.82
19.32	2.15	6.00	12.88	62.15	800.44	0.80
21.47	2.15	6.00	12.88	55.48	714.59	0.71
23.61	2.15	6.00	12.88	46.65	600.75	0.60
25.76	2.15	6.00	12.88	36.48	469.83	0.47
27.91	1.22	6.00	7.32	-0.17	-1.22	0.00
Caudal Total					6,767.44	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 57*Gráfico perfil de velocidad canal C-H10*

Nota: Elaboración propia

Figura 58*Gráfico perfil de caudal canal C-H10*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-L10***

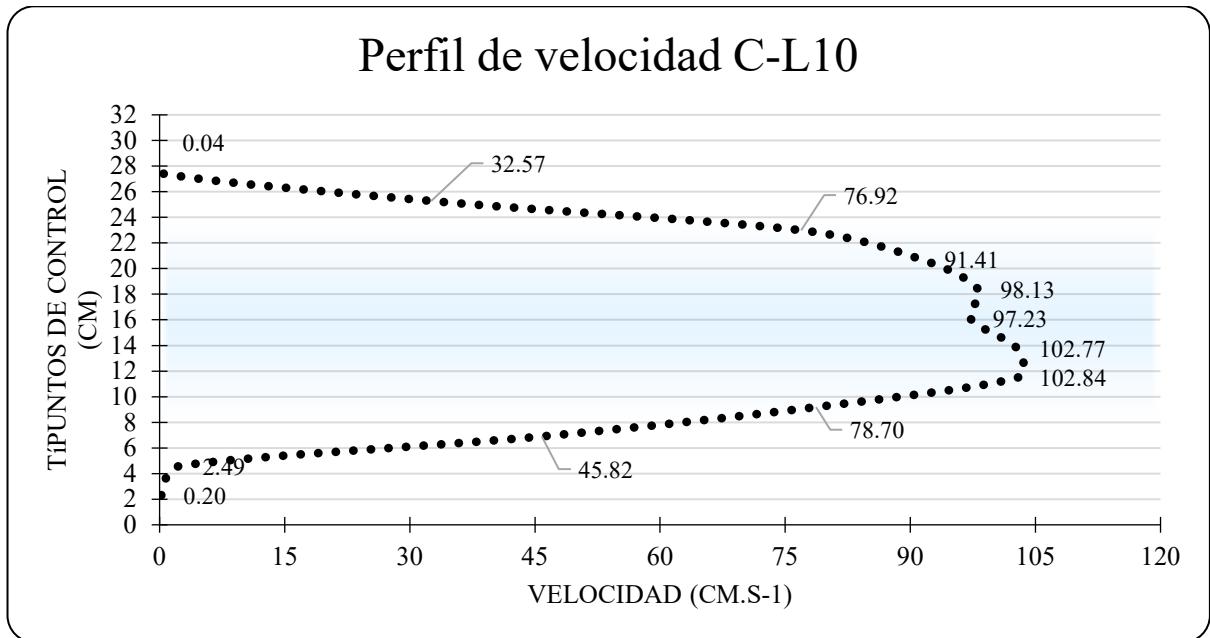
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 54.17 cm/s un área de 216.3 cm² y un caudal de 11717.13 cm³/s.

Tabla 20

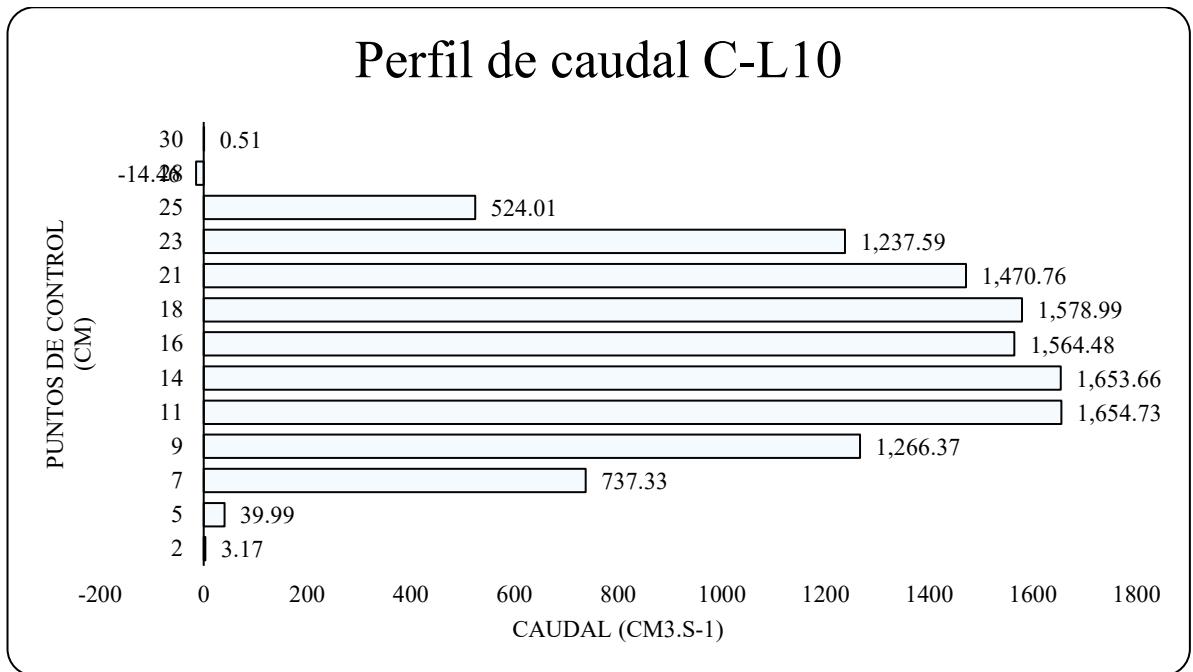
Resumen (método de la sección media) Canal C-L10

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
2.30	2.30	7.00	16.09	0.20	3.17 0.00
4.60	2.30	7.00	16.09	2.49	39.99 0.04
6.90	2.30	7.00	16.09	45.82	737.33 0.74
9.19	2.30	7.00	16.09	78.70	1,266.37 1.27
11.49	2.30	7.00	16.09	102.84	1,654.73 1.66
13.79	2.30	7.00	16.09	102.77	1,653.66 1.65
16.09	2.30	7.00	16.09	97.23	1,564.48 1.56
18.39	2.30	7.00	16.09	98.13	1,578.99 1.58
20.69	2.30	7.00	16.09	91.41	1,470.76 1.47
22.99	2.30	7.00	16.09	76.92	1,237.59 1.24
25.28	2.30	7.00	16.09	32.57	524.01 0.52
27.58	2.30	7.00	16.09	-0.90	-14.46 -0.01
29.88	1.71	7.00	11.96	0.04	0.51 0.00
Caudal Total				11,717.13	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 59*Gráfico perfil de velocidad canal C-L10*

Nota: Elaboración propia

Figura 60*Gráfico perfil de caudal canal C-L10*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-H09**

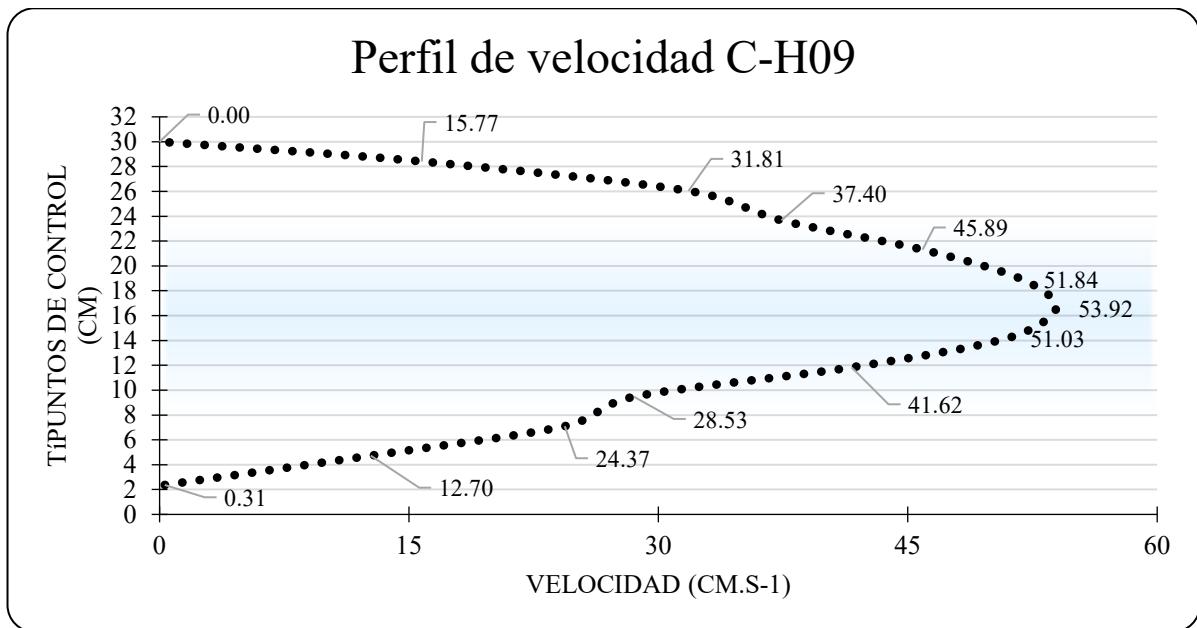
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 31.08 cm/s un área de 388.7 cm² y un caudal de 12082.26 cm³/s.

Tabla 21

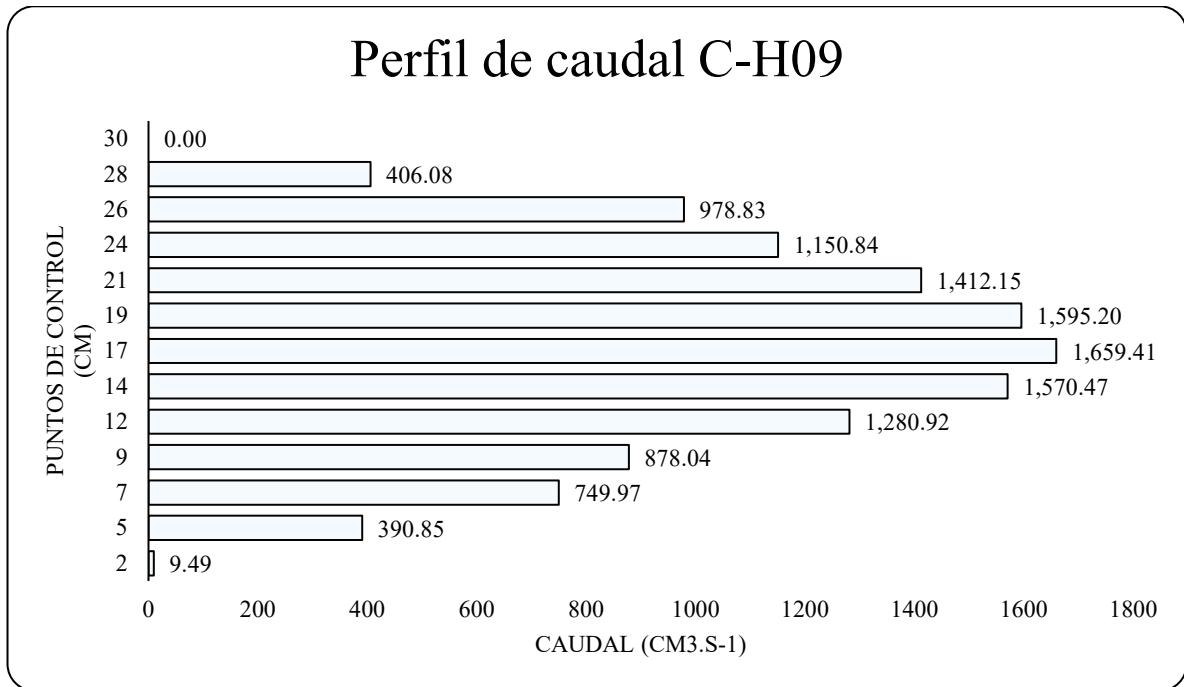
Resumen (método de la sección media) Canal C-H09

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm²	Velocidad cm. s⁻¹	Caudal cm³.s⁻¹ l.s⁻¹	
2.37	2.37	13.00	30.77	0.31	9.49	0.01
4.73	2.37	13.00	30.77	12.70	390.85	0.39
7.10	2.37	13.00	30.77	24.37	749.97	0.75
9.47	2.37	13.00	30.77	28.53	878.04	0.88
11.84	2.37	13.00	30.77	41.62	1,280.92	1.28
14.20	2.37	13.00	30.77	51.03	1,570.47	1.57
16.57	2.37	13.00	30.77	53.92	1,659.41	1.66
18.94	2.37	13.00	30.77	51.84	1,595.20	1.60
21.31	2.37	13.00	30.77	45.89	1,412.15	1.41
23.67	2.37	13.00	30.77	37.40	1,150.84	1.15
26.04	2.37	13.00	30.77	31.81	978.83	0.98
28.41	1.98	13.00	25.74	15.77	406.08	0.41
30.00	1.59	13.00	25.74	0.00	0.00	0.00
				Caudal Total	# #####	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 61*Gráfico perfil de velocidad canal C-H09*

Nota: Elaboración propia

Figura 62*Gráfico perfil de caudal canal C-H09*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-H08***

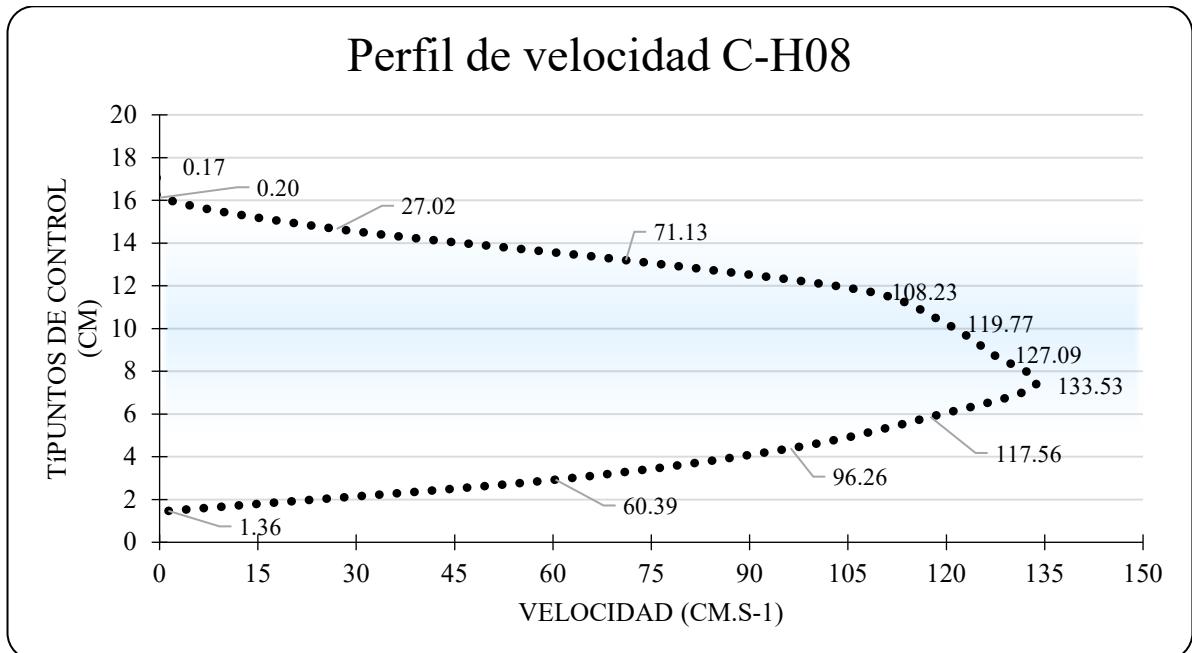
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 70.43 cm/s un área de 89.5 cm² y un caudal de 6324.69 cm³/s.

Tabla 22

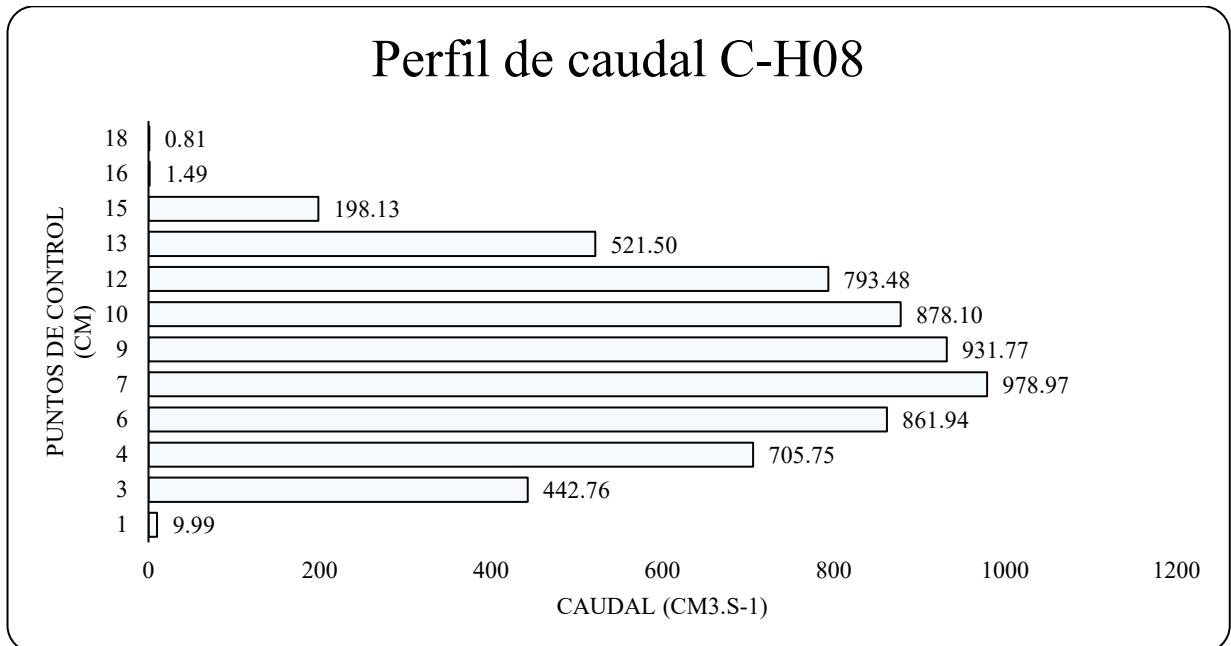
Resumen (método de la sección media) Canal C-H08

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
1.47	1.47	5.00	7.33	1.36	9.99	0.01
2.93	1.47	5.00	7.33	60.39	442.76	0.44
4.40	1.47	5.00	7.33	96.26	705.75	0.71
5.87	1.47	5.00	7.33	117.56	861.94	0.86
7.33	1.47	5.00	7.33	133.53	978.97	0.98
8.80	1.47	5.00	7.33	127.09	931.77	0.93
10.26	1.47	5.00	7.33	119.77	878.10	0.88
11.73	1.47	5.00	7.33	108.23	793.48	0.79
13.20	1.47	5.00	7.33	71.13	521.50	0.52
14.66	1.47	5.00	7.33	27.02	198.13	0.20
16.13	1.47	5.00	7.33	0.20	1.49	0.00
17.60	0.94	5.00	4.68	0.17	0.81	0.00
Caudal Total				6,324.69	cm ³ .s ⁻¹	

Nota: Elaboración Propia

Figura 63*Gráfico perfil de velocidad canal C-H08*

Nota: Elaboración propia

Figura 64*Gráfico perfil de caudal canal C-H08*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-H07***

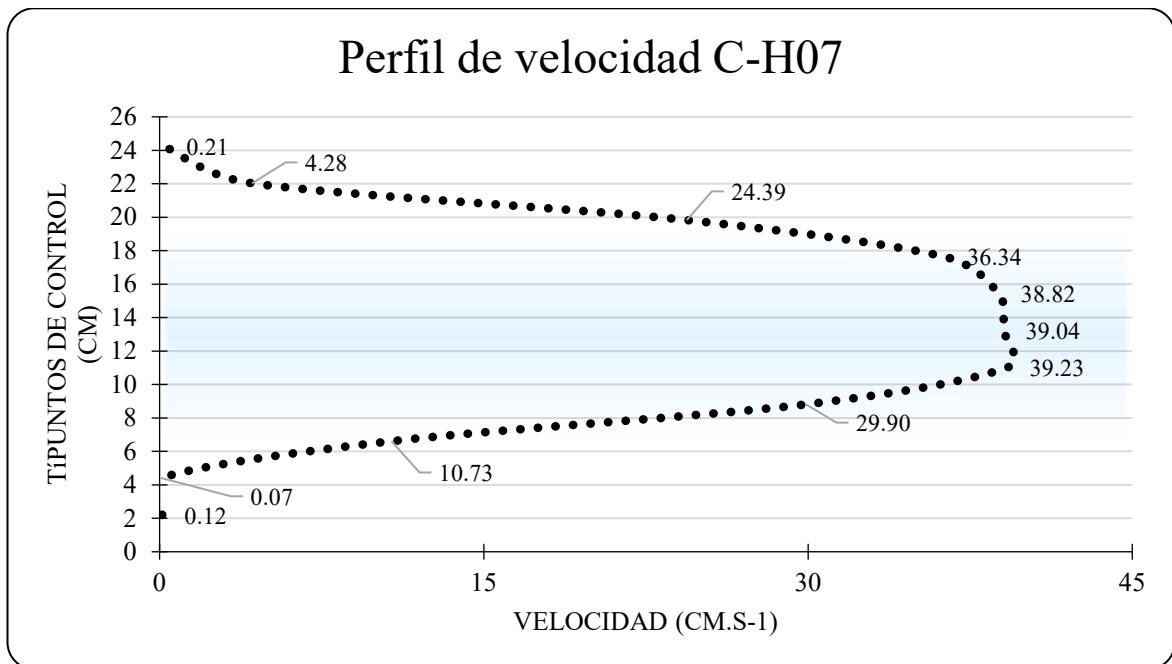
En este canal se tuvo un video 20 segundos a 120fps, donde se procesaron 15 segundos, es decir se procesaron 1800 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 20.14 cm/s un área de 256.2 cm² y un caudal de 5160.17 cm³/s.

Tabla 23

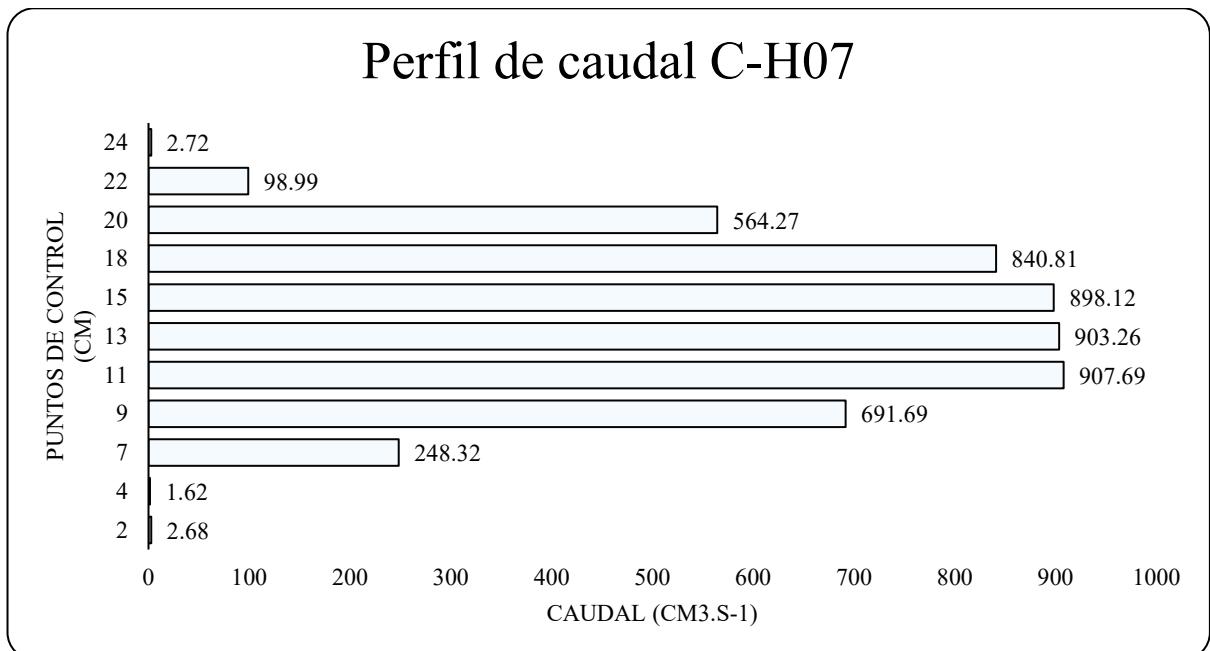
Resumen (método de la sección media) Canal C-H07

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	l.s ⁻¹
2.20	2.20	10.50	23.14	0.12	2.68	0.00
4.41	2.20	10.50	23.14	0.07	1.62	0.00
6.61	2.20	10.50	23.14	10.73	248.32	0.25
8.81	2.20	10.50	23.14	29.90	691.69	0.69
11.02	2.20	10.50	23.14	39.23	907.69	0.91
13.22	2.20	10.50	23.14	39.04	903.26	0.90
15.42	2.20	10.50	23.14	38.82	898.12	0.90
17.63	2.20	10.50	23.14	36.34	840.81	0.84
19.83	2.20	10.50	23.14	24.39	564.27	0.56
22.03	2.20	10.50	23.14	4.28	98.99	0.10
24.24	1.23	10.50	12.94	0.21	2.72	0.00
Caudal Total				5,160.17	cm ³ .s ⁻¹	

Nota: Elaboración Propia

Figura 65*Gráfico perfil de velocidad canal C-H07*

Nota: Elaboración propia

Figura 66*Gráfico perfil de caudal canal C-H07*

Nota: Elaboración propia

○ ***LSPIV Canal C-H06***

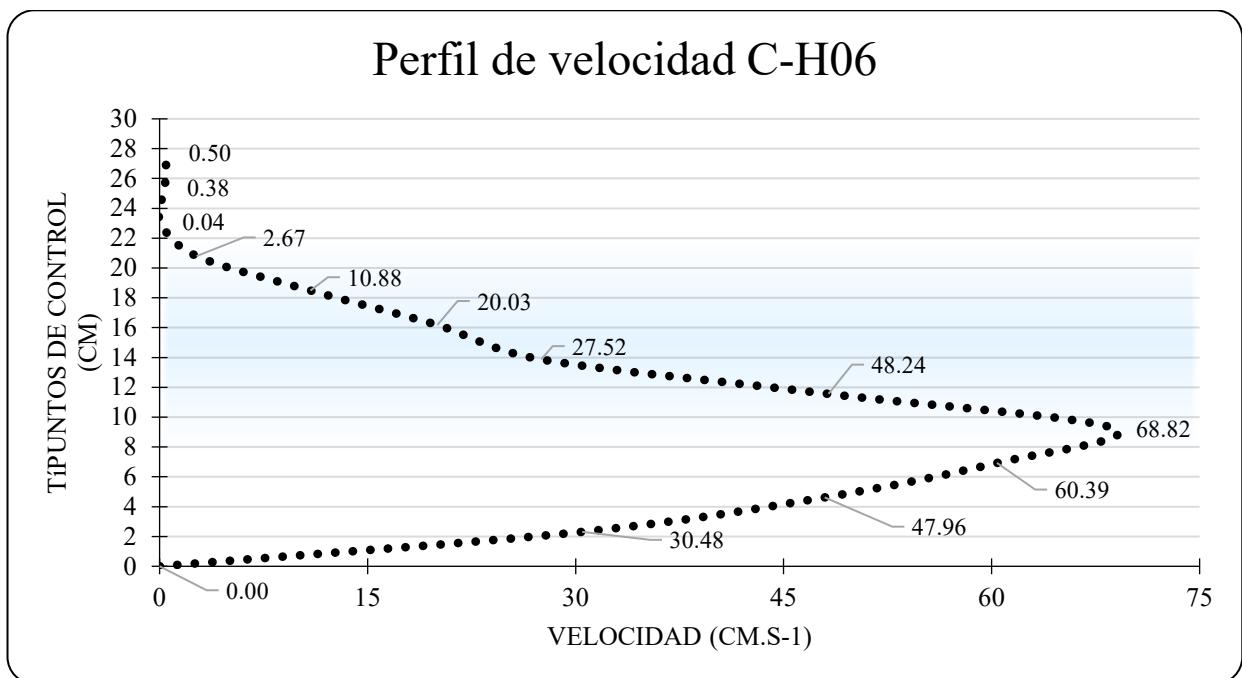
En este canal se tuvo un video 20 segundos a 120fps, donde se procesaron 15 segundos, es decir se procesaron 1800 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 24.44 cm/s un área de 299 cm² y un caudal de 7348.97 cm³/s.

Tabla 24

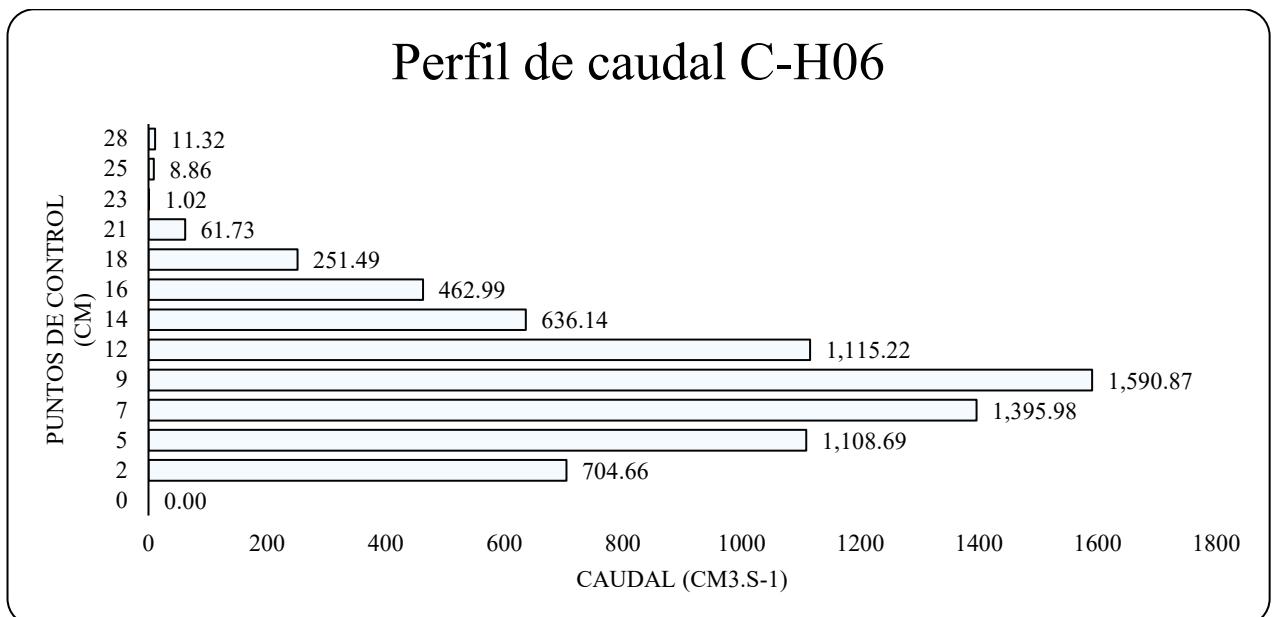
Resumen (método de la sección media) Canal C-H06

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm.s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
0.00	2.31	10.00	23.12	0.00	0.00
2.31	2.31	10.00	23.12	30.48	704.66
4.62	2.31	10.00	23.12	47.96	1,108.69
6.93	2.31	10.00	23.12	60.39	1,395.98
9.25	2.31	10.00	23.12	68.82	1,590.87
11.56	2.31	10.00	23.12	48.24	1,115.22
13.87	2.31	10.00	23.12	27.52	636.14
16.18	2.31	10.00	23.12	20.03	462.99
18.49	2.31	10.00	23.12	10.88	251.49
20.80	2.31	10.00	23.12	2.67	61.73
23.12	2.31	10.00	23.12	0.04	1.02
25.43	2.31	10.00	23.12	0.38	8.86
27.74	2.29	10.00	22.86	0.50	11.32
Caudal Total				7,348.97	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 67*Gráfico perfil de velocidad canal C-H06*

Nota: Elaboración propia

Figura 68*Gráfico perfil de caudal canal C-H06*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L08**

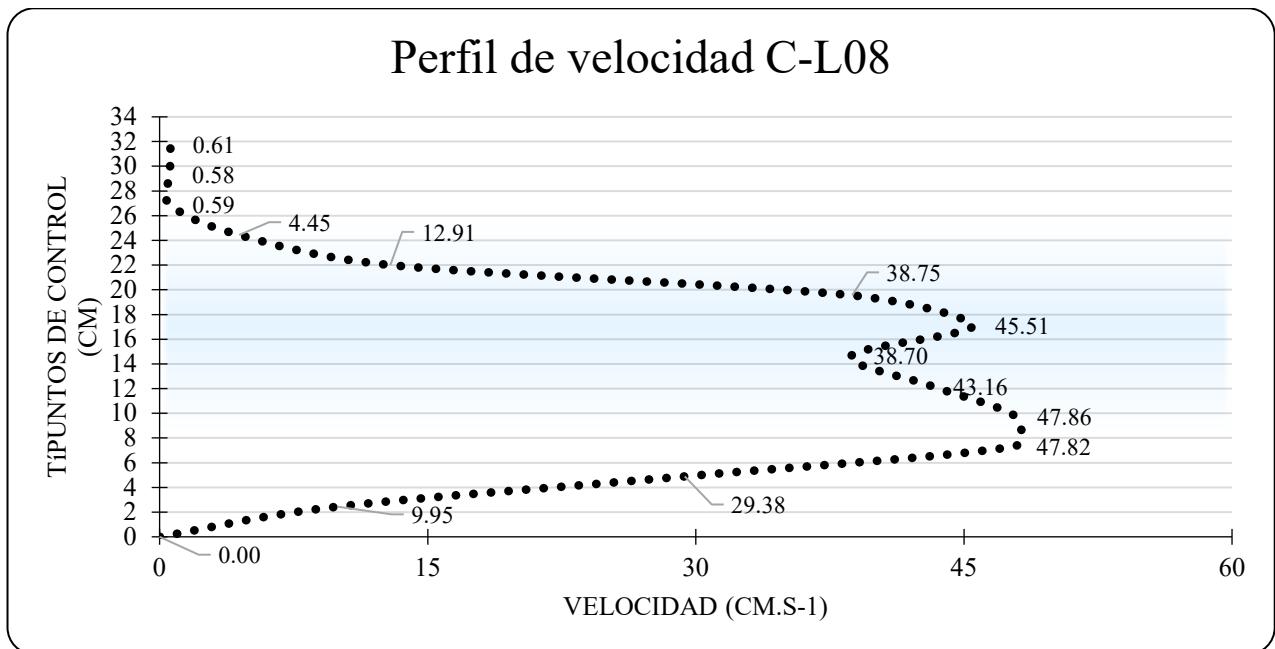
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 22.16 cm/s un área de 139.6 cm² y un caudal de 3130.85 cm³/s.

Tabla 25

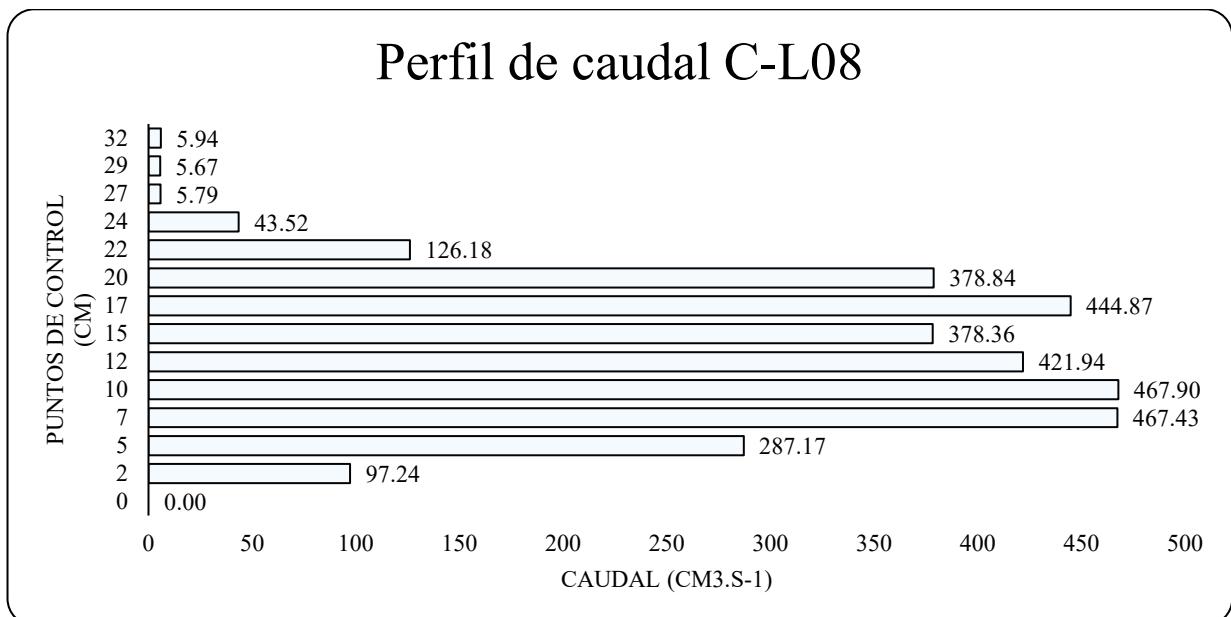
Resumen (método de la sección media) Canal C-L08

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
0.00	2.44	4.00	9.78	0.00	0.00	0.00
2.44	2.44	4.00	9.78	9.95	97.24	0.10
4.89	2.44	4.00	9.78	29.38	287.17	0.29
7.33	2.44	4.00	9.78	47.82	467.43	0.47
9.78	2.44	4.00	9.78	47.86	467.90	0.47
12.22	2.44	4.00	9.78	43.16	421.94	0.42
14.66	2.44	4.00	9.78	38.70	378.36	0.38
17.11	2.44	4.00	9.78	45.51	444.87	0.44
19.55	2.44	4.00	9.78	38.75	378.84	0.38
22.00	2.44	4.00	9.78	12.91	126.18	0.13
24.44	2.44	4.00	9.78	4.45	43.52	0.04
26.88	2.44	4.00	9.78	0.59	5.79	0.01
29.33	2.44	4.00	9.78	0.58	5.67	0.01
31.77	2.44	4.00	9.78	0.61	5.94	0.01
Caudal Total				3,130.85	cm ³ .s ⁻¹	

Nota: Elaboración Propia

Figura 69*Gráfico perfil de velocidad canal C-L08*

Nota: Elaboración propia

Figura 70*Gráfico perfil de caudal canal C-L08*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L07**

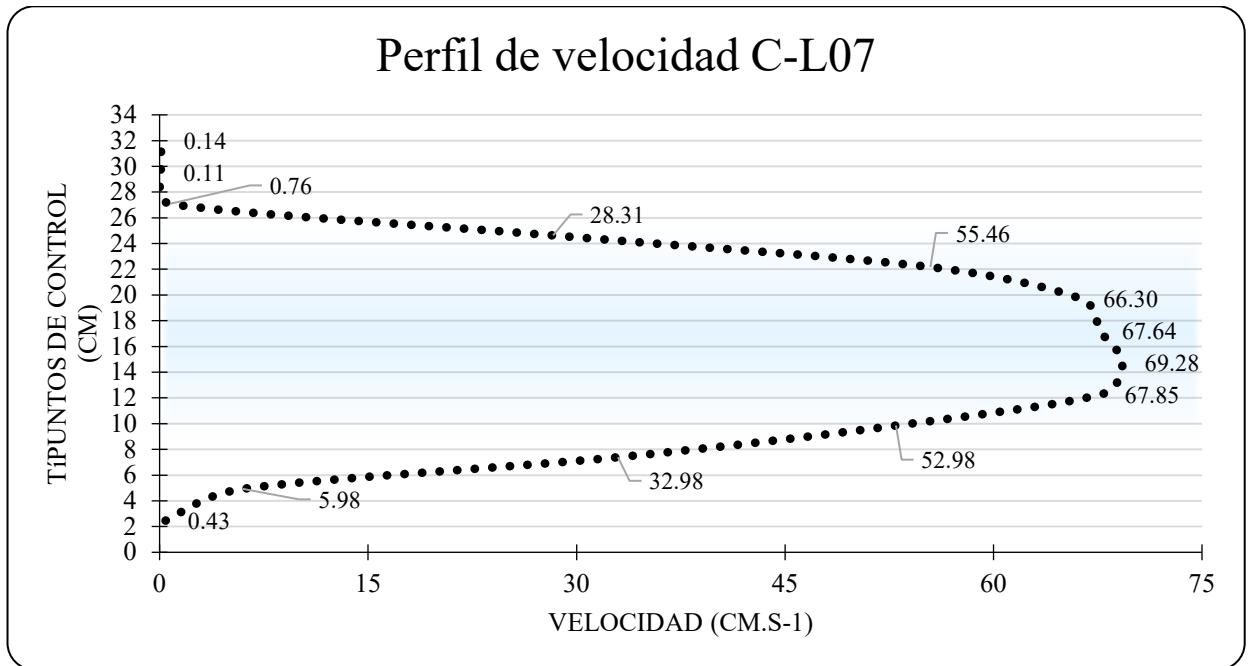
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 32.47 cm/s un área de 135.6 cm² y un caudal de 4415.5 cm³/s.

Tabla 26

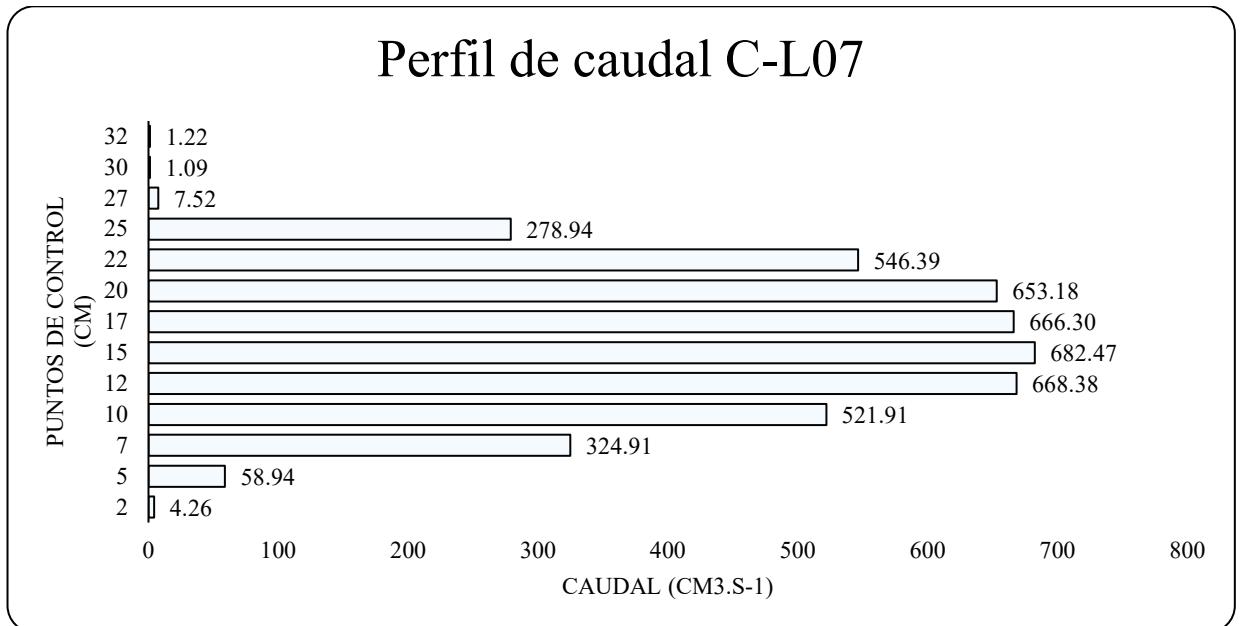
Resumen (método de la sección media) Canal C-L07

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.46	2.46	4.00	9.85	0.43	4.26	0.00
4.93	2.46	4.00	9.85	5.98	58.94	0.06
7.39	2.46	4.00	9.85	32.98	324.91	0.32
9.85	2.46	4.00	9.85	52.98	521.91	0.52
12.31	2.46	4.00	9.85	67.85	668.38	0.67
14.78	2.46	4.00	9.85	69.28	682.47	0.68
17.24	2.46	4.00	9.85	67.64	666.30	0.67
19.70	2.46	4.00	9.85	66.30	653.18	0.65
22.17	2.46	4.00	9.85	55.46	546.39	0.55
24.63	2.46	4.00	9.85	28.31	278.94	0.28
27.09	2.46	4.00	9.85	0.76	7.52	0.01
29.55	2.46	4.00	9.85	0.11	1.09	0.00
32.02	2.22	4.00	8.89	0.14	1.22	0.00
Caudal Total				4,415.51	cm ³ .s ⁻¹	

Nota: Elaboración Propia

Figura 71*Gráfico perfil de velocidad canal C-L07*

Nota: Elaboración propia

Figura 72*Gráfico perfil de caudal canal C-L07*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L06**

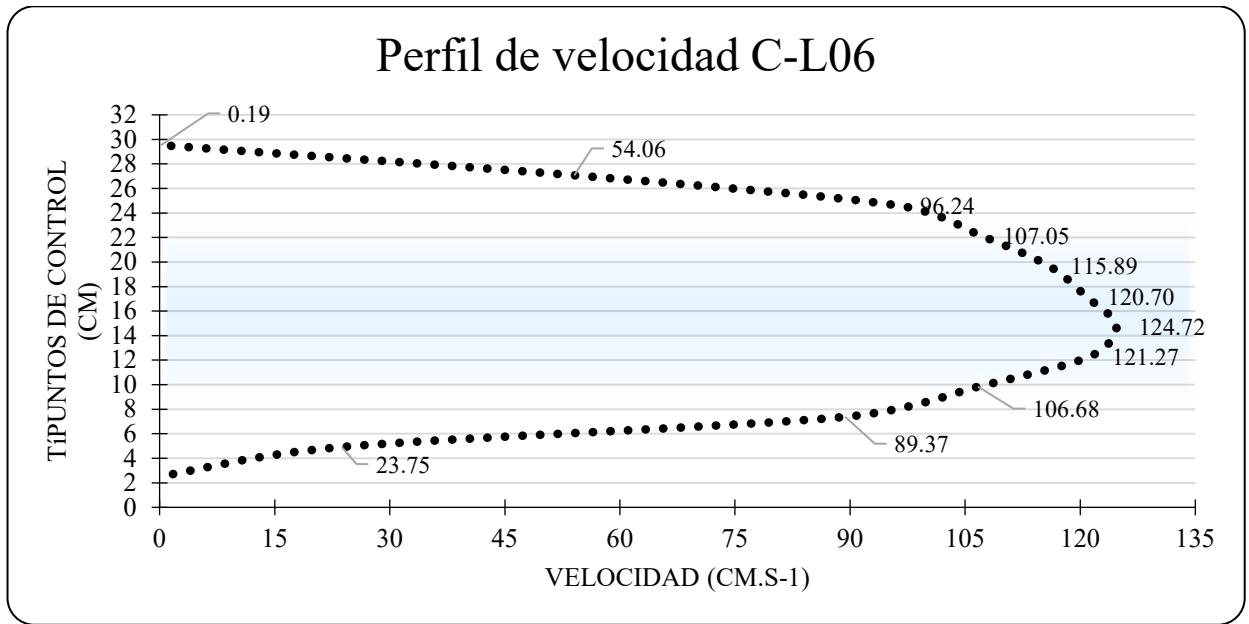
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 30 segundos, es decir se procesaron 3600 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 78.96 cm/s un área de 149.5 cm² y un caudal de 11803.79 cm³/s.

Tabla 27

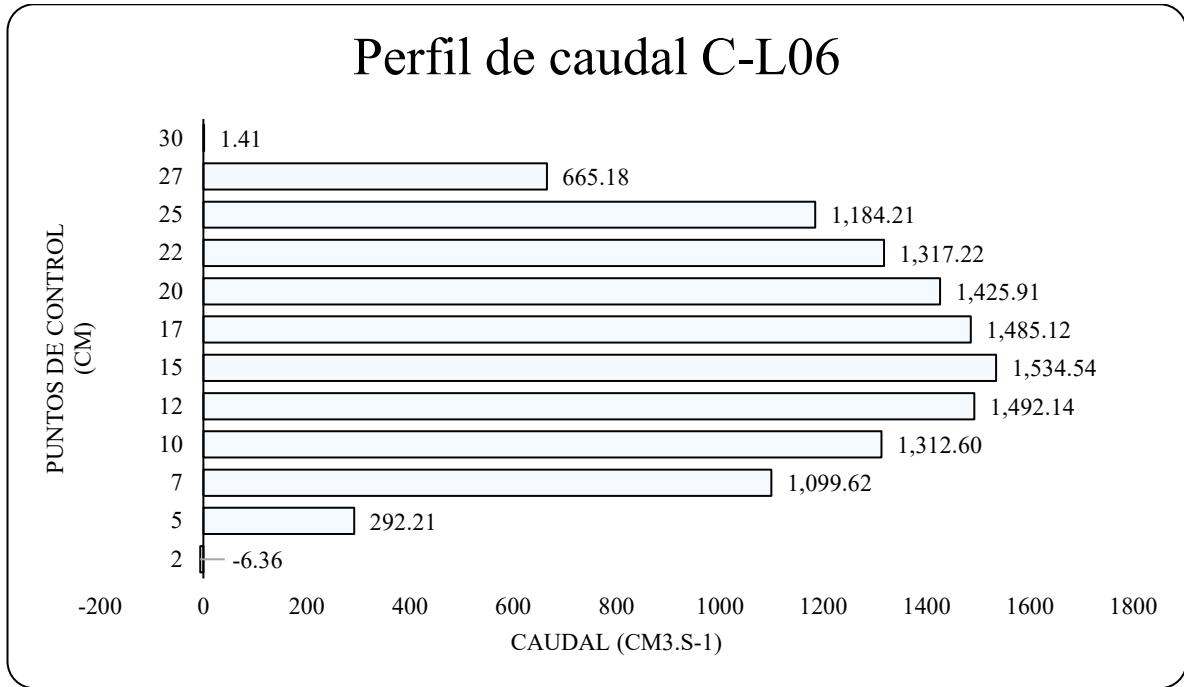
Resumen (método de la sección media) Canal C-L06

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.46	2.46	5.00	12.30	-0.52	-6.36	-0.01
4.92	2.46	5.00	12.30	23.75	292.21	0.29
7.38	2.46	5.00	12.30	89.37	1,099.62	1.10
9.84	2.46	5.00	12.30	106.68	1,312.60	1.31
12.30	2.46	5.00	12.30	121.27	1,492.14	1.49
14.77	2.46	5.00	12.30	124.72	1,534.54	1.54
17.23	2.46	5.00	12.30	120.70	1,485.12	1.49
19.69	2.46	5.00	12.30	115.89	1,425.91	1.43
22.15	2.46	5.00	12.30	107.05	1,317.22	1.32
24.61	2.46	5.00	12.30	96.24	1,184.21	1.18
27.07	2.46	5.00	12.30	54.06	665.18	0.67
29.53	1.47	5.00	7.33	0.19	1.41	0.00
Caudal Total					11,803.80	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 73*Gráfico perfil de velocidad canal C-L06*

Nota: Elaboración propia

Figura 74*Gráfico perfil de caudal canal C-L06*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-L05***

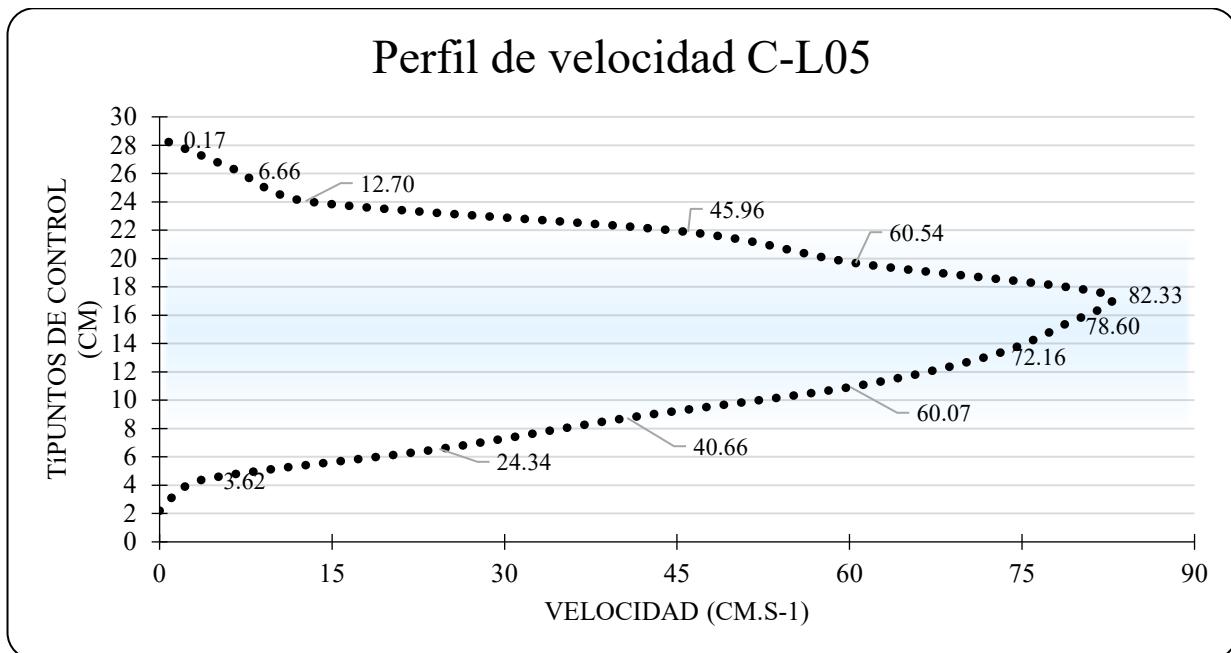
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 30 segundos, es decir se procesaron 3600 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 35.67 cm/s un área de 134.55 cm² y un caudal de 4799.88 cm³/s.

Tabla 28

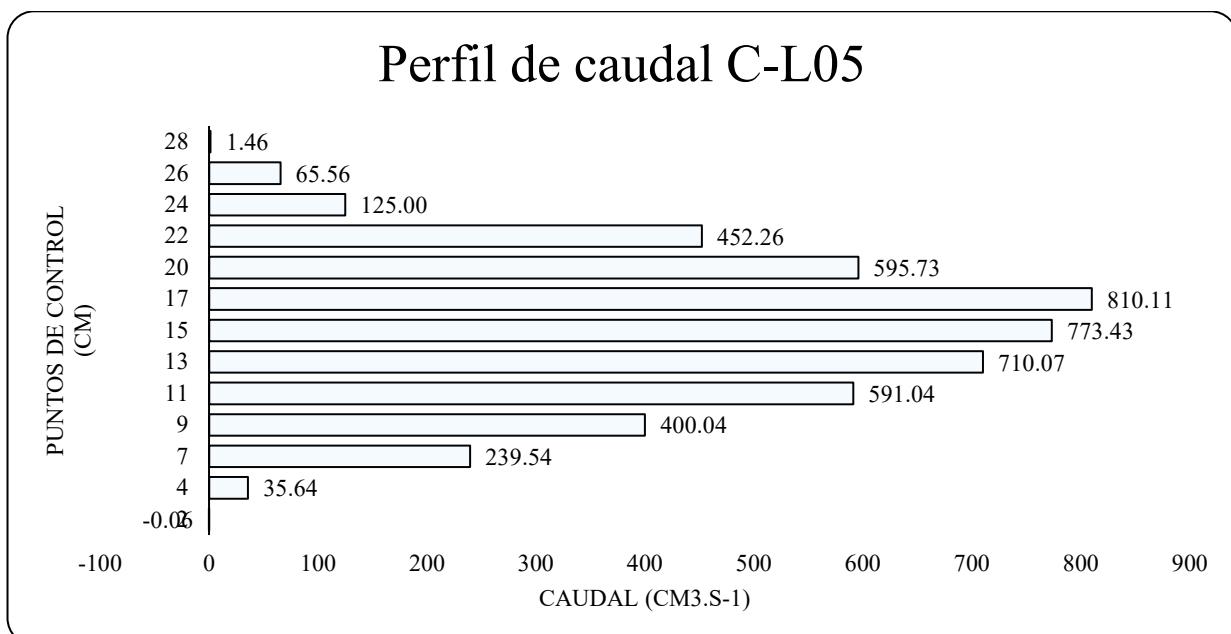
Resumen (método de la sección media) Canal C-L05

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
2.19	2.19	4.50	9.84	-0.01	-0.06 0.00
4.37	2.19	4.50	9.84	3.62	35.64 0.04
6.56	2.19	4.50	9.84	24.34	239.54 0.24
8.75	2.19	4.50	9.84	40.66	400.04 0.40
10.93	2.19	4.50	9.84	60.07	591.04 0.59
13.12	2.19	4.50	9.84	72.16	710.07 0.71
15.31	2.19	4.50	9.84	78.60	773.43 0.77
17.49	2.19	4.50	9.84	82.33	810.11 0.81
19.68	2.19	4.50	9.84	60.54	595.73 0.60
21.87	2.19	4.50	9.84	45.96	452.26 0.45
24.05	2.19	4.50	9.84	12.70	125.00 0.13
26.24	2.19	4.50	9.84	6.66	65.56 0.07
28.43	1.88	4.50	8.46	0.17	1.46 0.00
Caudal Total				4,799.88	Cm ³ /s

Nota: Elaboración Propia

Figura 75*Gráfico perfil de velocidad canal C-L05*

Nota: Elaboración propia

Figura 76*Gráfico perfil de caudal canal C-L05*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L04**

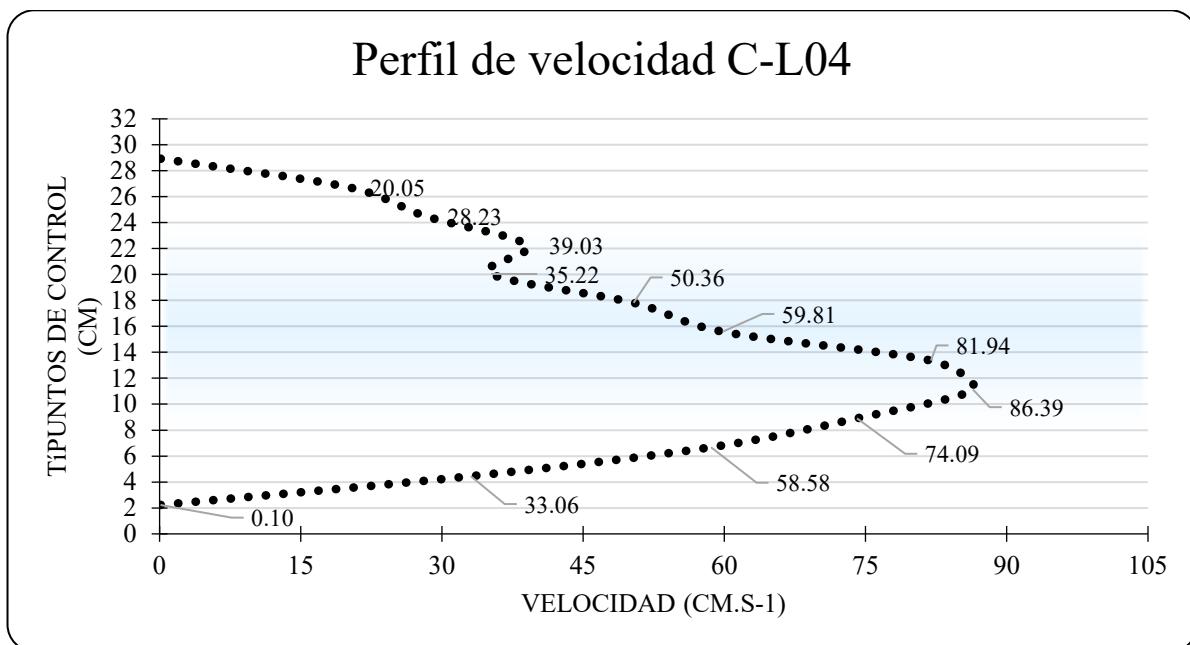
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 30 segundos, es decir se procesaron 3600 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 43.68 cm/s un área de 115.6 cm² y un caudal de 5049.67 cm³/s.

Tabla 29

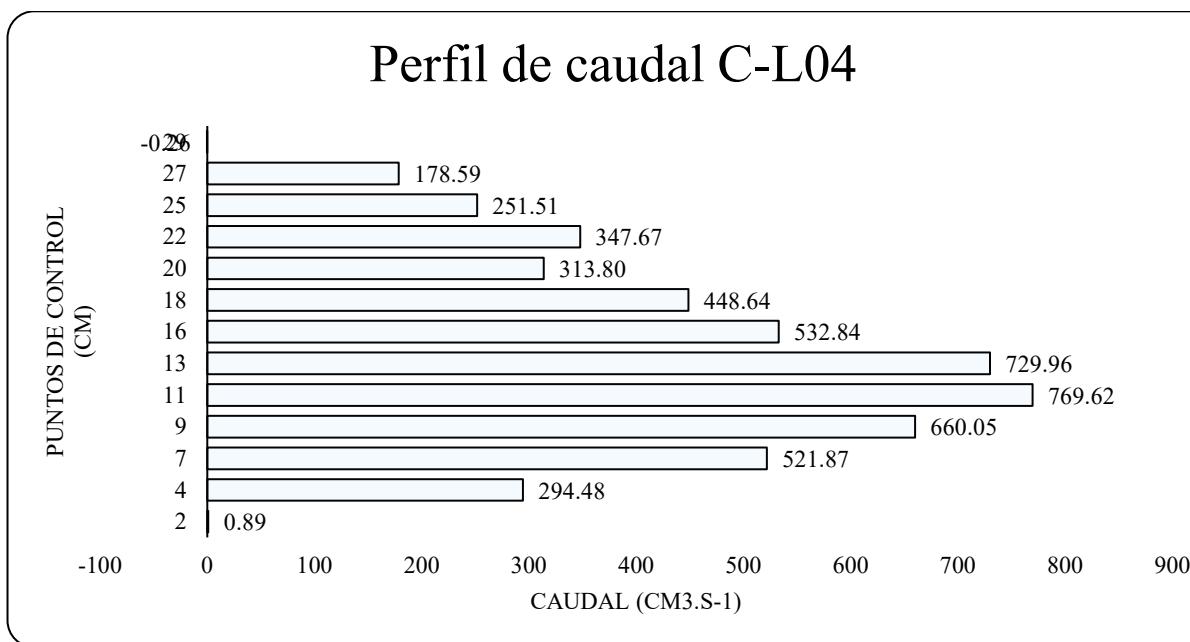
Resumen (método de la sección media) Canal C-L04

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.23	2.23	4.00	8.91	0.10	0.89	0.00
4.45	2.23	4.00	8.91	33.06	294.48	0.29
6.68	2.23	4.00	8.91	58.58	521.87	0.52
8.91	2.23	4.00	8.91	74.09	660.05	0.66
11.14	2.23	4.00	8.91	86.39	769.62	0.77
13.36	2.23	4.00	8.91	81.94	729.96	0.73
15.59	2.23	4.00	8.91	59.81	532.84	0.53
17.82	2.23	4.00	8.91	50.36	448.64	0.45
20.04	2.23	4.00	8.91	35.22	313.80	0.31
22.27	2.23	4.00	8.91	39.03	347.67	0.35
24.50	2.23	4.00	8.91	28.23	251.51	0.25
26.73	2.23	4.00	8.91	20.05	178.59	0.18
28.95	1.14	1.89	2.15	-0.12	-0.26	0.00
Caudal Total					5,048.77	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 77*Gráfico perfil de velocidad canal C-L04*

Nota: Elaboración propia

Figura 78*Gráfico perfil de caudal canal C-L04*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-L03**

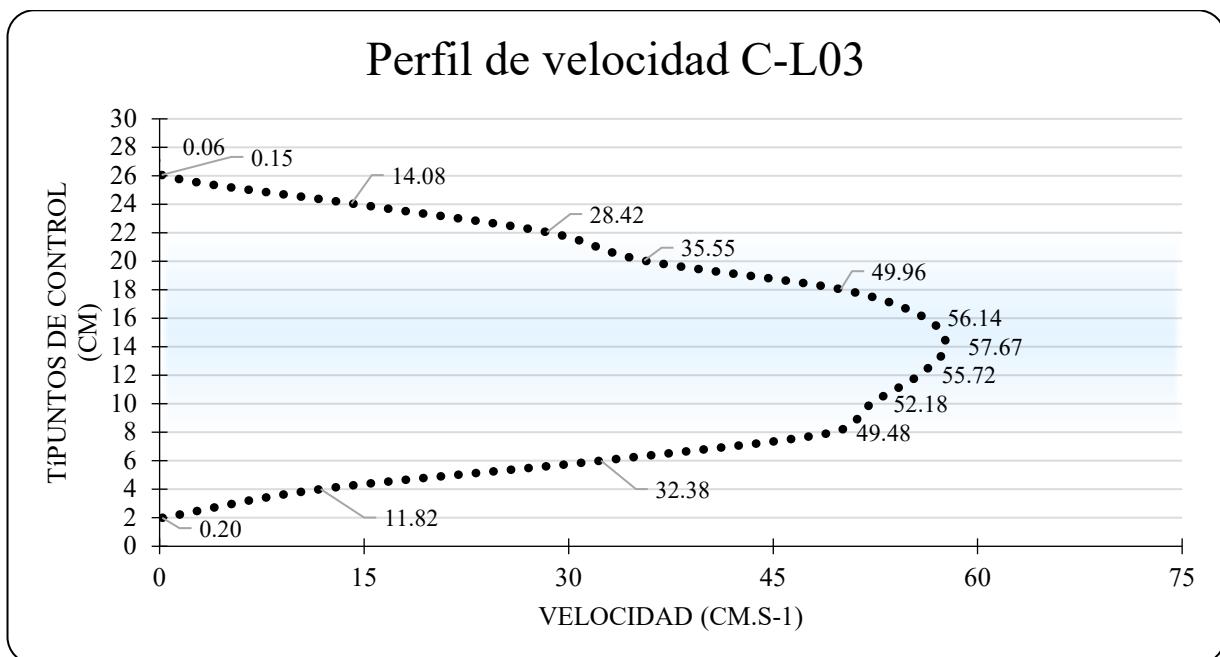
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 30 segundos, es decir se procesaron 3600 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 29.76 cm/s un área de 194.35 cm² y un caudal de 5783.74 cm³/s.

Tabla 30

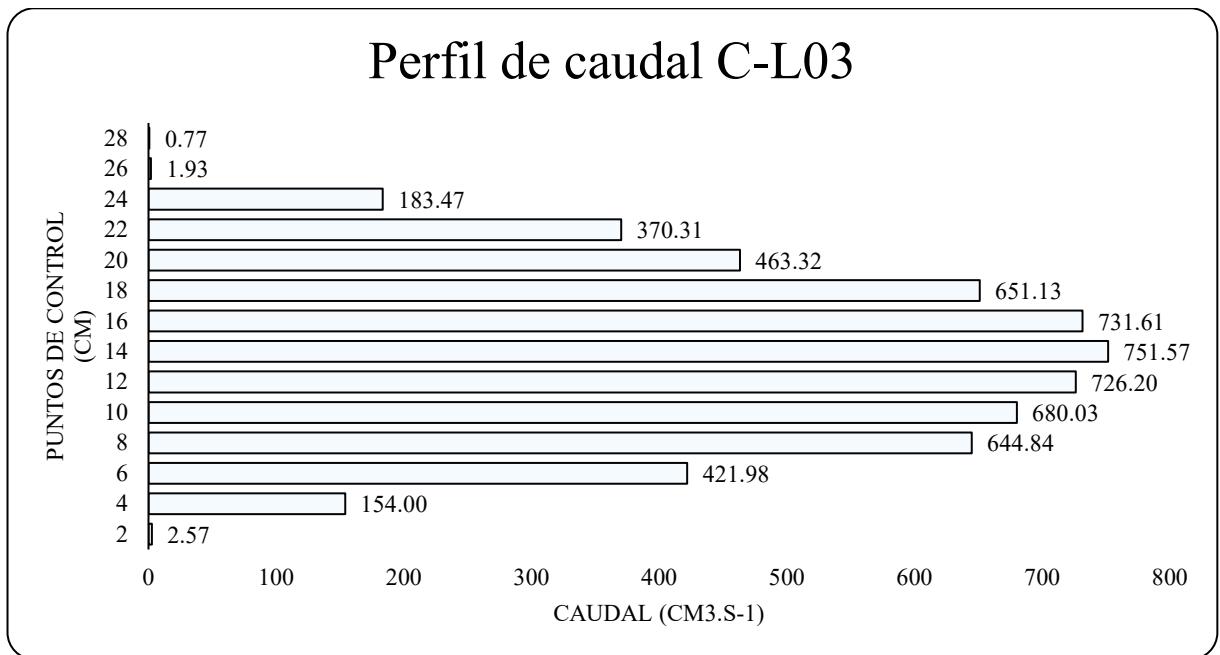
Resumen (método de la sección media) Canal C-L03

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.00	2.00	6.50	13.03	0.20	2.57	0.00
4.01	2.00	6.50	13.03	11.82	154.00	0.15
6.01	2.00	6.50	13.03	32.38	421.98	0.42
8.02	2.00	6.50	13.03	49.48	644.84	0.64
10.02	2.00	6.50	13.03	52.18	680.03	0.68
12.03	2.00	6.50	13.03	55.72	726.20	0.73
14.03	2.00	6.50	13.03	57.67	751.57	0.75
16.04	2.00	6.50	13.03	56.14	731.61	0.73
18.04	2.00	6.50	13.03	49.96	651.13	0.65
20.05	2.00	6.50	13.03	35.55	463.32	0.46
22.05	2.00	6.50	13.03	28.42	370.31	0.37
24.06	2.00	6.50	13.03	14.08	183.47	0.18
26.06	2.00	6.50	13.03	0.15	1.93	0.00
28.07	1.97	6.50	12.79	0.06	0.77	0.00
Caudal Total				5,783.73	cm ³ .s ⁻¹	

Nota: Elaboración Propia

Figura 79*Gráfico perfil de velocidad canal C-L03*

Nota: Elaboración propia

Figura 80*Gráfico perfil de caudal canal C-L03*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-H04**

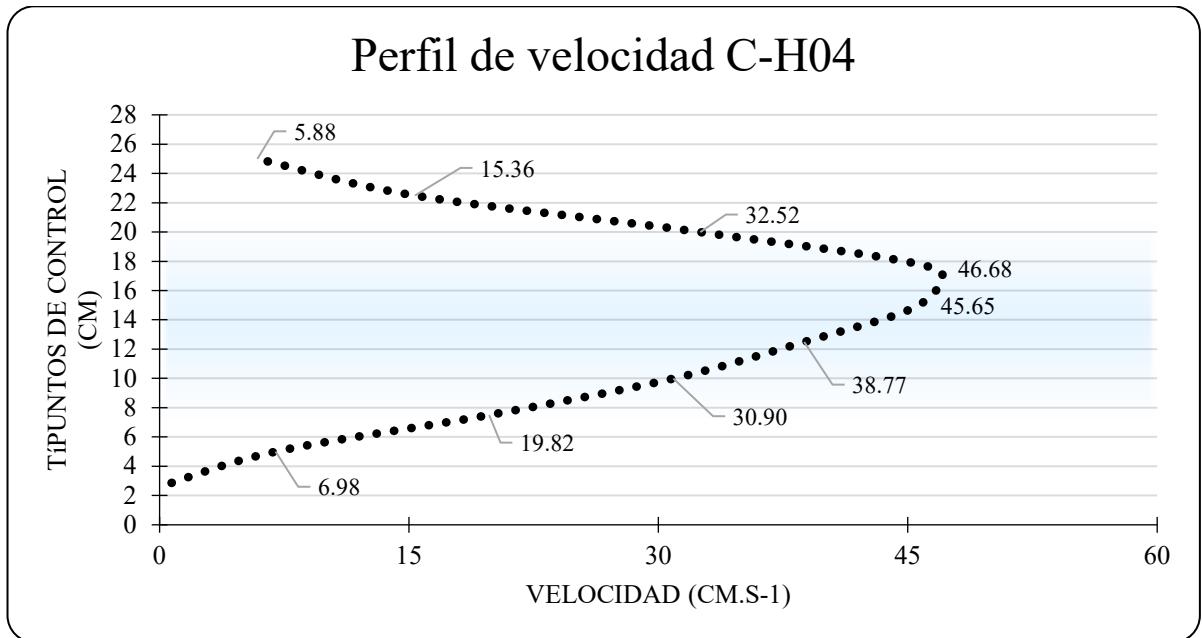
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 23.76 cm/s un área de 224.1 cm² y un caudal de 5325.34 cm³/s.

Tabla 31

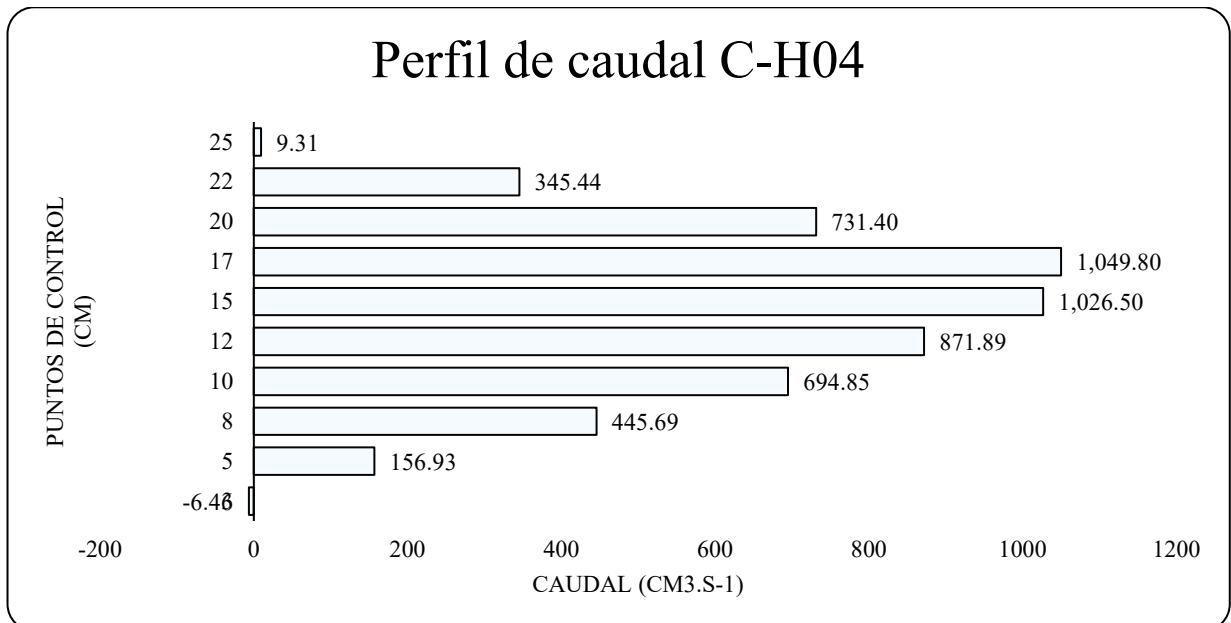
Resumen (método de la sección media) Canal C-H04

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.50	2.50	9.00	22.49	-0.29	-6.46	-0.01
5.00	2.50	9.00	22.49	6.98	156.93	0.16
7.50	2.50	9.00	22.49	19.82	445.69	0.45
9.99	2.50	9.00	22.49	30.90	694.85	0.69
12.49	2.50	9.00	22.49	38.77	871.89	0.87
14.99	2.50	9.00	22.49	45.65	1,026.50	1.03
17.49	2.50	9.00	22.49	46.68	1,049.80	1.05
19.99	2.50	9.00	22.49	32.52	731.40	0.73
22.49	2.50	9.00	22.49	15.36	345.44	0.35
24.99	1.26	1.26	1.58	5.88	9.31	0.01
Caudal Total					5,325.35	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 81*Gráfico perfil de velocidad canal C-H04*

Nota: Elaboración propia

Figura 82*Gráfico perfil de caudal canal C-H04*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-D02***

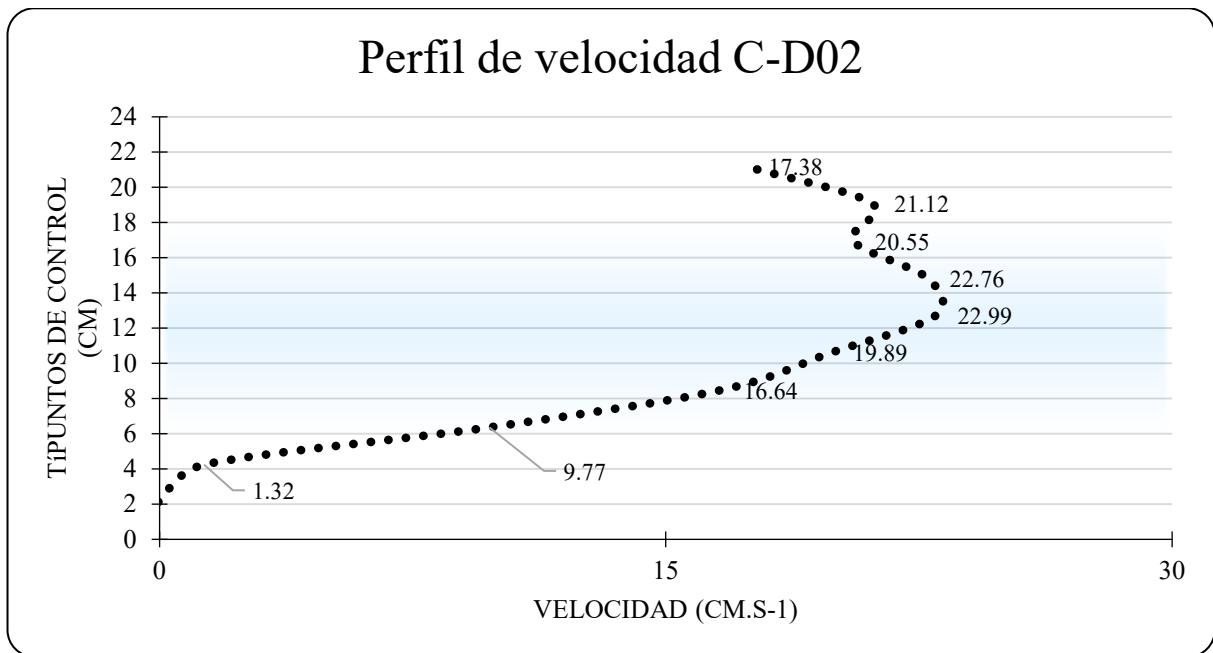
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 13.98 cm/s un área de 229 cm² y un caudal de 3201.9 cm³/s.

Tabla 32

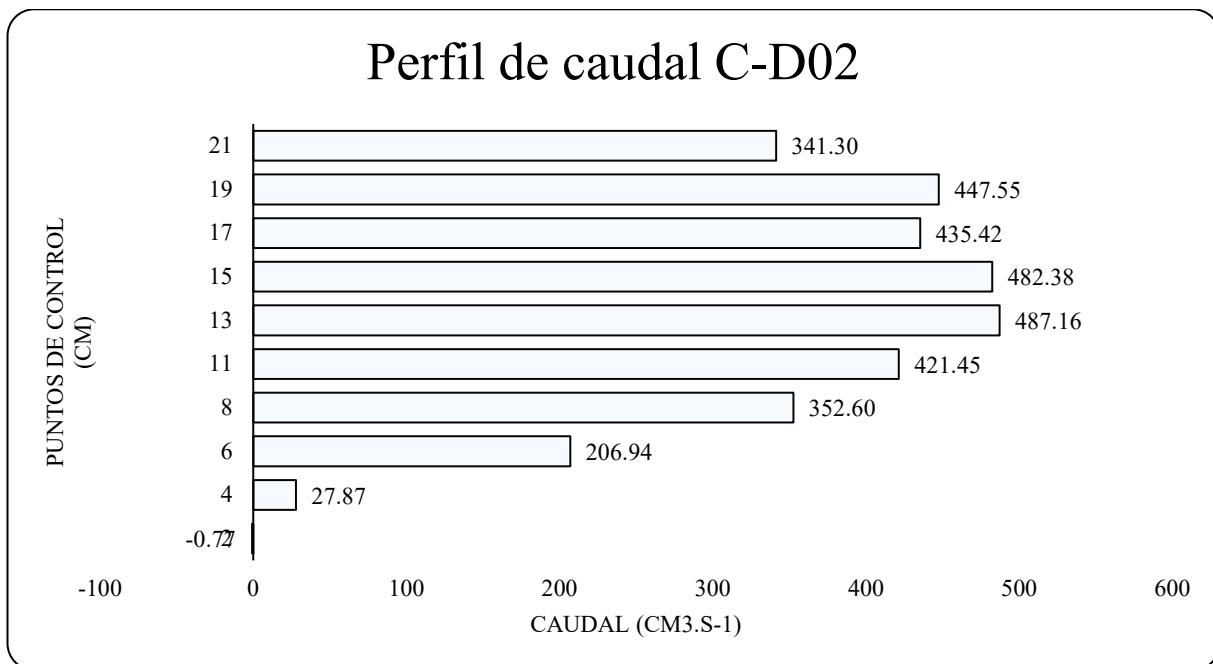
Resumen (método de la sección media) Canal C-D02

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
2.12	2.12	10.00	21.19	-0.04	-0.77	0.00
4.24	2.12	10.00	21.19	1.32	27.87	0.03
6.36	2.12	10.00	21.19	9.77	206.94	0.21
8.48	2.12	10.00	21.19	16.64	352.60	0.35
10.60	2.12	10.00	21.19	19.89	421.45	0.42
12.71	2.12	10.00	21.19	22.99	487.16	0.49
14.83	2.12	10.00	21.19	22.76	482.38	0.48
16.95	2.12	10.00	21.19	20.55	435.42	0.44
19.07	2.12	10.00	21.19	21.12	447.55	0.45
21.19	1.96	10.00	19.64	17.38	341.30	0.34
Caudal Total					3,201.90	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 83*Gráfico perfil de velocidad canal C-D02*

Nota: Elaboración propia

Figura 84*Gráfico perfil de caudal canal C-D02*

Nota: Elaboración propia

- ***LSPIV Canal C-D01***

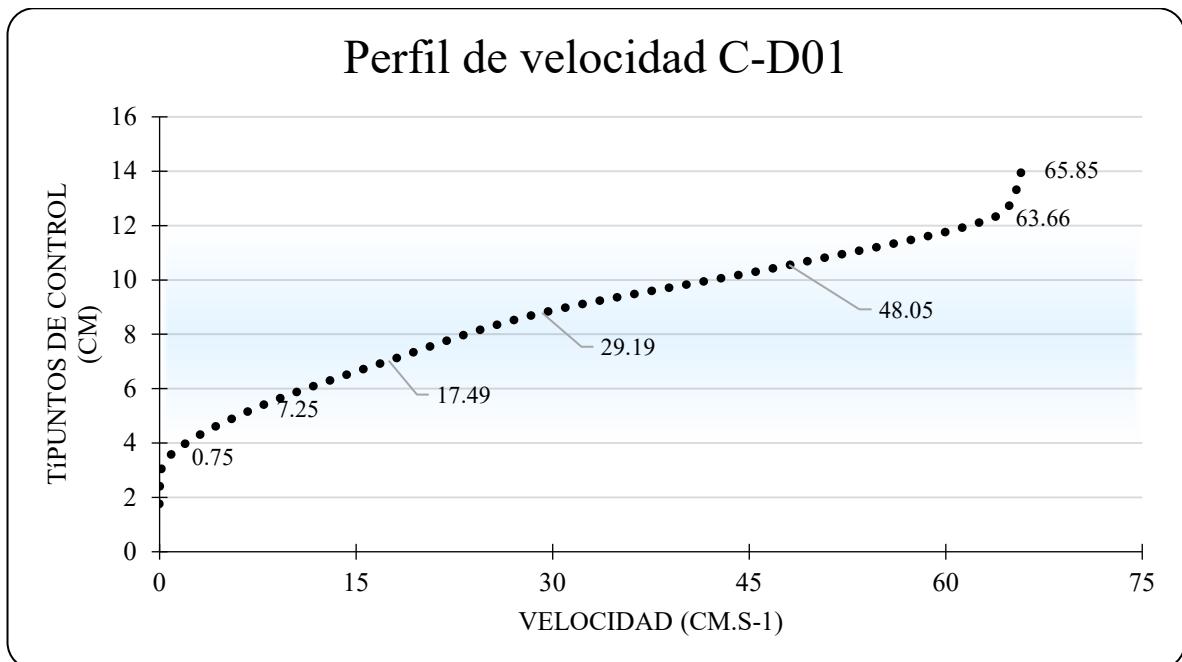
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 25.58 cm/s un área de 163.9 cm² y un caudal de 4193.28 cm³/s.

Tabla 33

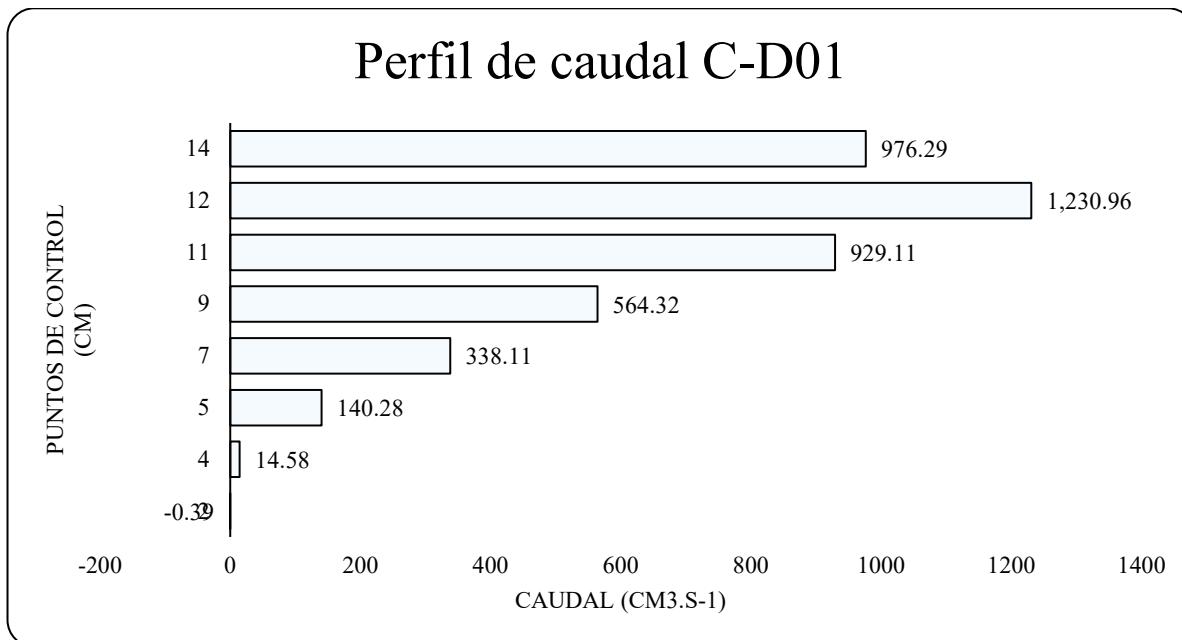
Resumen (método de la sección media) Canal C-D01

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹ l.s ⁻¹
1.76	1.76	11.00	19.34	-0.02	-0.39 0.00
3.52	1.76	11.00	19.34	0.75	14.58 0.01
5.27	1.76	11.00	19.34	7.25	140.28 0.14
7.03	1.76	11.00	19.34	17.49	338.11 0.34
8.79	1.76	11.00	19.34	29.19	564.32 0.56
10.55	1.76	11.00	19.34	48.05	929.11 0.93
12.30	1.76	11.00	19.34	63.66	1,230.96 1.23
14.06	1.35	11.00	14.83	65.85	976.29 0.98
Caudal Total				4,193.26	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 85*Gráfico perfil de velocidad canal C-D01*

Nota: Elaboración propia

Figura 86*Gráfico perfil de caudal canal C-D01*

Nota: Elaboración propia

- **LSPIV Canal C-H03**

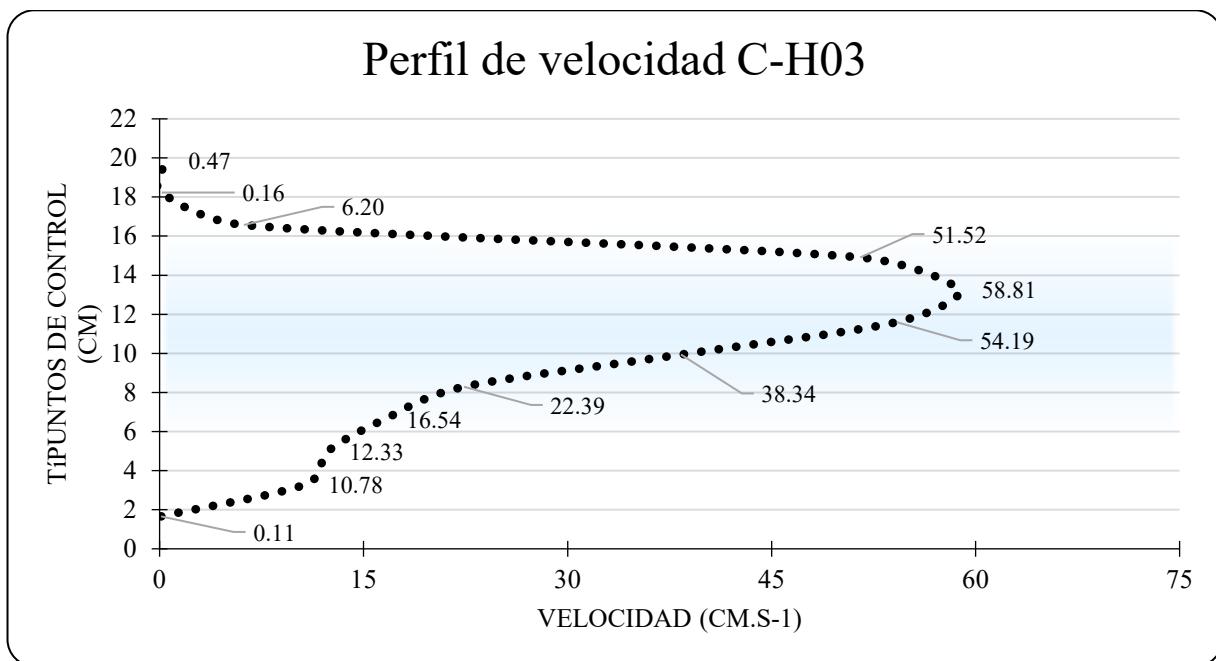
En este canal se tuvo un video 30 segundos a 120fps, donde se procesaron 20 segundos, es decir se procesaron 2400 imágenes en donde se obtuvo una velocidad media de 22.58 cm/s un área de 258.7 cm² y un caudal de 5850.7 cm³/s.

Tabla 34

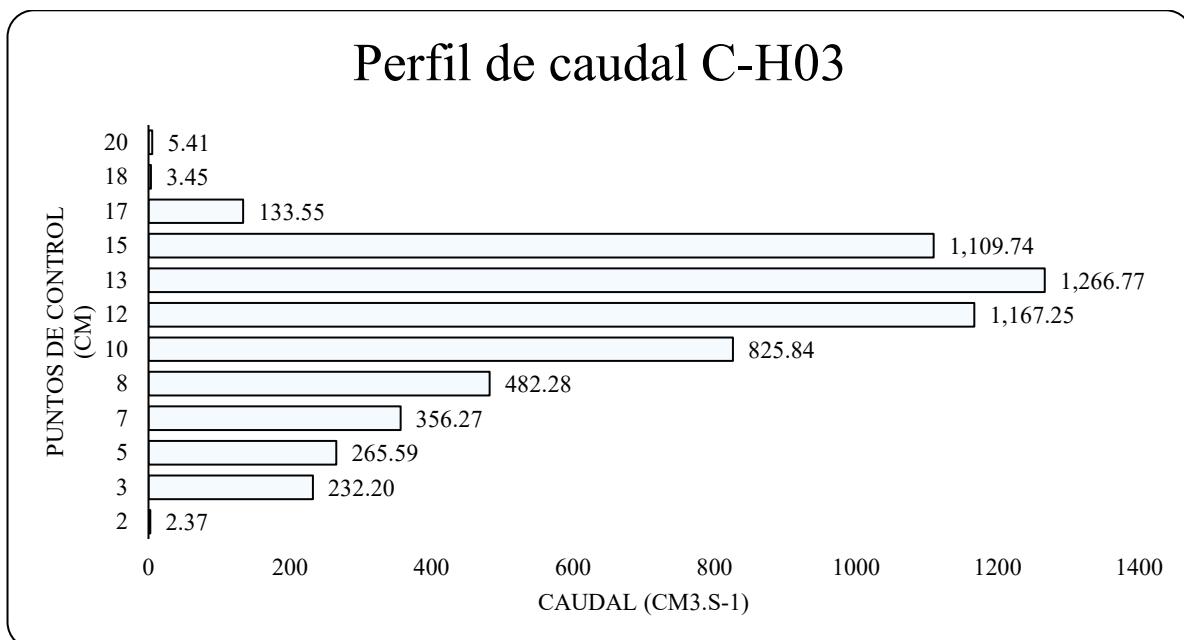
Resumen (método de la sección media) Canal C-H03

Puntos de control cm	Ancho cm	Tirante cm	Área cm ²	Velocidad cm. s ⁻¹	Caudal cm ³ .s ⁻¹	I.s ⁻¹
1.66	1.66	13.00	21.54	0.11	2.37	0.00
3.31	1.66	13.00	21.54	10.78	232.20	0.23
4.97	1.66	13.00	21.54	12.33	265.59	0.27
6.63	1.66	13.00	21.54	16.54	356.27	0.36
8.29	1.66	13.00	21.54	22.39	482.28	0.48
9.94	1.66	13.00	21.54	38.34	825.84	0.83
11.60	1.66	13.00	21.54	54.19	1,167.25	1.17
13.26	1.66	13.00	21.54	58.81	1,266.77	1.27
14.91	1.66	13.00	21.54	51.52	1,109.74	1.11
16.57	1.66	13.00	21.54	6.20	133.55	0.13
18.23	1.66	13.00	21.54	0.16	3.45	0.00
19.89	0.89	13.00	11.51	0.47	5.41	0.01
Caudal Total					5,850.72	cm ³ .s ⁻¹

Nota: Elaboración Propia

Figura 87*Gráfico perfil de velocidad canal C-H03*

Nota: Elaboración propia

Figura 88*Gráfico perfil de caudal canal C-H03.*

Nota: Elaboración propia

4.1.5.2 Resultados Hidráulicos mediante el método de los vertederos in situ.

Para estimar el caudal en los canales principales donde se realizarán las simulaciones del sistema hidráulico de Tipón, se utilizó el método directo mediante un vertedero rectangular de borde afilado, también conocido como vertedero de pared delgada. Esta elección se justifica debido a que la relación entre la carga hidráulica (H) y el espesor del vertedero (e) es menor a 0.67, lo cual clasifica al vertedero como de borde afilado. Este método es ampliamente empleado en hidráulica para la medición de caudales en canales abiertos (Sotelo Avila, 2018)., ya que permite determinar el caudal (Q) a partir de una lectura precisa de la altura de la lámina de agua sobre la cresta del vertedero.

Para un vertedero rectangular de borde afilado bajo condiciones de flujo libre, el caudal puede estimarse mediante la ecuación empírica:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot \mu \cdot b \cdot h^{\frac{3}{2}} \quad (19)$$

$$\mu = \left[0.6075 - 0.045 \left(\frac{B-b}{B} \right) + \frac{0.0041}{h} \right] \cdot \left[1 + 0.55 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{h}{h+w} \right)^2 \right] \quad (20)$$

Donde:

Q = Caudal ($m^3 \cdot s^{-1}$)

g = Aceleración de la gravedad ($m \cdot s^{-2}$)

μ = Coeficiente de gasto ($\mu \approx 0.60$ a 0.65), corrige pérdidas por viscosidad, etc

b = Ancho de la cresta del vertedero (m)

B = Ancho de la base del vertedero (m)

h = Carga sobre la cresta (m)

w = Altura de la base a la cresta del vertedero (m)

El coeficiente de descarga μ representa la eficiencia hidráulica del vertedero, integrando los efectos de viscosidad, tensión superficial, contracción y turbulencia. Su valor varía típicamente entre 0.60 y 0.65 para vertederos rectangulares de borde afilado en condiciones ideales (Rouse, 1936).

Una de las fórmulas más utilizadas para la estimación precisa de μ es la de Hegly, que considera la relación entre la altura del flujo y el ancho del vertedero (h/b), siendo aplicable cuando $h/b > 0.13$.

Los vertederos utilizados presentaron un espesor de 3 cm, y sus dimensiones específicas se detallan en el cuadro siguiente:

Tabla 35

Caudal obtenido con los vertederos

Nº	Nombre del Canal	Ancho del vertedero (b)	Altura del fondo al vertedero (W)	Ancho del canal (B)	Carga sobre el vertedero (h)	e/h	μ	Q	$m^3.s^{-1} l.s^{-1}$
1	Canal C-L06, canal simulado	0.15	0.1	0.305	0.105	0.476	0.645	0.0097	9.73
2	Canal C-L16, Antes de la caída simulada	0.15	0.1	0.31	0.11	0.455	0.644	0.0104	10.40
3	Canal pequeño del Templo del agua	0.1	0.1	0.15	0.0475	0.632	0.696	0.0021	2.13
4	Canal pequeño del Templo del agua	0.1	0.1	0.15	0.065	0.462	0.680	0.0033	3.33

Nota: Elaboración propia

Figura 89*Canal C-L06, canal simulado*

Nota: Elaboración propia

Figura 90*Canal C-L16, Antes de la caída simulada*

Nota: Elaboración propia

Figura 91

Canal pequeño del Templo del agua



Nota: Elaboración propia

Figura 92

Canal pequeño del Templo del agua



Nota: Elaboración propia

La determinación del caudal mediante vertederos permitió calibrar y validar los modelos de dinámica de fluidos computacional (CFD) realizados en FLOW-3D, así como contrastar los resultados obtenidos por la metodología LSPIV. Este enfoque combinatorio refuerza la confiabilidad de los datos hidráulicos obtenidos y permite una caracterización integral del comportamiento del flujo en las obras hidráulicas incaicas de Tipón.

Se adiciona también el mapa de relación de canales y caídas de Tipón en anexos:

4.1.5.3 Resultados Hidráulicos mediante la dinámica de fluidos computacional.

La simulación hidráulica en FLOW-3D se apoya en el Teorema del Transporte de Reynolds, que permite convertir las leyes de conservación de un sistema en ecuaciones aplicables a un volumen de control fijo. Esto evita el seguimiento individual de masas fluidas y facilita el análisis de flujos complejos.

Mediante el método de volúmenes finitos, el dominio (canal, acueducto o estructura) se divide en pequeñas celdas donde se resuelven las ecuaciones fundamentales: (Flow Science, 2023)

Conservación de masa – Garantiza que la masa no se crea ni se destruye, en este caso con densidad constante

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial(u)}{\partial x} + \frac{\partial(v)}{\partial y} + \frac{\partial(w)}{\partial z} = 0 \quad (38)$$

Sirve para verificar que lo que entra y sale de un volumen de control está en equilibrio.

Conservación de momento (Navier–Stokes) – Expresa que el cambio de movimiento es igual a la suma de las fuerzas actuantes:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\nabla p + \mu\nabla^2\vec{V} + \rho\vec{g} \quad (77)$$

Permite calcular presiones, aceleraciones y efectos viscosos dentro del flujo.

Conservación de energía – Relaciona cambios de energía interna, cinética y potencial con transferencias de calor y trabajo:

$$\frac{\partial(ep)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho \vec{v} \left(e + \frac{P}{\rho} \right) \right] = \nabla \cdot (k \nabla T + \vec{\tau} \cdot \vec{v}) \quad (105)$$

En flujos turbulentos, FLOW-3D emplea el modelo RANS con cierre k–ω, que añade el efecto promedio de remolinos y fluctuaciones:

Energía cinética turbulenta (k) – Mide la intensidad de la turbulencia:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla k = P_k - \beta \cdot k \omega + \nabla \cdot [(v + \sigma_k v_t) \nabla k] \quad (110)$$

Este modelo es especialmente preciso cerca de paredes, en zonas de recirculación y en flujos con separación, como los que se presentan en los canales y caídas de agua de Tipón. Las ecuaciones se detallan mejor en el Capítulo II Marco teórico.

4.1.5.3.1 Simulación hidráulica del canal principal de Tipón usando FLOW – 3D

Con el objetivo de comprender en detalle el comportamiento hidráulico de un canal principal de Tipón, se llevó a cabo una simulación computacional utilizando el software FLOW-3D. Se seleccionó el canal principal identificado como C-L06, y se definió un intervalo temporal de simulación de 60 segundos. El proceso computacional requirió aproximadamente 8 horas de procesamiento, permitiendo así un análisis exhaustivo del comportamiento hidráulico del flujo en este tramo primario. Esta duración permitió alcanzar condiciones de estabilidad numérica y captar con precisión los patrones dinámicos del agua dentro del sistema.

El dominio fue discretizado en una malla estructurada con celdas cúbicas de tamaño uniforme, estableciendo condiciones de contorno de entrada con un caudal constante de 9.72 L/s y un tirante observado de 5 cm. Se calibraron parámetros como la rugosidad (valor de Manning $n = 0.0165 s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$) y se validó la permanencia del caudal mediante monitoreo en múltiples secciones transversales espaciadas cada 2 metros. La configuración detallada de la simulación, junto con los parámetros y resultados específicos, se encuentra disponible en el Anexo 8.6.

Para verificar la precisión de los resultados obtenidos en la simulación hidráulica, se utilizará la **ecuación de continuidad unidimensional**, la cual es una herramienta fundamental y convencional para obtener valores estimados de forma rápida y eficiente. Esta ecuación establece que la tasa de **variación temporal del área transversal del flujo más la tasa de cambio espacial del caudal debe ser igual a cero**, expresándose matemáticamente como:

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

Donde:

A = Área transversal del flujo (m^2)

Q = Caudal volumétrico (m^3/s)

t = Tiempo(s)

x = Posición a lo largo del canal (m)

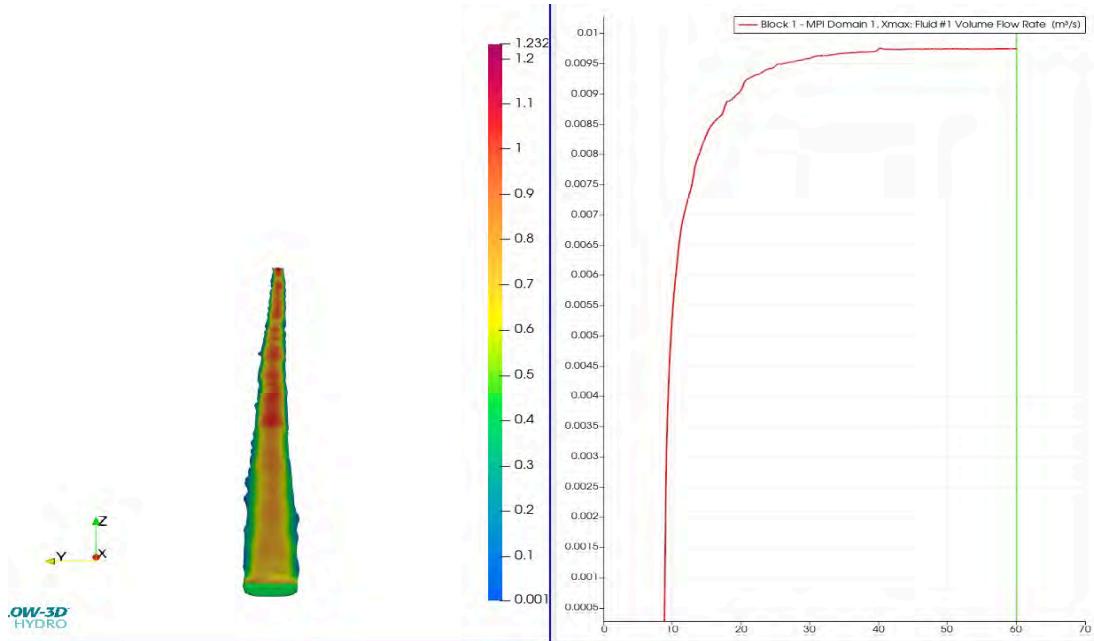
Para la validación se tomarán cortes transversales cada dos metros a lo largo del canal, lo que permitirá realizar una comparación detallada entre los datos de simulación y las mediciones experimentales, garantizando así la confiabilidad y consistencia del modelo hidráulico implementado.

Análisis del Caudal en el canal C-L06 de Tipón:

Conforme a la ecuación de continuidad, el caudal debe conservarse constante a lo largo del canal. Si bien los valores obtenidos mediante la técnica LSPIV y el método de vertederos presentan ligeras discrepancias, se adoptó como valor representativo de ambas mediciones, equivalente a 9.72 L/s. En los resultados de simulación, se observa que el caudal inicia en cero y aumenta gradualmente hasta alcanzar dicho valor, manteniéndose constante en el resto del tramo modelado. Esta evolución se representa en la imagen que se presenta a continuación:

Figura 93

Gráfico del Caudal en los 60 segundos de Simulación



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. Valor del caudal en los primeros 60 segundos de la simulación

Análisis de la Velocidad en el canal C-L06

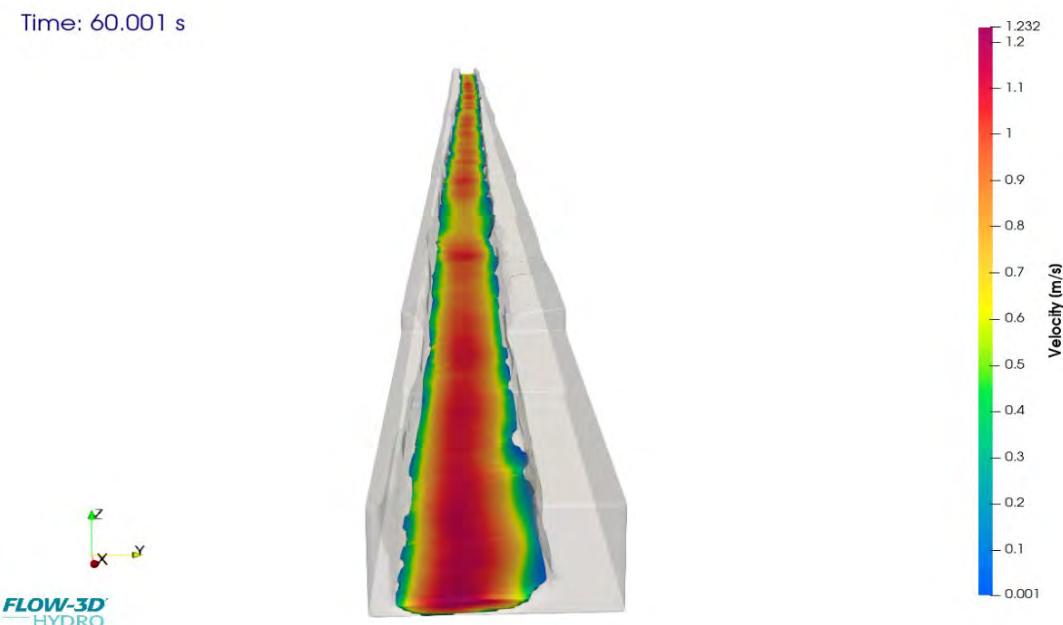
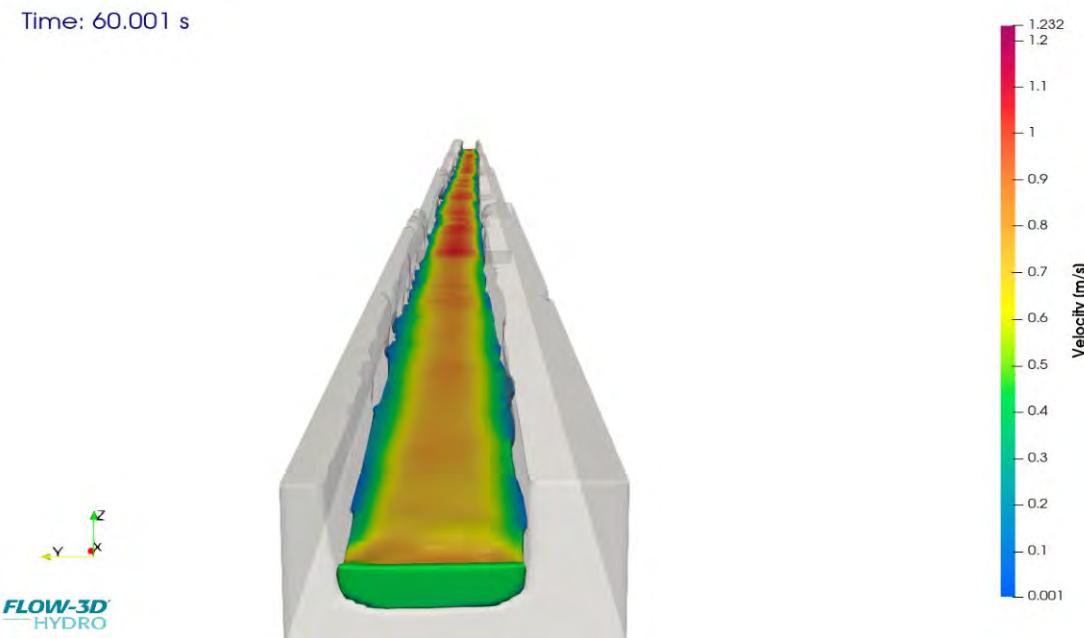
La distribución de velocidades en el canal C-L06, representada mediante una isosuperficie en estado estacionario, muestra una mayor velocidad en la zona central y valores menores hacia los bordes, en concordancia con los efectos de fricción lateral y de fondo.

La uniformidad de las velocidades en la zona central del canal evidencia un diseño hidráulico inca eficiente y bien adaptado a la topografía, demostrando la capacidad de las soluciones prehispánicas de Tipón para conducir caudales de manera estable y controlada sin el uso de tecnologías modernas.

La distribución de la velocidad en el canal C-L06 se representa mediante la siguiente figura, la cual presenta la Isosuperficie correspondiente.

Figura 94

Isosuperficie de la Velocidad al inicio y al final del canal simulado.



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>. La primera imagen es tomada al inicio del canal y la segunda es tomada al final del tramo del canal simulado.

Con el objetivo de analizar con mayor detalle el comportamiento hidráulico del flujo a lo largo del canal C-L06, se presenta a continuación un corte longitudinal realizado en el plano medio del eje Y. Esta representación permite observar el desarrollo del perfil de velocidad a lo largo de todo el canal, desde la entrada hasta la salida, facilitando la identificación de zonas de aceleración, estabilización e interacción del flujo con la geometría de las paredes y el fondo.

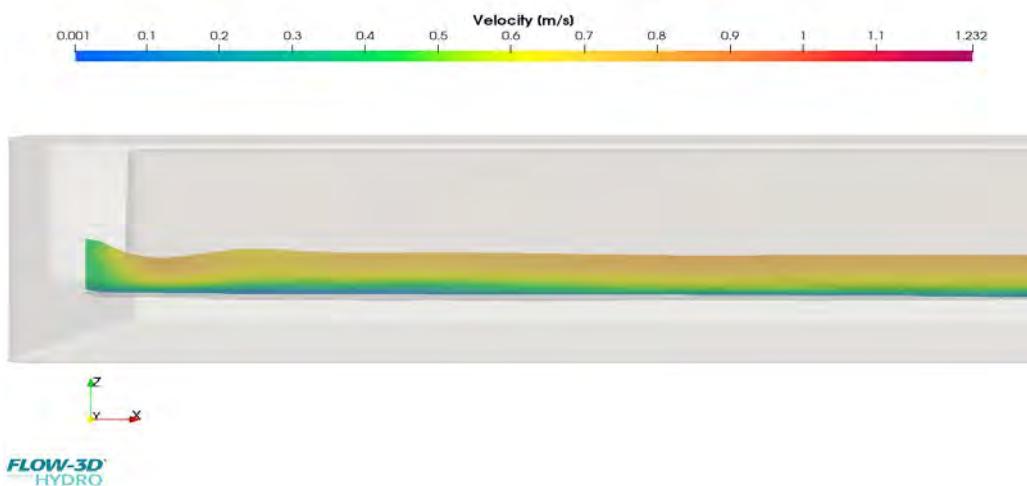
La figura muestra claramente cómo la velocidad del flujo incrementa gradualmente en el tramo inicial, debido a la entrada progresiva de agua y la pendiente del canal. Posteriormente, en el tramo intermedio y final, se observa una estabilización de las velocidades, reflejando un régimen de flujo más uniforme. Este comportamiento es coherente con un flujo que ha alcanzado condiciones estacionarias y plenamente desarrolladas, lo cual es consistente con el diseño eficiente del canal inca.

El patrón observado sugiere una distribución ordenada de velocidades, sin presencia de recirculaciones ni turbulencias significativas, lo que indica que la geometría ancestral del canal fue diseñada para garantizar un transporte eficiente del agua, minimizando pérdidas de energía y maximizando la estabilidad del régimen hidráulico. Este tipo de análisis resulta fundamental para comprender el alto nivel de conocimiento técnico que alcanzaron las civilizaciones prehispánicas en el manejo del agua, y cómo sus obras siguen mostrando un comportamiento hidráulico óptimo incluso bajo criterios de evaluación contemporáneos, como los que proporciona la dinámica de fluidos computacional (CFD).

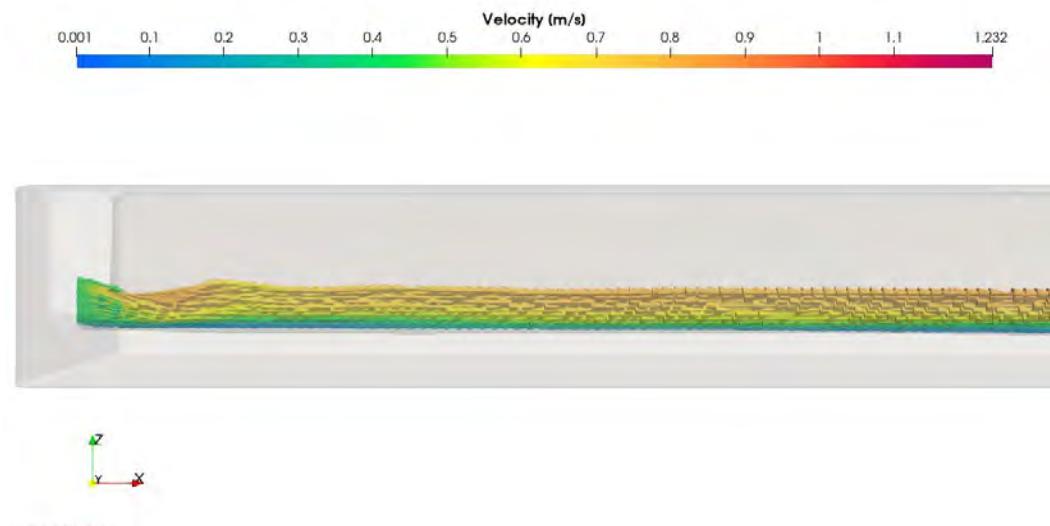
Figura 95

Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+00 – 0+03)m

Time: 60.001 s



Time: 60.001 s



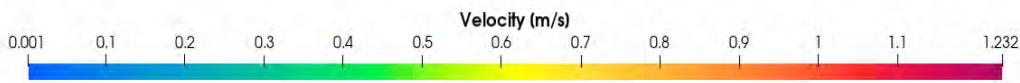
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

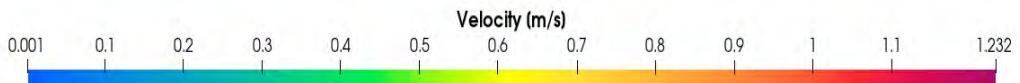
Figura 96

Perfil longitudinal de la velocidad más vectores progresiva (0+03 – 0+08)m

Time: 60.001 s



Time: 60.001 s



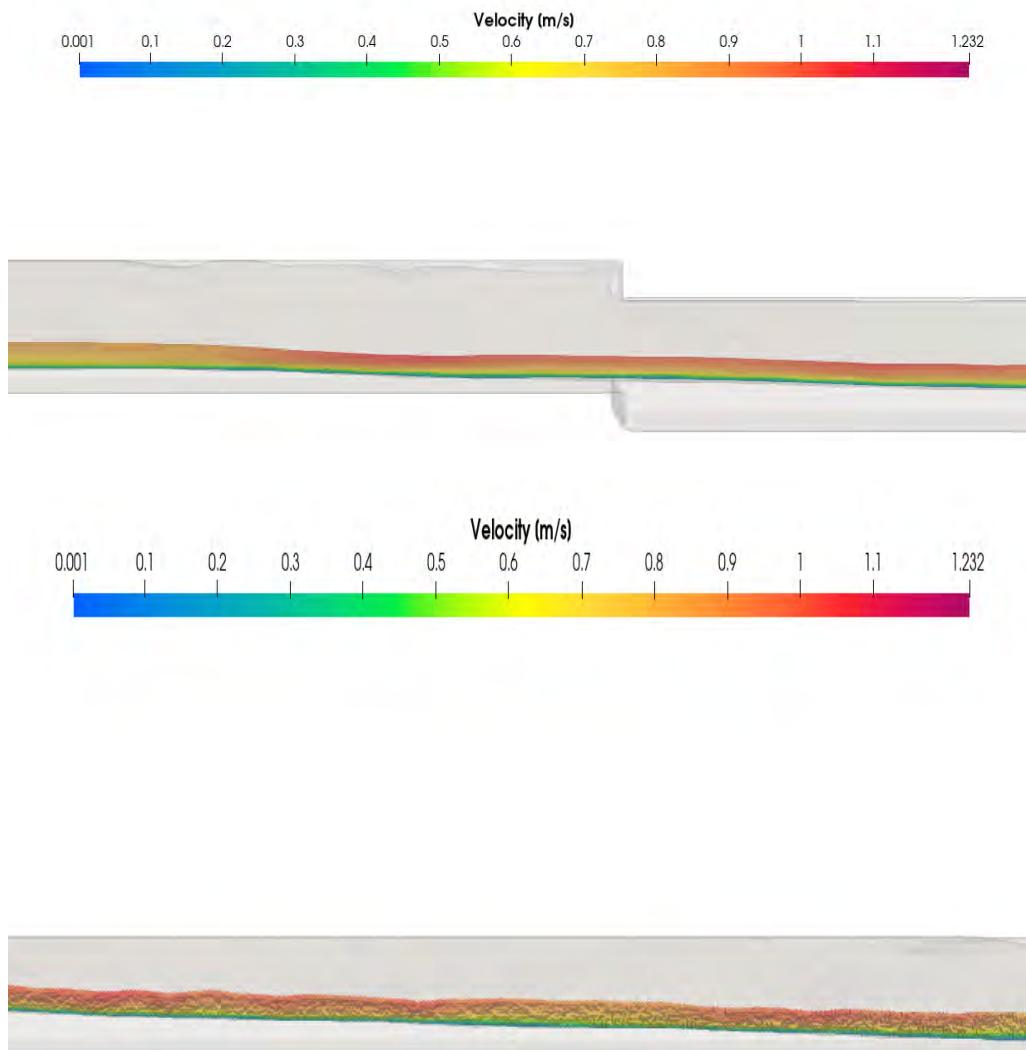
Nota: Extraído de . FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

Figura 97

Perfil longitudinal de la velocidad más vectores progresiva (0+08 – 0+12)m

Time: 60.001 s

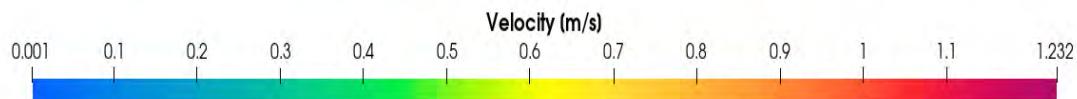
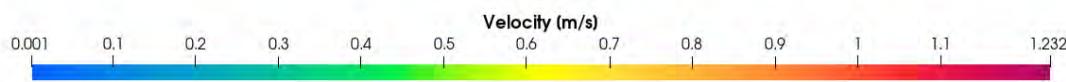


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.
<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

Figura 98

Perfil longitudinal de la velocidad más vectores progresiva (0+12 – 0+16) m

Time: 60.001 s



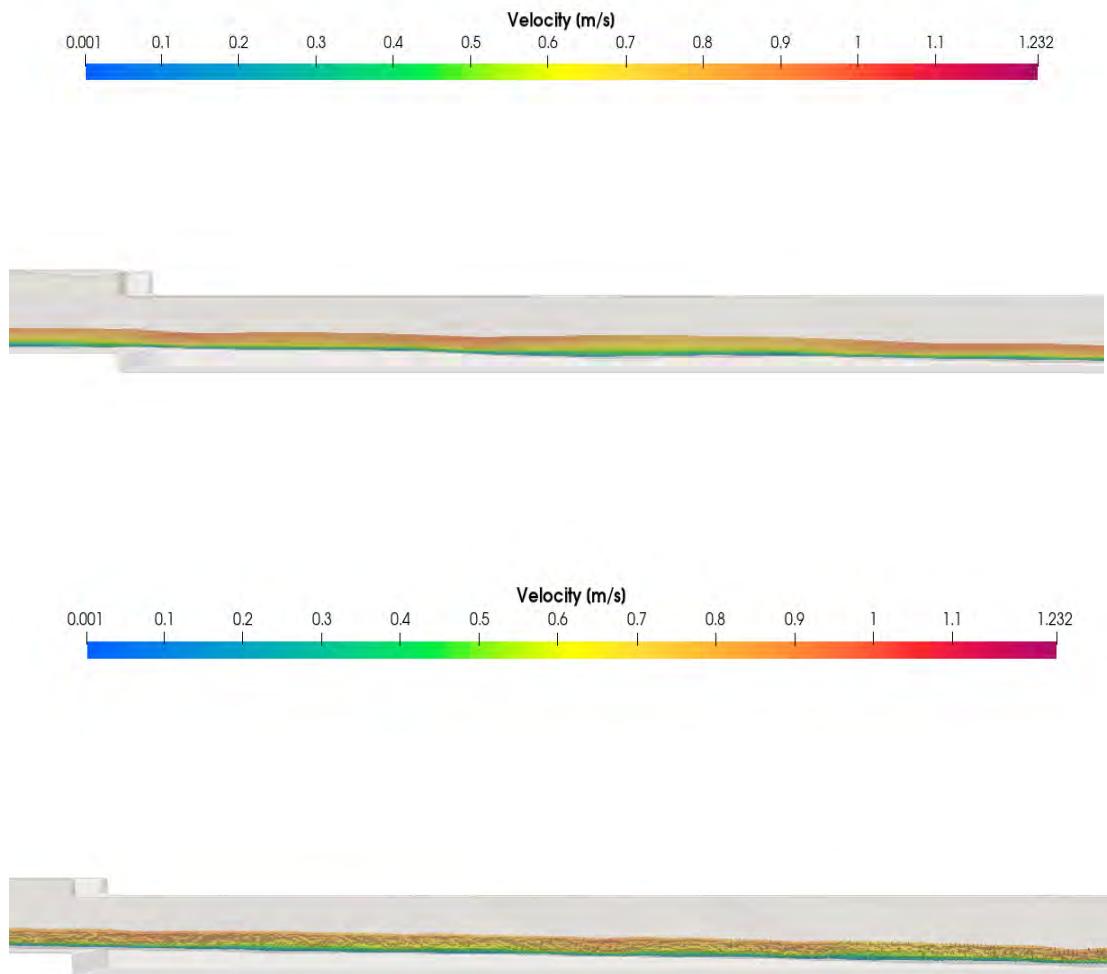
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

Figura 99

Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+16 – 0+20) m

Time: 60.001 s

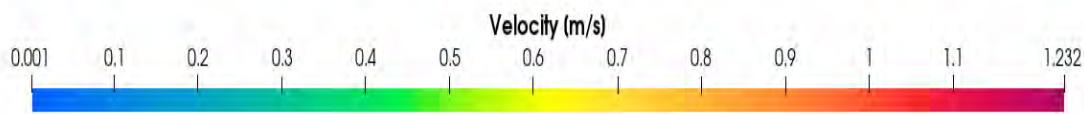


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.
<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

Figura 100

Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva ($0+20 - 0+24$)m

Time: 60.001 s



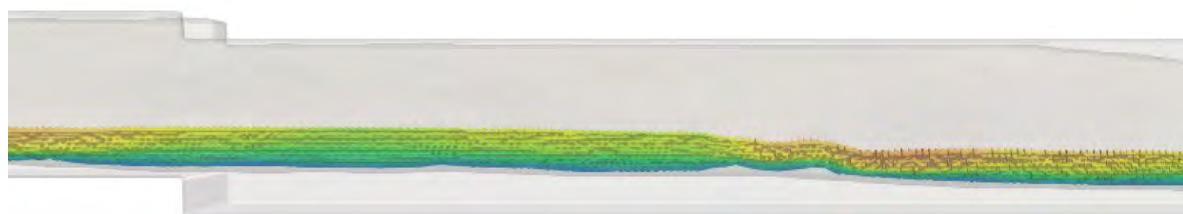
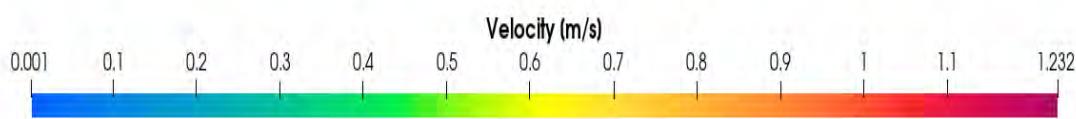
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

Figura 101

Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva (0+24 – 0+28)m

Time: 60.001 s



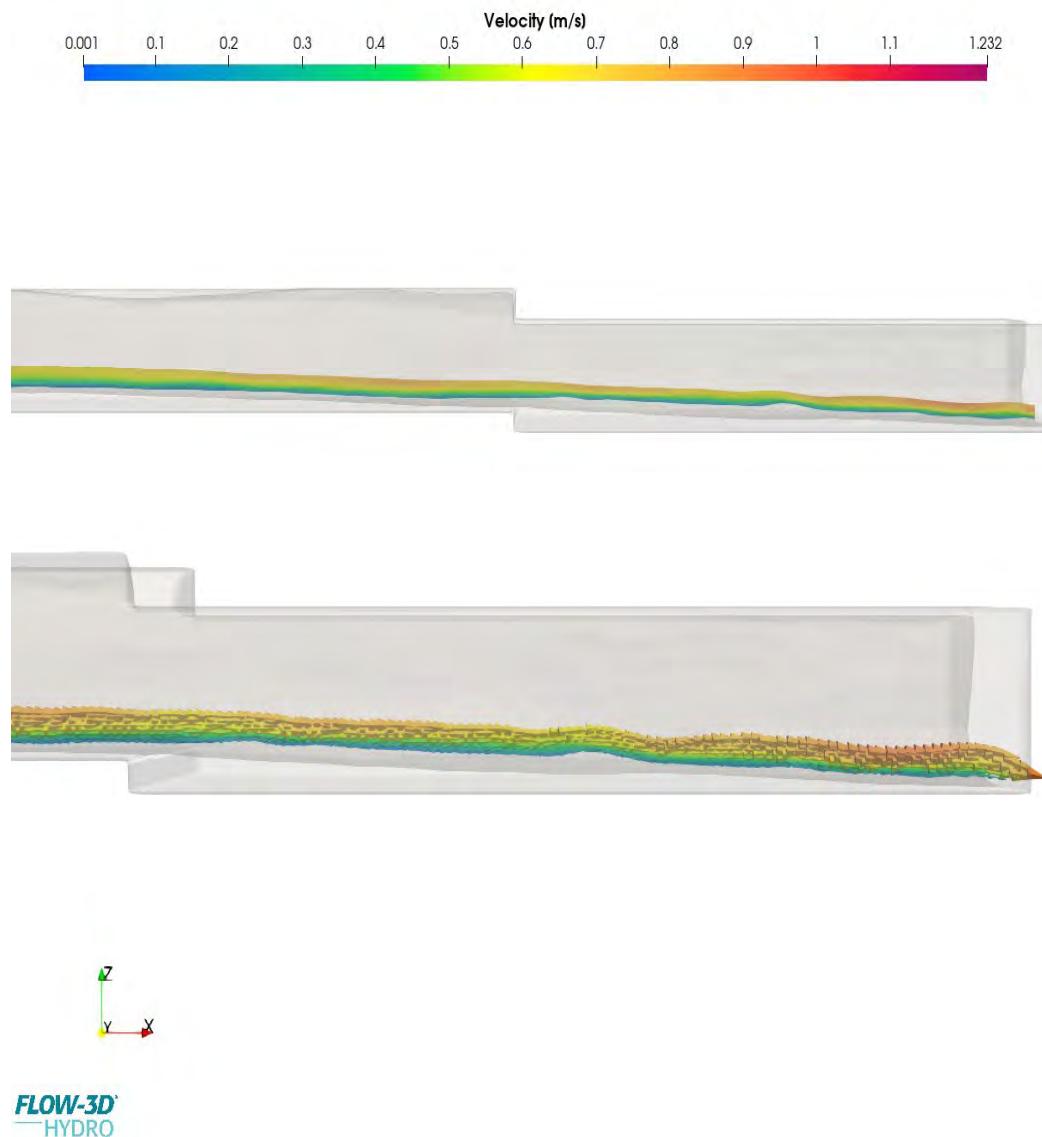
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

Figura 102

Perfil longitudinal de la velocidad y vectores progresiva ($0+28 - 0+31$)m

Time: 60.001 s



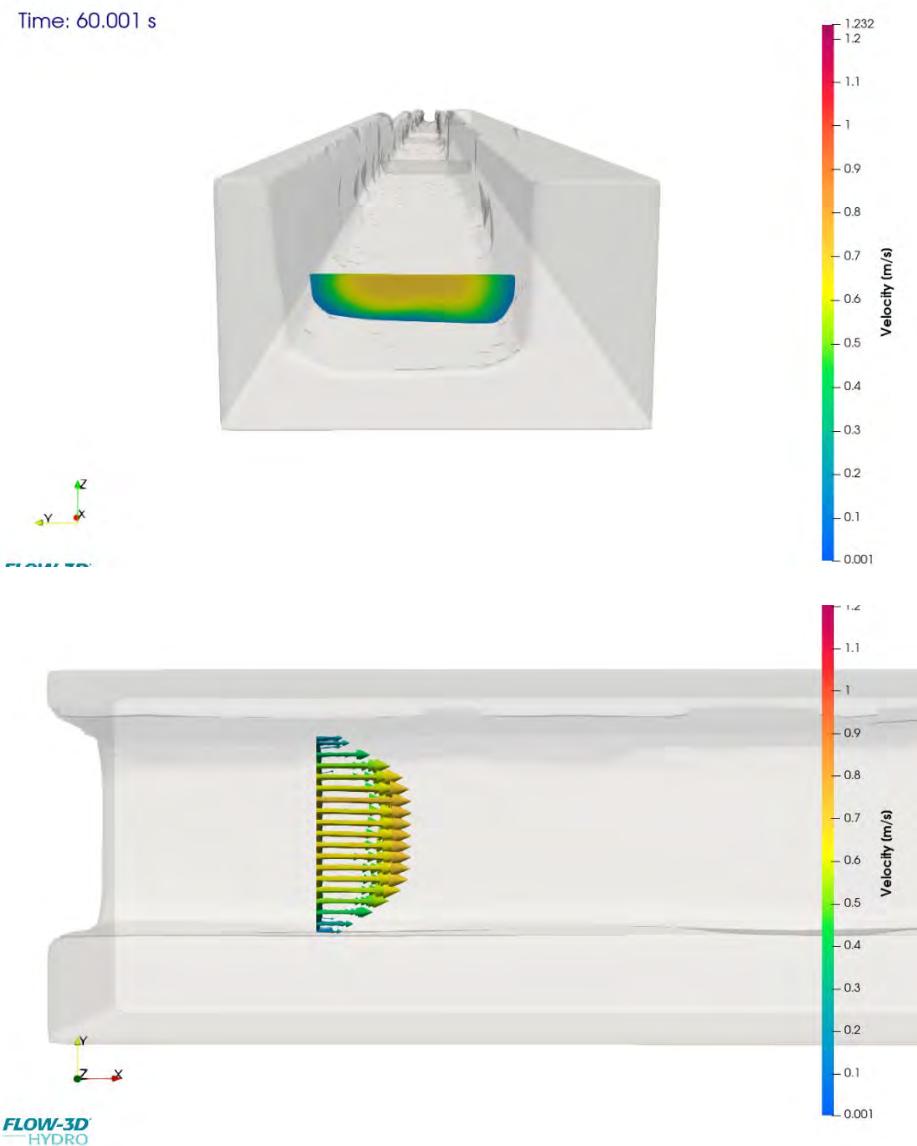
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. En la imagen de arriba tenemos el corte a la mitad de la Isosuperficie de la velocidad y abajo la misma representación más el comportamiento de los vectores de velocidad.

Corte transversal en la progresiva 0+01 m del canal, donde se aplicaron la técnica LSPIV y el método de vertederos para calcular la velocidad superficial, velocidad media y el caudal. Esta sección fue seleccionada por su accesibilidad y representatividad.

Figura 103

Corte transversal de la Isosuperficie de velocidad más vectores progresiva 0+01m



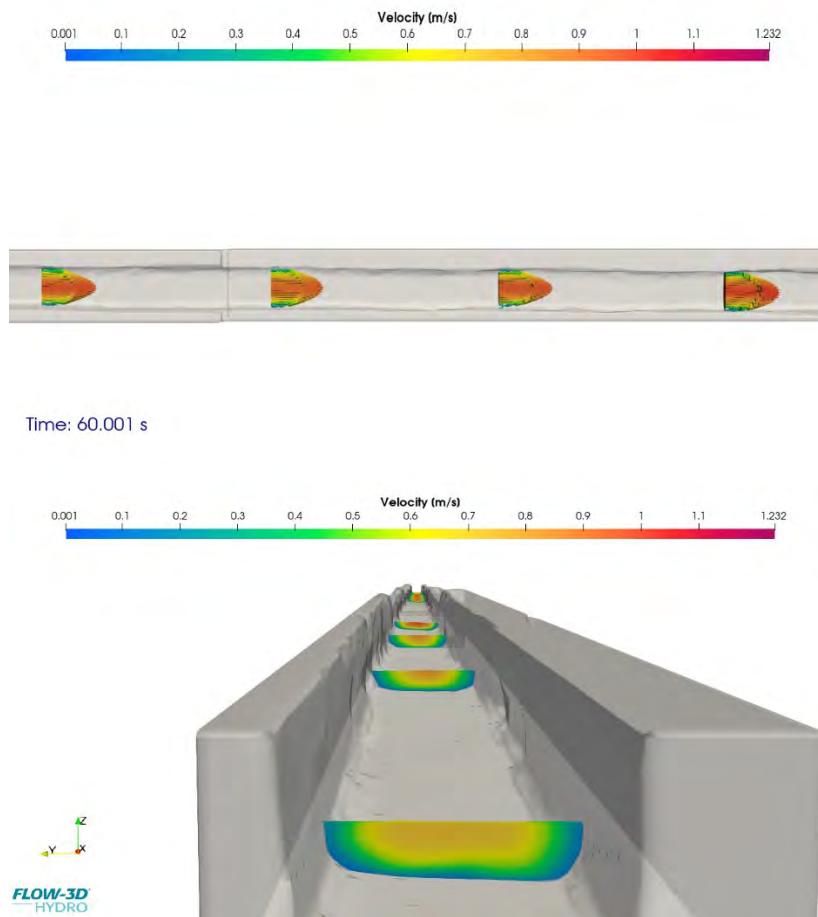
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante la técnica Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV), se registró una velocidad superficial promedio de 0.7896 m/s y una velocidad media de 0.6316 m/s. Por su parte, la simulación computacional realizada mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) mostró velocidades superficiales cercanas a 0.8 m/s (0.79) y velocidades medias próximas a 0.6 m/s (0.64), evidenciando coherencia entre ambos métodos y validando la confiabilidad de los resultados.

Figura 104

Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva (0+00 – 0+08)m

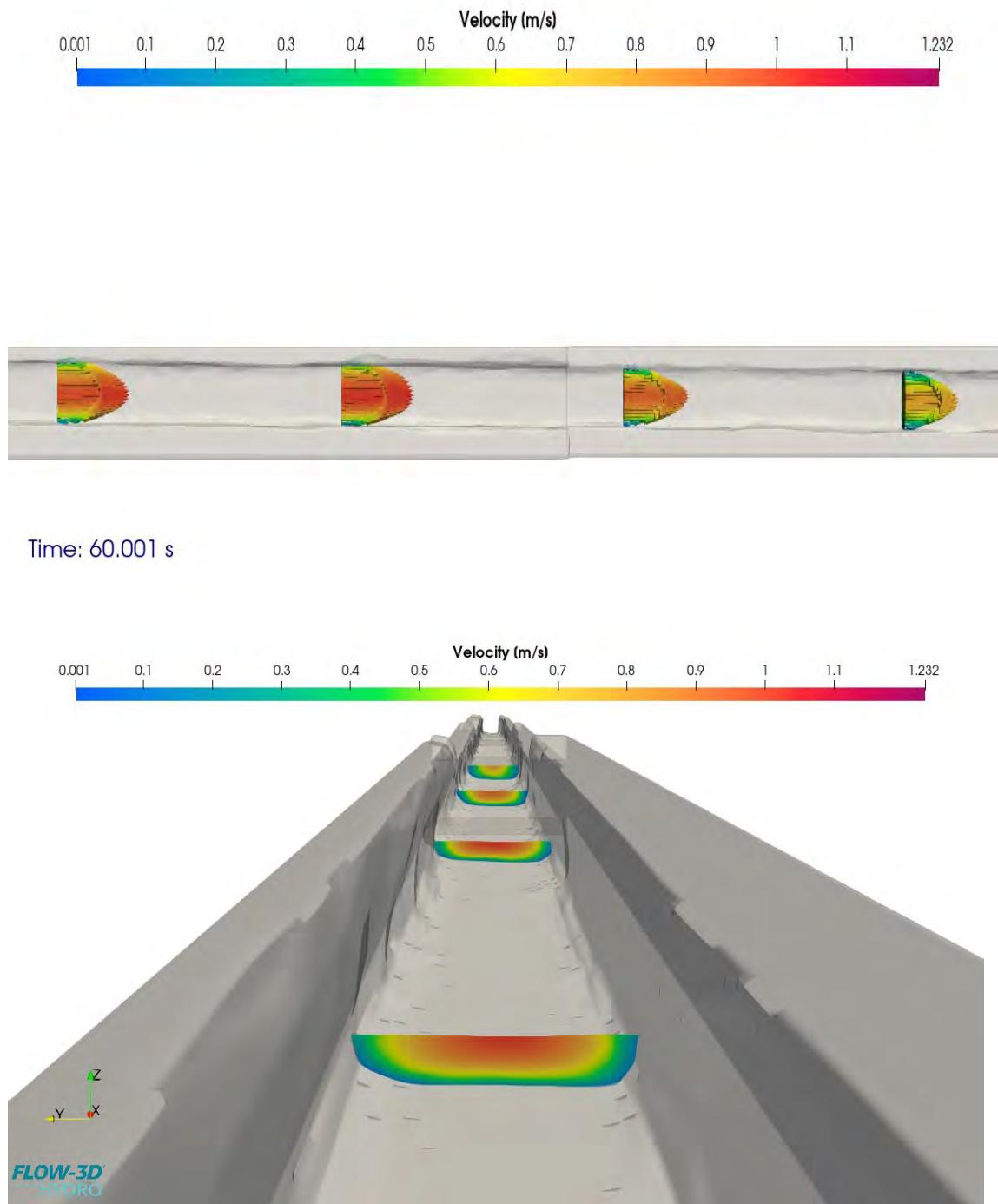


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 105

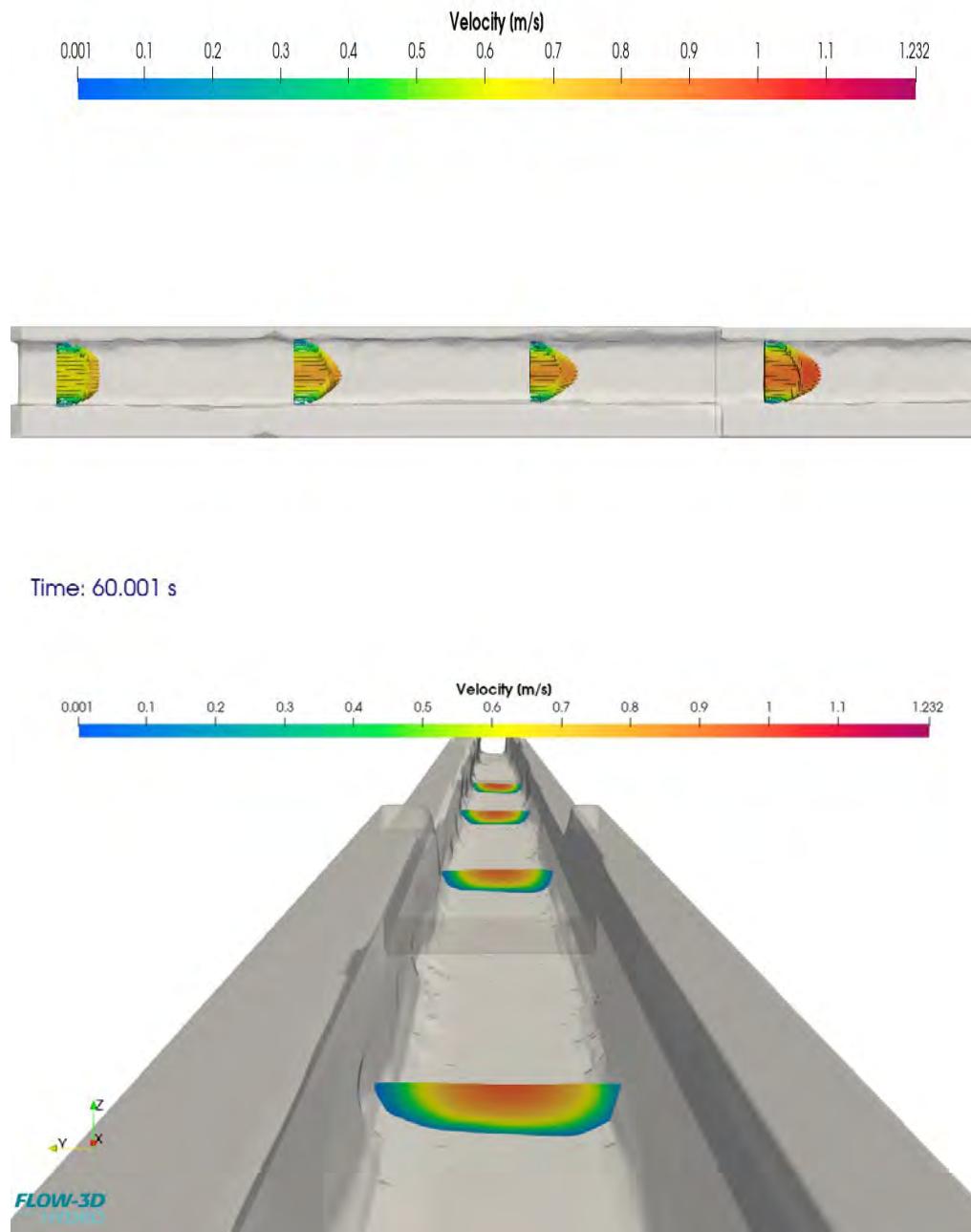
Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva ($0+08 - 0+16$)m



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.
<https://www.flow3d.com>.

Figura 106

Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva (0+16 – 0+24)m

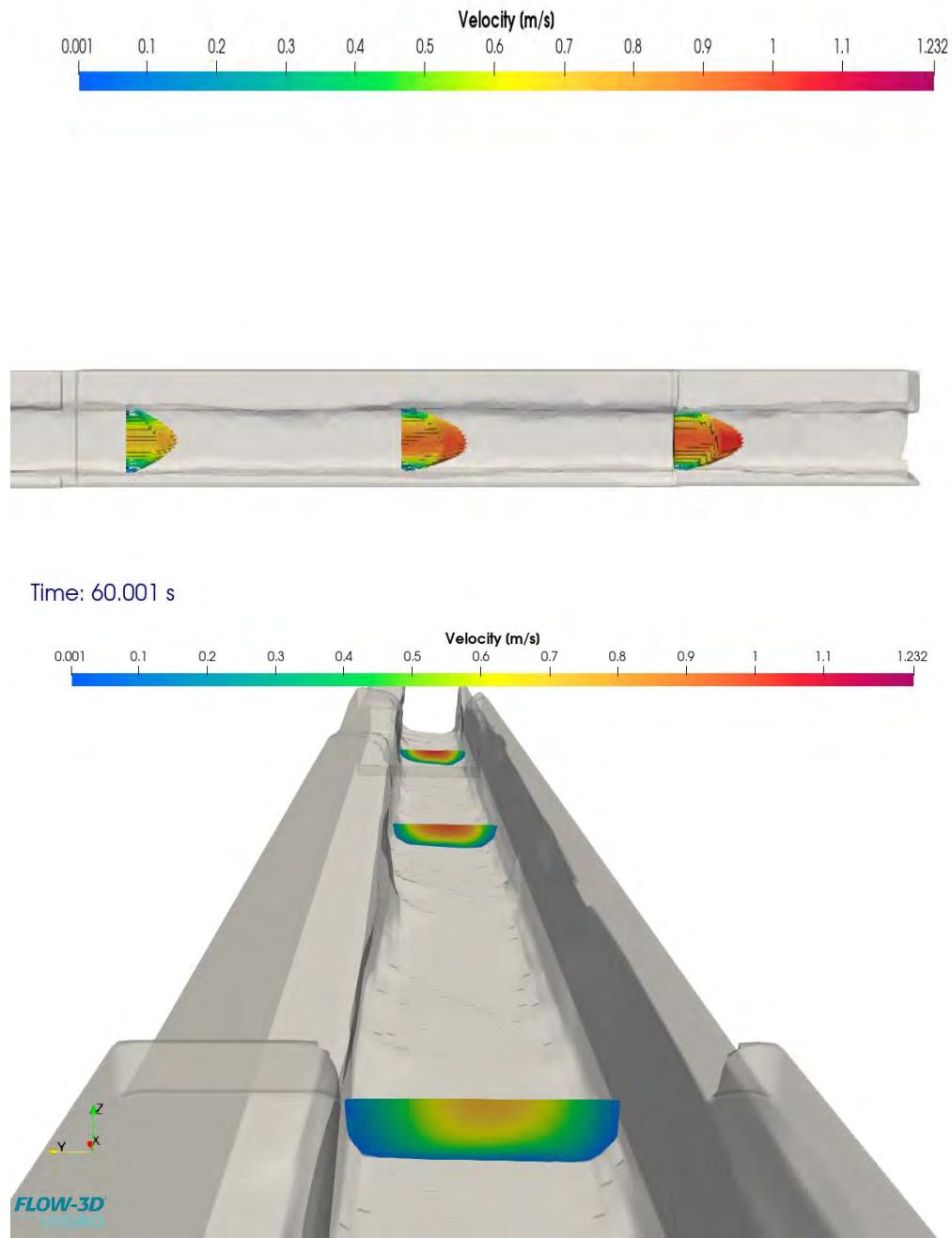


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 107

Corte transversal y perfil de velocidades con vectores progresiva (0+24 – 0+31)m



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Análisis del régimen hidráulico

Para caracterizar el régimen hidráulico en los canales del complejo arqueológico de Tipón, se procede al cálculo del número de Froude, un parámetro adimensional que permite identificar el tipo de flujo según la relación entre las fuerzas iniciales y gravitacionales. Esta relación se expresa mediante la siguiente fórmula unidimensional, aplicada en la dirección principal del flujo (eje X).

El número de Froude es clave para determinar si el flujo es subcrítico ($Fr < 1$), crítico ($Fr = 1$) o supercrítico ($Fr > 1$). Este análisis se aplicará a lo largo del canal en cortes longitudinales y transversales cada 2 metros, a partir del punto donde se realizó la medición experimental con el método LSPIV y el cálculo del caudal mediante vertederos.

En cada corte se utilizarán los valores de velocidad media obtenidos en las simulaciones CFD, ya validados con datos experimentales, para calcular el número de Froude y así determinar con precisión el régimen hidráulico en diferentes tramos del canal.

Este enfoque permitirá evaluar si el modelo reproduce adecuadamente las condiciones reales del flujo y si el diseño hidráulico original responde a criterios de eficiencia hidráulica relacionados con el control del régimen de flujo.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

Donde:

V = Velocidad media del flujo (m/s)

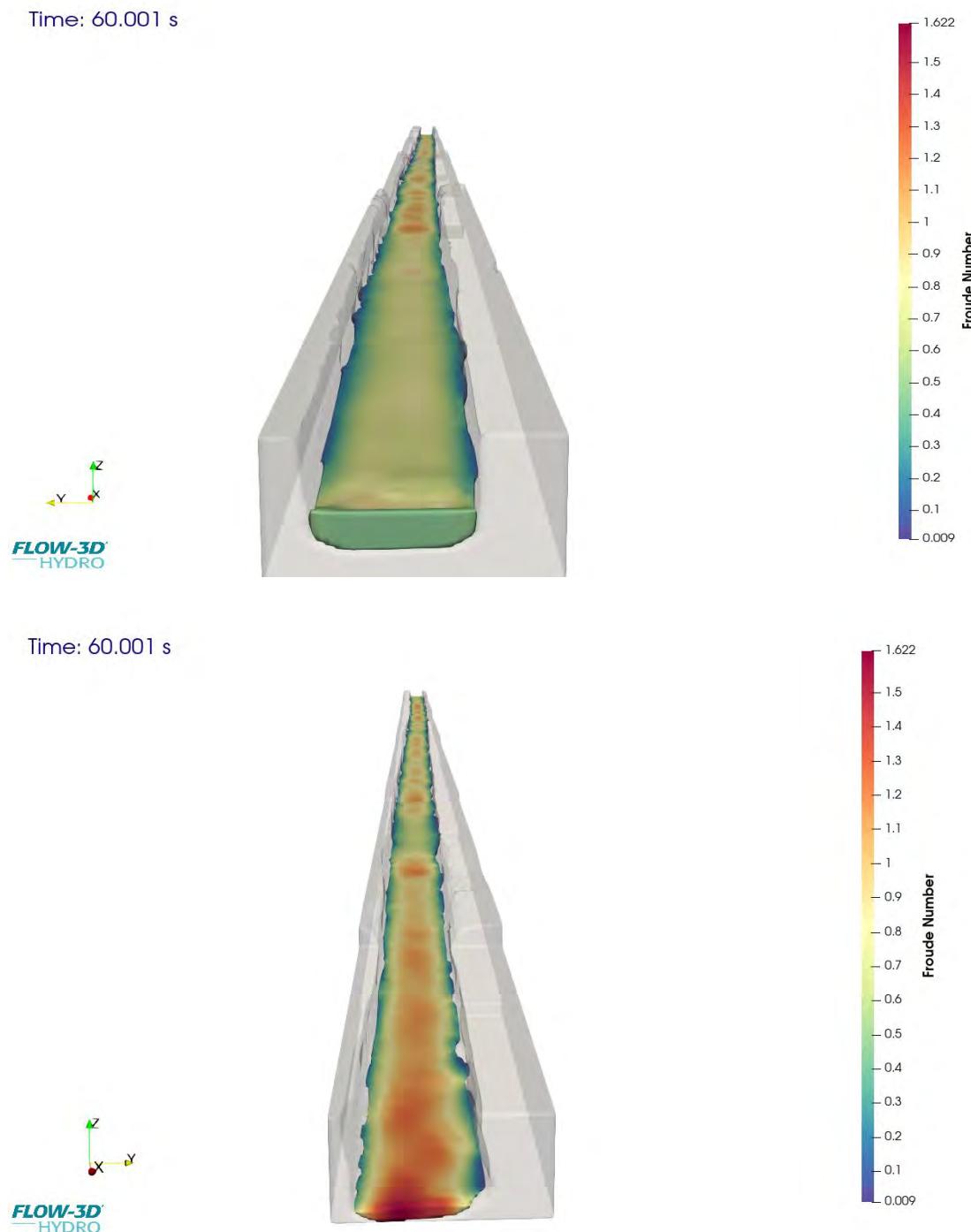
g = Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

h = Tirante hidráulico o Profundidad del flujo (m)

La distribución del número de Froude en el canal C-L06 se representa mediante la siguiente figura, la cual presenta la isosuperficie correspondiente.

Figura 108

Isosuperficie Número de Froude Vista al inicio y al final del tramo del canal simulado



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

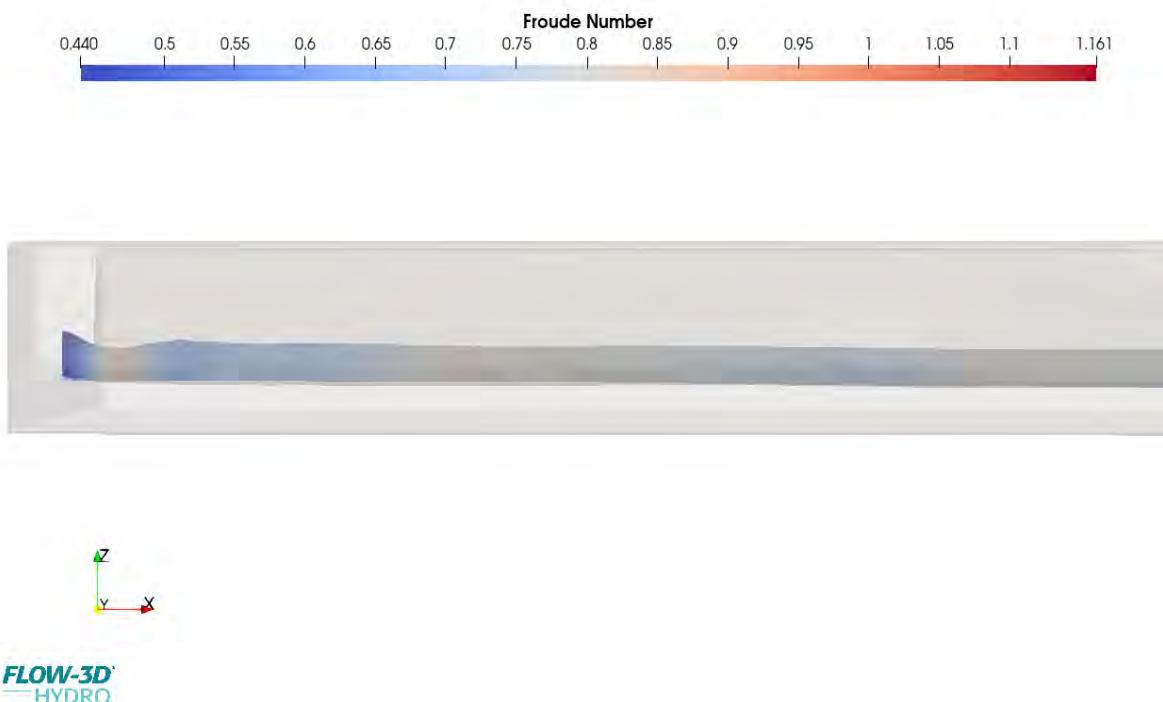
<https://www.flow3d.com>. La imagen de arriba del tramo inicial y la de abajo la salida del canal simulado.

Para mostrar mejor el perfil de velocidad se muestra el corte longitudinal de todo el canal a la mitad del eje Y como se muestra a continuación

Figura 109

Perfil longitudinal del Número de Froude Progresiva (0+00 – 0+03)m

Time: 60.001 s



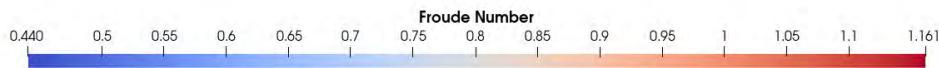
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 110

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+00 – 0+03)m

Time: 60.001 s

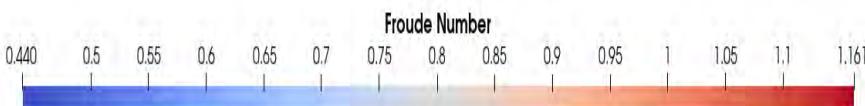


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 111

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+03 – 0+08)m

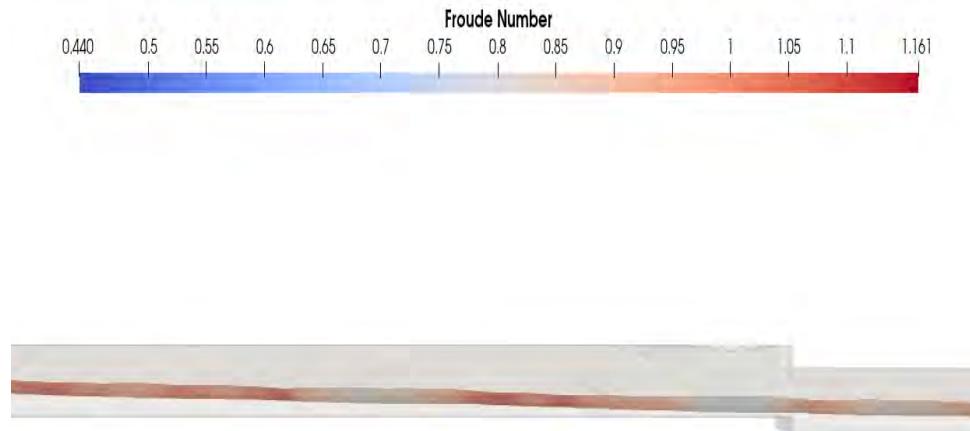


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 112

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva ($0+08 - 0+12$)m

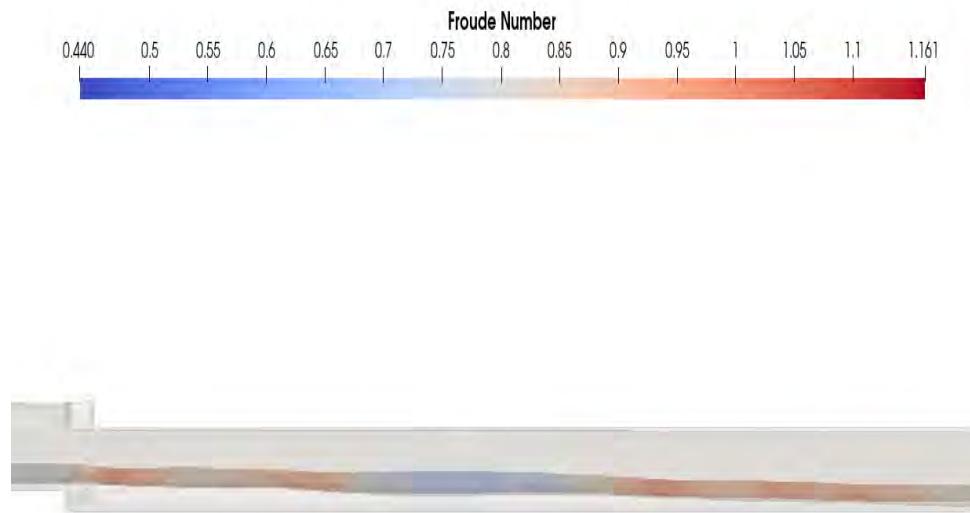


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 113

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva ($0+12 - 0+16$)m

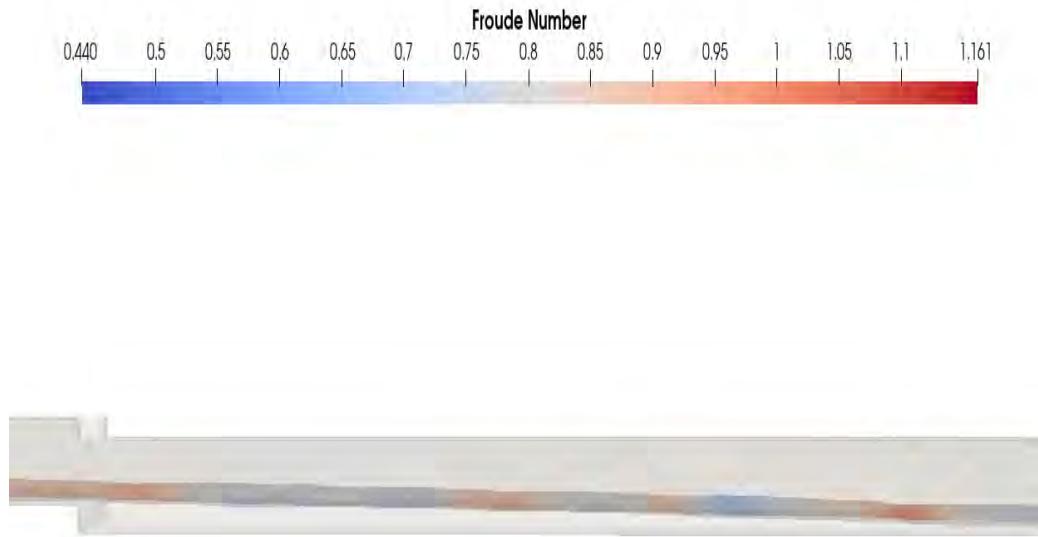


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 114

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+16 – 0+20)m

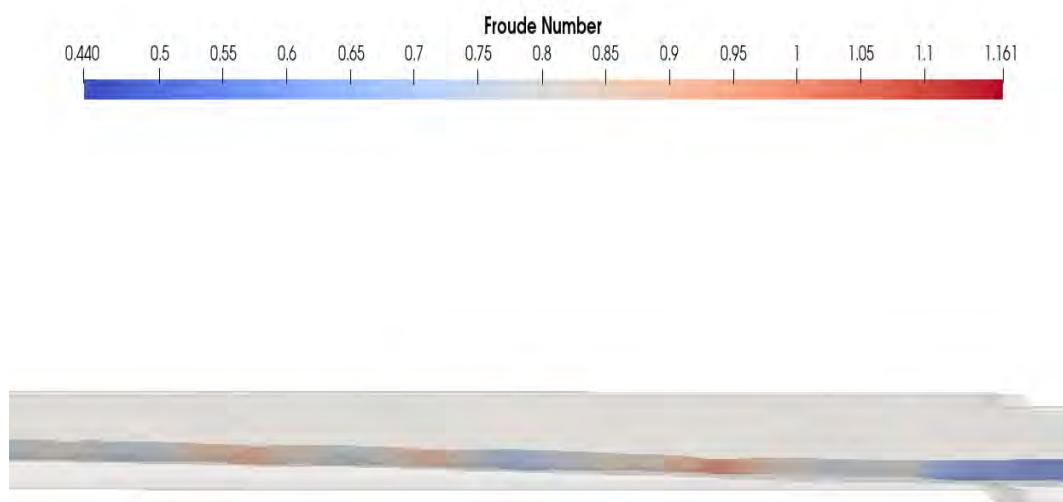


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 115

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva (0+20 – 0+24)m

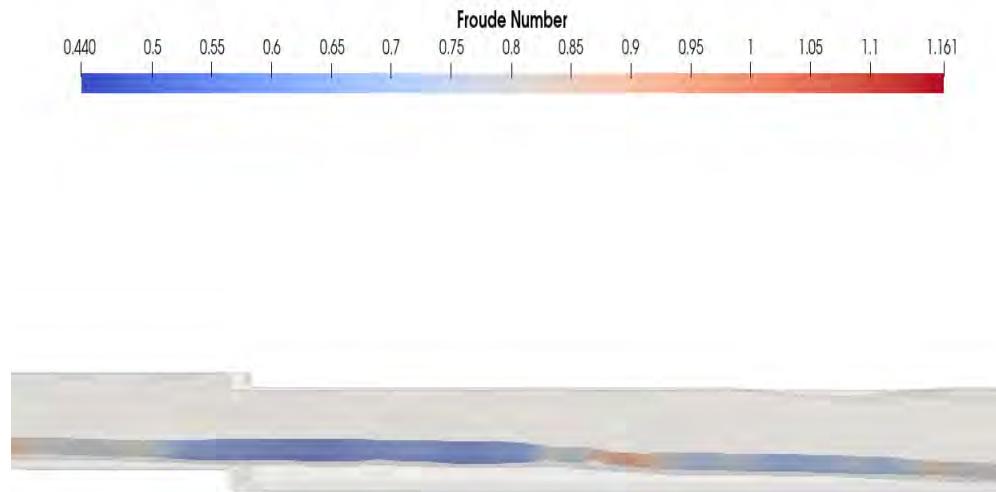


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 116

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva ($0+24 - 0+28$)m

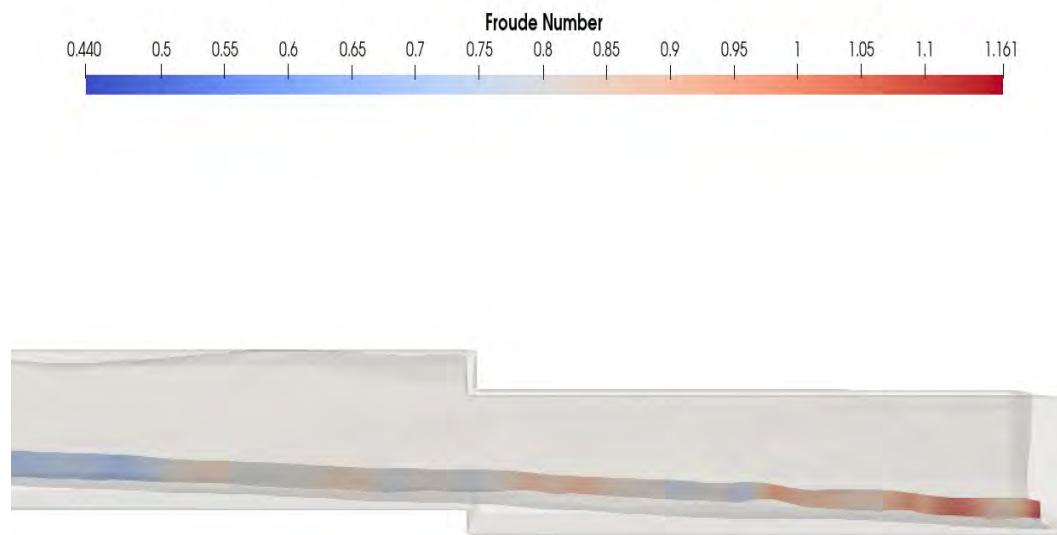


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 117

Perfil longitudinal del Numero de Froude Progresiva ($0+28 - 0+31$)m



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

El número de Froude fue evaluado en la progresiva 0+01 m, ubicación en la cual se realizaron las mediciones experimentales mediante la técnica LSPIV y el método de vertederos. Esta elección permite contrastar y validar el valor obtenido a través de la simulación numérica:

Figura 118

Corte transversal Número de Froude progresiva 0+01m



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

también se tomó el Numero de Froude Cada 2 metros los resultados obtenidos se comprobarán con la ecuación de Froude;

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

Donde:

V = Velocidad media del flujo (m/s)

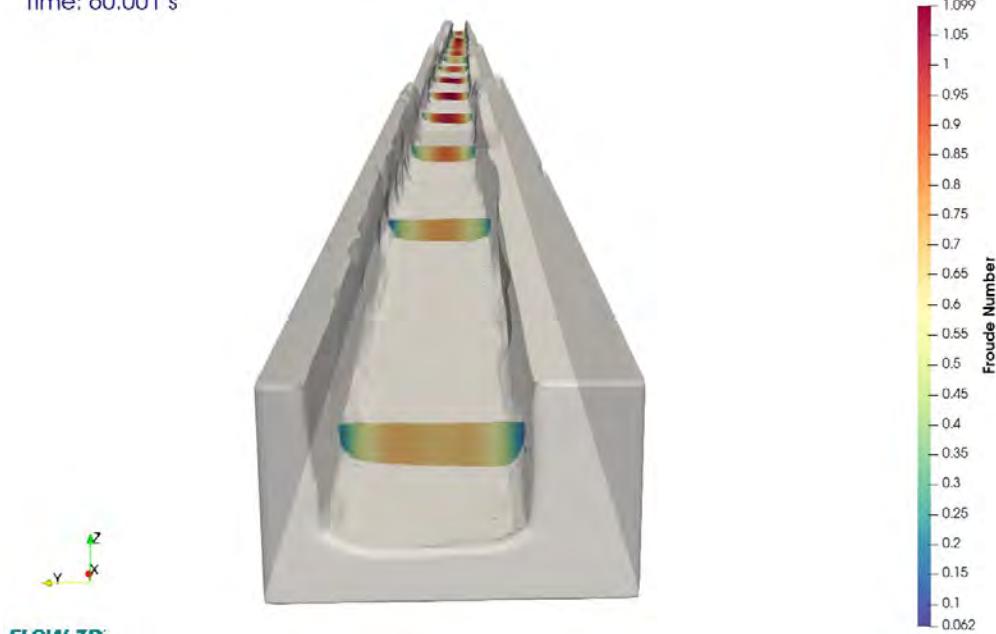
g = Aceleracion de la gravedad (9.81 m/s^2)

h = Tirante hidráulico o Profundidad del flujo (m)

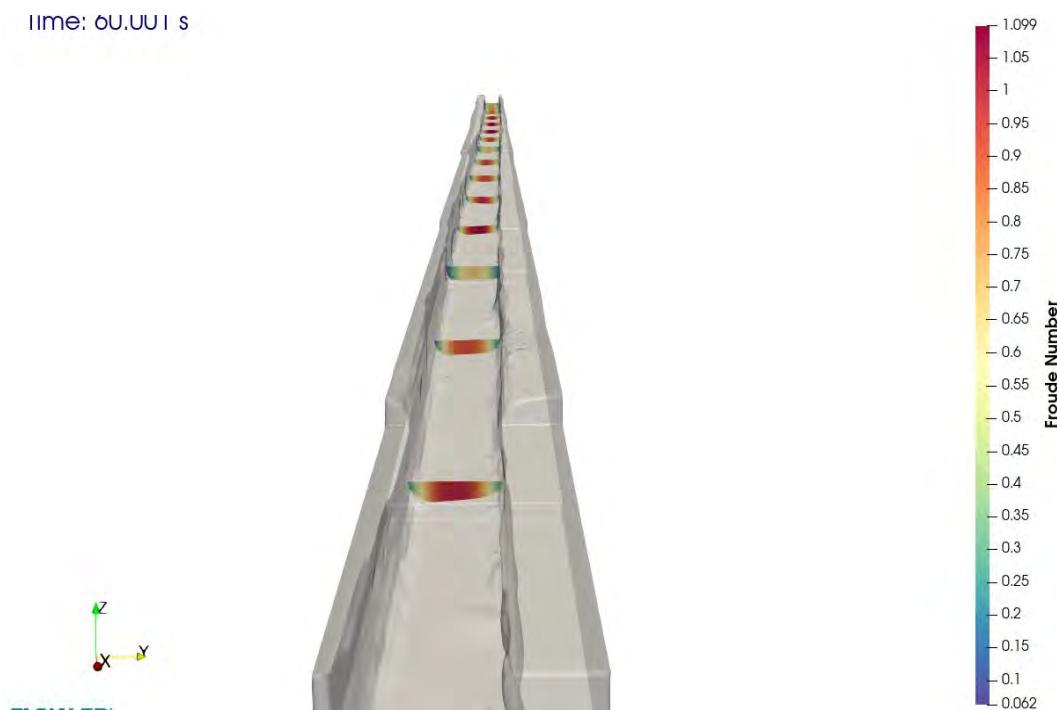
Figura 119

Corte transversal al inicio y final del canal cada 2 metros del número de Froude

Time: 60.001 s



Time: 60.001 s



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Comprobación de número de Froude con ecuaciones unidimensionales vs simulación 3D

Tabla 36

Resumen cálculo de Froude ecuación unidimensional y FLOW 3D.

Nº	Prog (m)	Tirante	Vm-Manning (m/s)	Gravedad	Froude	Froude Flow 3D
1	"0+01"	0.05	0.647	9.81	0.924	0.880
2	"0+03"	0.052	0.660	9.81	0.924	0.890
3	"0+05"	0.065	0.729	9.81	0.913	0.888
4	"0+07"	0.07	0.748	9.81	0.903	0.878
5	"0+09"	0.08	0.786	9.81	0.887	0.862
6	"0+11"	0.09	0.817	9.81	0.869	0.844
7	"0+13"	0.07	0.748	9.81	0.903	0.878
8	"0+15"	0.045	0.613	9.81	0.923	0.898
9	"0+17"	0.055	0.678	9.81	0.923	0.906
10	"0+19"	0.05	0.647	9.81	0.924	0.907
11	"0+21"	0.052	0.660	9.81	0.924	0.907
12	"0+23"	0.053	0.666	9.81	0.923	0.906
13	"0+25"	0.05	0.647	9.81	0.924	0.907
14	"0+27"	0.06	0.705	9.81	0.919	0.902
15	"0+29"	0.065	0.727	9.81	0.910	0.893

Nota: elaboración propia

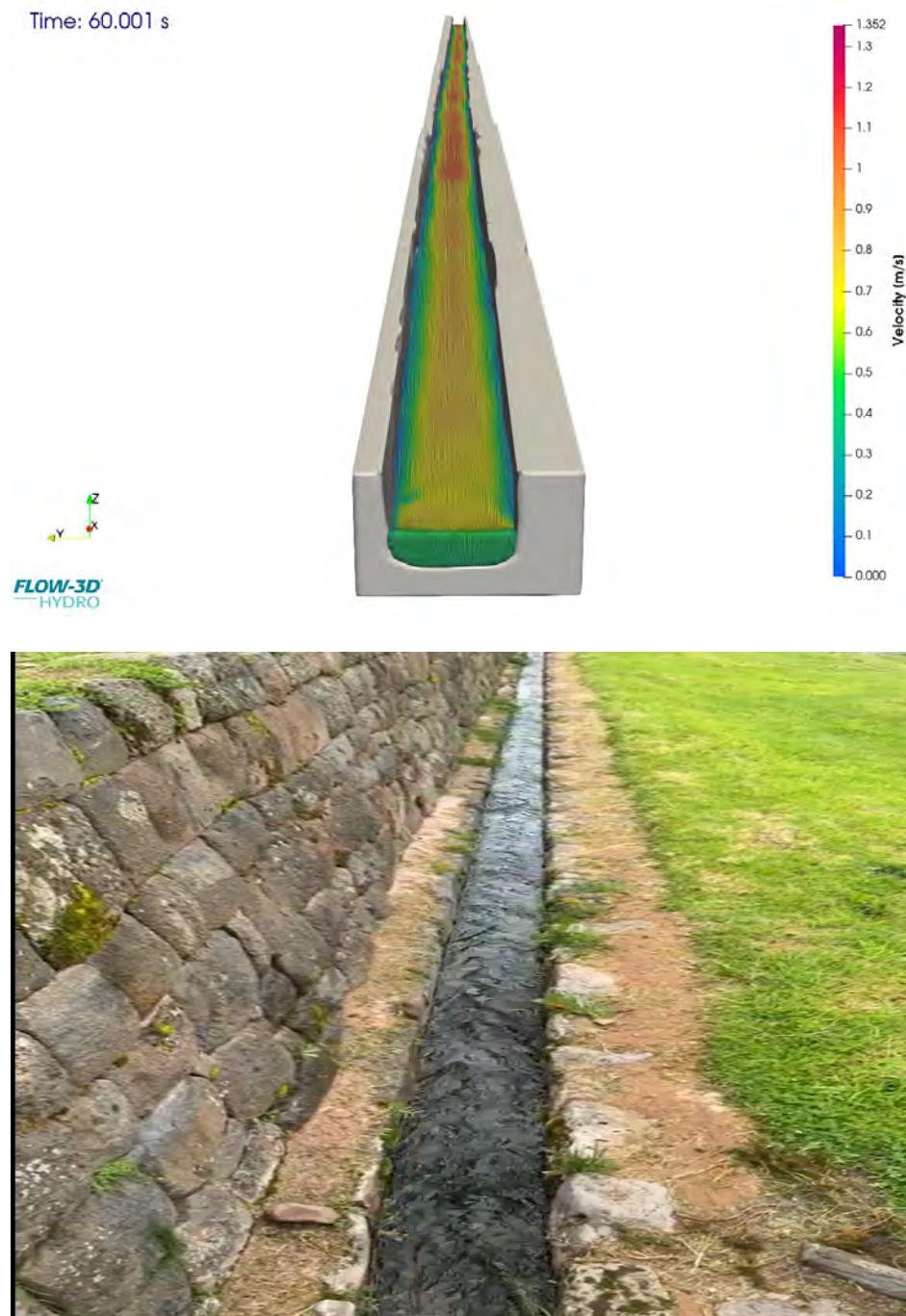
Los resultados obtenidos muestran una buena concordancia entre los valores simulados y los registrados experimentalmente, lo que otorga confiabilidad al modelo numérico. Las ligeras discrepancias se deben, en parte, al enfoque unidimensional empleado, que no considera las variaciones tridimensionales del flujo presentes en la realidad.

A partir de los cortes longitudinales y transversales, se identificaron variaciones en el número de Froude, asociadas a las irregularidades geométricas del canal, propias de su construcción con piedras y las deformaciones naturales. A pesar de estas variaciones, en la mayor parte del canal se mantiene un régimen subcrítico ($Fr < 1$). Sin embargo, se detectan zonas donde el flujo tiende a generar condiciones cercanas a un resalto hidráulico, aunque sin alcanzar un régimen supercrítico, manteniéndose globalmente dentro del comportamiento subcrítico.

Comparación entre el canal real y el canal simulado

La comparación entre el canal real y el modelo simulado se basa en la incorporación precisa de la geometría mediante escaneo LIDAR, lo que permitió capturar con gran fidelidad las irregularidades propias de su construcción, como rugosidades, deformaciones y disposición no uniforme de las piedras. Esto garantiza que el modelo tridimensional represente con realismo las condiciones físicas del canal inca.

Gracias a este nivel de detalle, los resultados de la simulación reflejan de forma coherente el comportamiento hidráulico observado en campo, tanto en términos de distribución de velocidades como de variaciones en el número de Froude y tirantes. La inclusión de estas irregularidades en la geometría permitió identificar zonas críticas, como pequeñas transiciones, contracciones o condiciones cercanas al resalto hidráulico, que habrían pasado desapercibidas en un modelo idealizado.

Figura 120*Comparación Canal real y Canal simulado*

Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc. <https://www.flow3d.com>

4.1.5.3.2 Simulación hidráulica del acueducto principal de Tipón en usando FLOW – 3D

Se llevó a cabo una simulación numérica del comportamiento hidráulico del acueducto principal de Tipón mediante el software FLOW-3D. El modelo abarcó un tramo representativo de 50 metros, en el cual se analizaron las condiciones del flujo a lo largo del canal. Con base en la aplicación de la ecuación de continuidad, se identificó una transición del régimen supercrítico al subcrítico en la progresiva 00+46 m, atribuida a variaciones geométricas del canal y a pérdidas de energía localizadas que afectan la dinámica del flujo.

El número de Reynolds obtenido en la simulación se ubicó dentro del régimen turbulento ($Re > 4000$), lo cual es coherente con la rugosidad de las superficies de piedra y las condiciones físicas del canal incaico. Este comportamiento también fue observado en campo, donde el flujo muestra una fuerte interacción con los límites irregulares del canal.

Según Wright (2006), en la Sección 4 del canal principal restaurado, las pendientes varían entre 6 % y 16 %, con un coeficiente de rugosidad de Manning de 0,020, y dimensiones que oscilan entre 0,65 y 0,8 pies de ancho y 0,8 a 1 pie de profundidad.

En contraste, las mediciones realizadas en campo para el presente estudio arrojaron una pendiente promedio de 7,5 %, un ancho de 0,23 m, un tirante medio de 0,26 m, y se consideró un coeficiente de Manning de $n = 0.0165 s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$, valor más adecuado para reflejar la textura rugosa de la piedra. Aunque existen diferencias, los resultados se encuentran dentro de un rango compatible, lo que respalda la consistencia del modelo y la representatividad de los datos obtenidos.

Análisis del Caudal

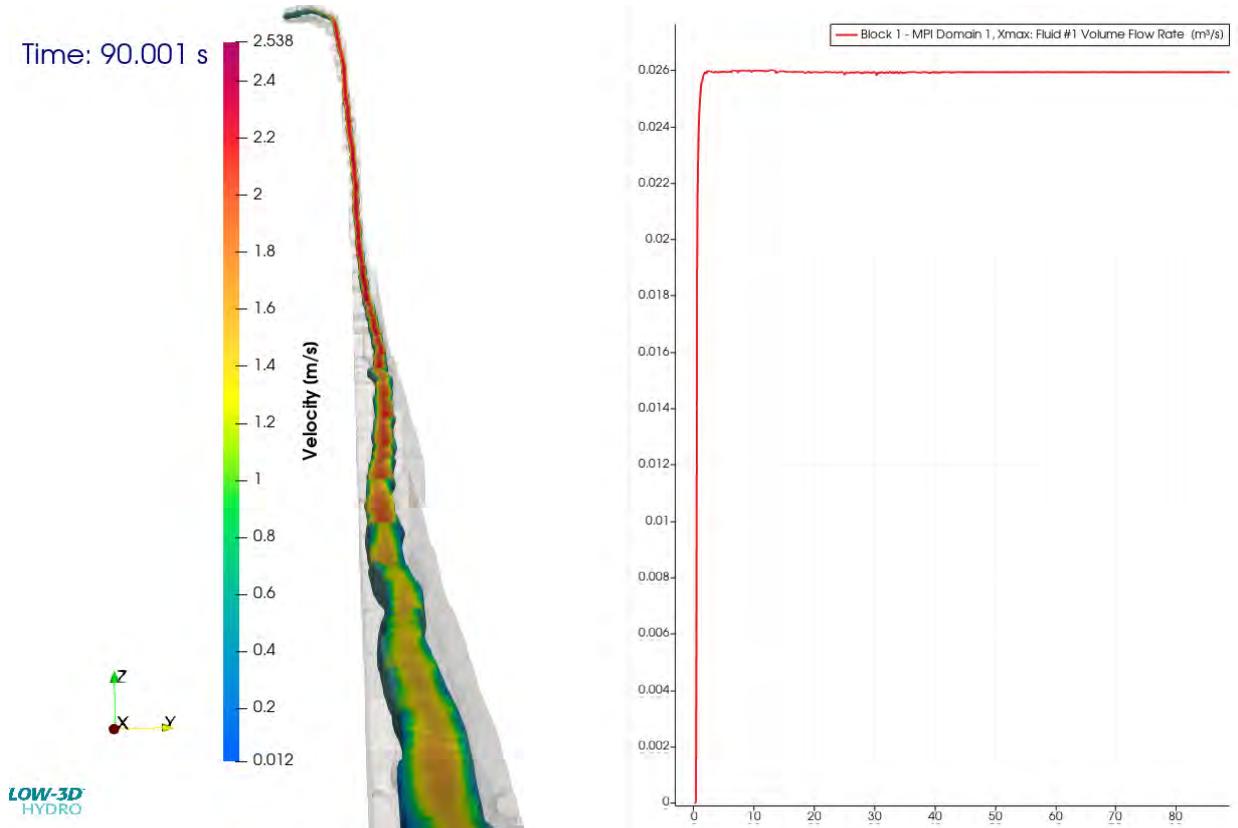
El modelo numérico mostró un caudal prácticamente constante a lo largo del tramo simulado. Según Wright (2006), el caudal estimado en el acueducto principal es de

aproximadamente $0.92 \text{ ft}^3/\text{s}$ ($\approx 0.02605 \text{ m}^3/\text{s}$), basado en mediciones de campo. En la simulación realizada, se obtuvo un caudal de $0.0260 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo esta leve diferencia atribuible a las condiciones de contorno impuestas.

En este caso, se definió como condición de entrada un tirante constante de 0.22 m , correspondiente al flujo máximo observado. Esta configuración se adoptó para representar una condición de caudal máximo de $0.026 \text{ m}^3/\text{s}$. De este modo, el software FLOW-3D calculó el caudal resultante en función del tirante de entrada, la geometría del canal y las propiedades del flujo, lo que explica la ligera discrepancia con los valores reportados en la bibliografía.

Figura 121

Gráfico del caudal $0.026 \text{ m}^3/\text{s}$ a lo largo del recorrido del acueducto simulado



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

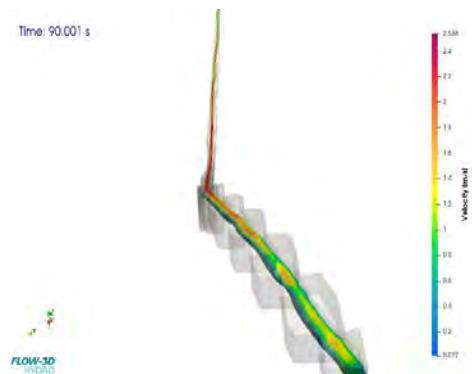
<https://www.flow3d.com>. Se puede apreciar que al inicio el caudal va aumentando hasta llegar al valor de 0.026m³/s donde después permanece constante.

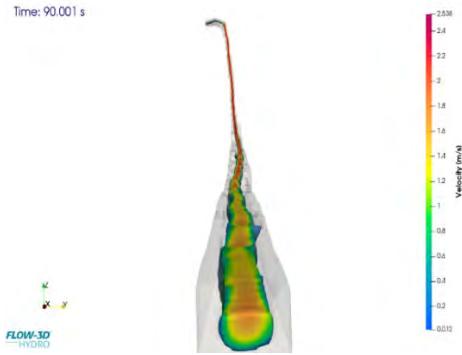
Análisis de Velocidad

La distribución de la velocidad en el acueducto principal de Tipón se visualiza en la siguiente figura, a través de una isosuperficie generada en el entorno de simulación numérica. Esta representación permite identificar con claridad las zonas de mayor y menor velocidad dentro del volumen del canal, revelando el patrón tridimensional del flujo. La figura evidencia una aceleración en el núcleo del canal y velocidades reducidas hacia los bordes, en concordancia con la fricción lateral y de fondo propias de las paredes de piedra. Este comportamiento respalda la eficiencia hidráulica del diseño original, incluso bajo condiciones geométricas irregulares propias de la infraestructura incaica.

Figura 122

Isosuperficie de Velocidad Acueducto al inicio y final de tramo simulado.





Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. En la parte de arriba se aprecia su recorrido inicial y abajo su recorrido final.

Como se mencionó previamente, se identifica la presencia de un resalto hidráulico en la progresiva 0+46 m del acueducto, así como una contracción hidráulica al inicio del recorrido, en la progresiva 0+05 m. En las siguientes secciones se analizará el comportamiento de la velocidad en ambas zonas, con el propósito de comprender cómo estas condiciones afectan el régimen de flujo a lo largo del canal.

Contracción Hidráulica

En la progresiva 0+05 m se observa una reducción en la sección transversal del canal, lo que provoca un aumento local de la velocidad del flujo. Este fenómeno, denominado contracción hidráulica, se explica mediante la ecuación de continuidad, según la cual, al disminuir el área de paso, el flujo debe acelerarse para conservar el caudal. Como consecuencia, se produce una disminución del tirante y un incremento en el número de Froude, que puede superar el valor de uno, marcando una transición del régimen subcrítico al supercrítico.

Figura 123

Isosuperficie velocidad la parte donde ocurre contracción hidráulica



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Se identifica un incremento en la velocidad del flujo debido a la presencia de una contracción hidráulica en el canal. Este fenómeno ocurre cuando el área disponible para el paso del agua disminuye, lo que induce un aumento en la energía cinética del flujo y, en consecuencia, una mayor velocidad, en concordancia con el principio de conservación de masa establecido por la ecuación de continuidad.

Del mismo modo, el incremento de la velocidad del flujo conlleva una disminución del tirante, y a la inversa, el aumento del tirante implica una reducción de la velocidad. Este comportamiento responde al principio de conservación de la energía, tal como lo establece la ecuación de Bernoulli aplicada a flujo en canales abiertos, donde se mantiene el equilibrio entre energía cinética y energía potencial.

Este tipo de comportamiento es característico de las zonas de transición geométrica, donde la reducción del ancho del canal genera una aceleración del flujo, afectando directamente los

perfíles de velocidad y tirante. Para examinar con mayor detalle esta condición, se realizaron cortes longitudinales y transversales en el tramo afectado, destacando la progresiva 0+05 m, donde se produce una contracción hidráulica significativa.

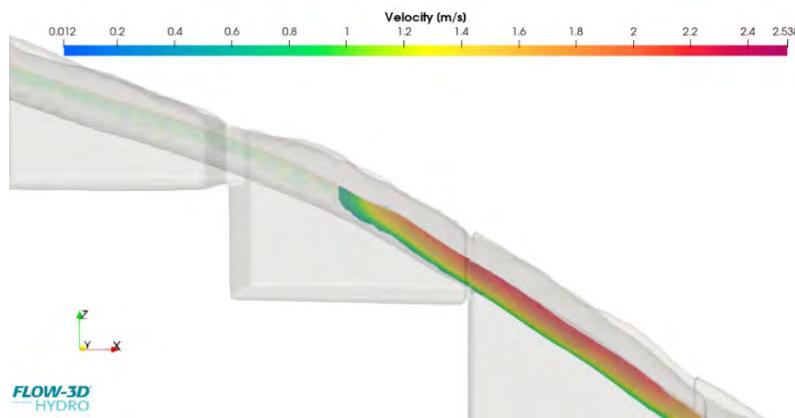
En la figura se aprecia cómo, ante la disminución de la sección, el flujo responde incrementando su velocidad, alcanzando valores superiores a 2,5 m/s en el núcleo del canal. La representación vectorial y la escala cromática evidencian esta aceleración progresiva, asociada a una transición de régimen subcrítico a supercrítico ($Fr > 1$), en concordancia con la teoría de conservación de la masa. Este análisis permite visualizar con claridad cómo las variaciones geométricas del canal impactan en la dinámica del flujo, especialmente en estructuras hidráulicas con geometría compleja como las incaicas.

Distribución de velocidades en la zona de contracción hidráulica (progresiva 0+05 m). Se observa un incremento progresivo de la velocidad del flujo en correspondencia con la reducción de sección, generando condiciones de flujo supercrítico en el tramo estrechado. Datos obtenidos a los 90,001 s de simulación en FLOW-3D.

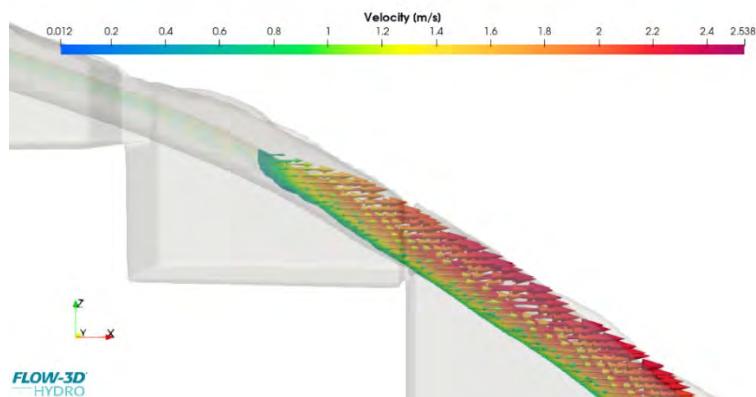
Figura 124

Corte longitudinal Velocidad y vectores en la parte de la contracción Hidráulica.

Time: 90.001 s



Time: 90.001 s

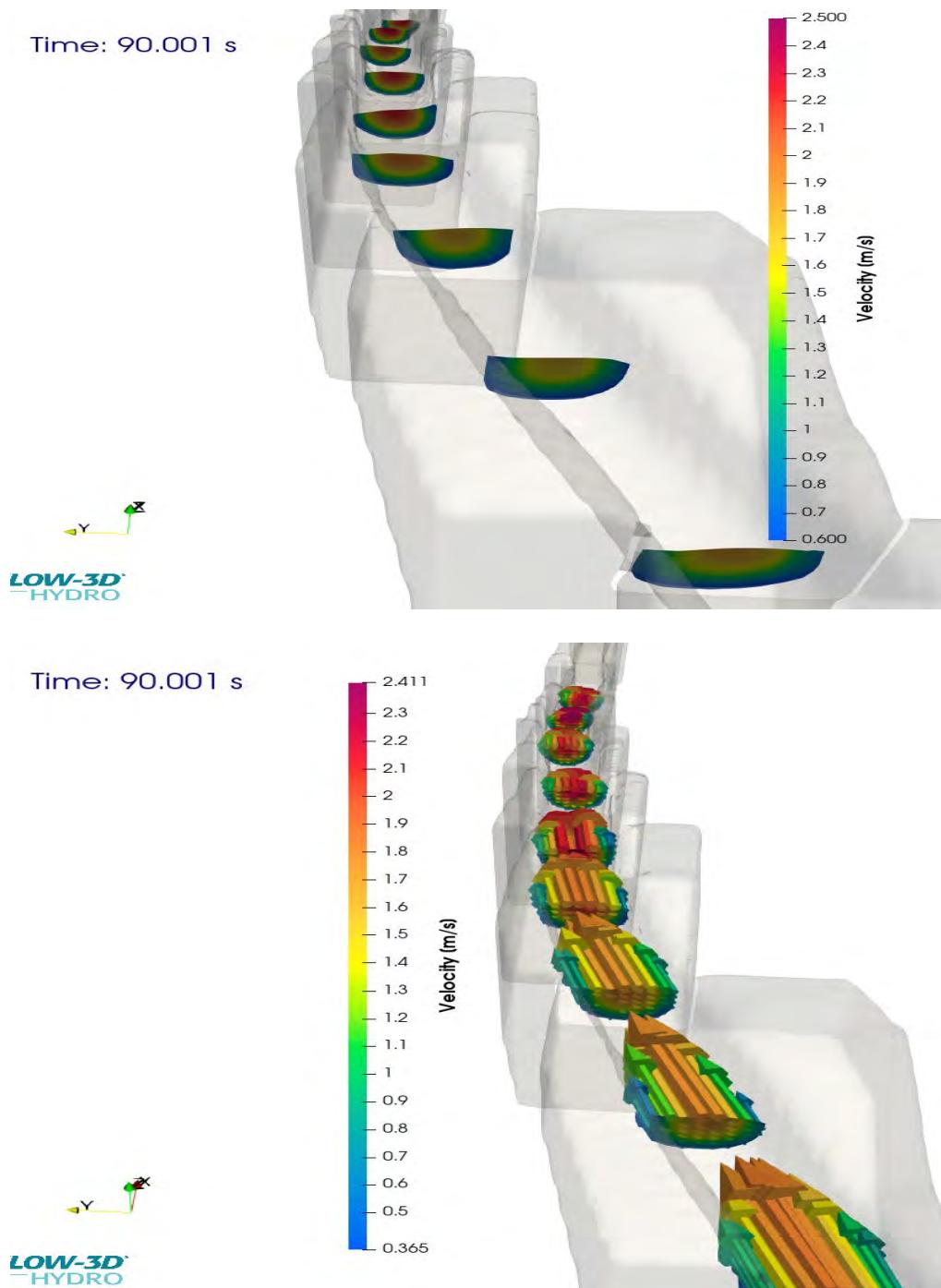


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 125

Cortes transversales más vectores cada 0.5m en la zona de la contracción hidráulica

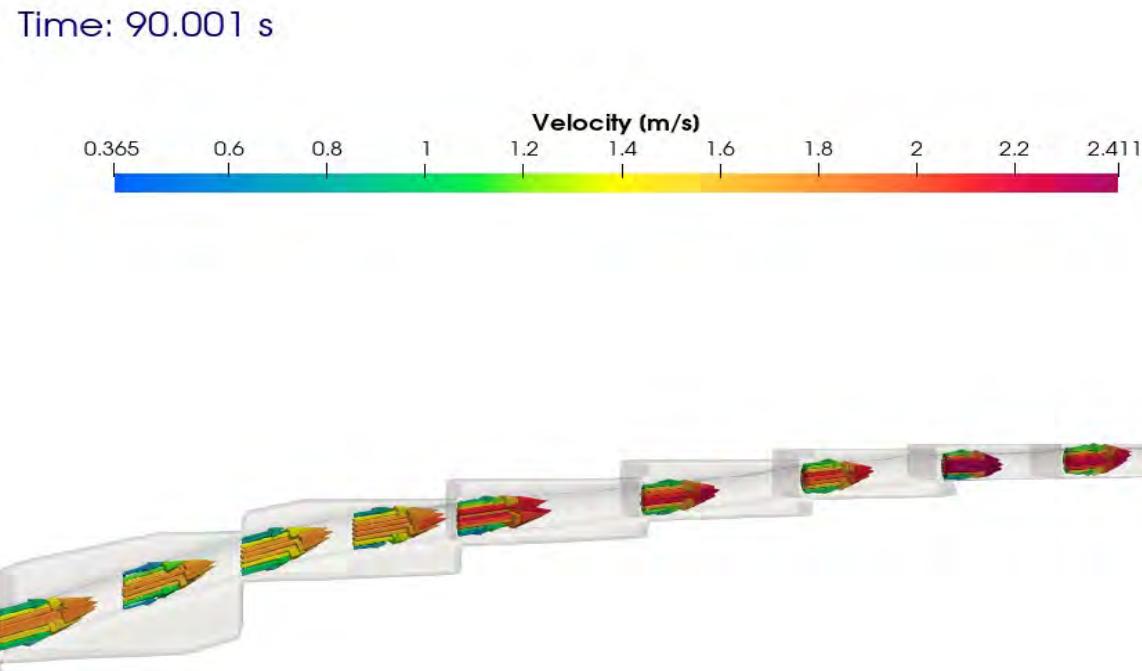


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 126

Corte transversal más vectores vista en planta zona de contracción hidráulica



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

En las figuras se observa que las secciones presentan una distribución típicamente parabólica o semicircular, con velocidades máximas localizadas en la zona central del canal y una disminución progresiva hacia los bordes, producto de los efectos de fricción en contacto con las superficies laterales de piedra. Esta configuración es coherente con un flujo plenamente desarrollado, confinado dentro de una geometría relativamente constante en planta.

La representación vectorial del campo de velocidades refuerza esta interpretación, mostrando una alineación predominante de las trayectorias del flujo en dirección longitudinal, sin perturbaciones significativas en el plano transversal. Esta homogeneidad sugiere que, a pesar de las irregularidades propias del canal incaico, el flujo se mantiene estable, favorecido por la pendiente y la forma canalizada de la estructura.

Las magnitudes de velocidad alcanzan valores superiores a 2,3 m/s en el eje central, lo que confirma una condición hidráulica de alta energía, posiblemente posterior a una contracción, pero previa a zonas de disipación como el resalto hidráulico. Este análisis transversal resulta clave para entender cómo se distribuyen las tensiones internas del flujo, cómo varía el perfil de velocidad en función de la sección húmeda, y qué implicancias podría tener esto en términos de erosión localizada o capacidad de transporte de sedimentos.

Resalto Hidráulico

La figura 124 presenta la isosuperficie de velocidades en la zona del resalto hidráulico, identificada en la progresiva 0+46m. Este fenómeno se produce cuando el flujo transita abruptamente de un régimen supercrítico a subcrítico, generando una zona de disipación significativa de energía.

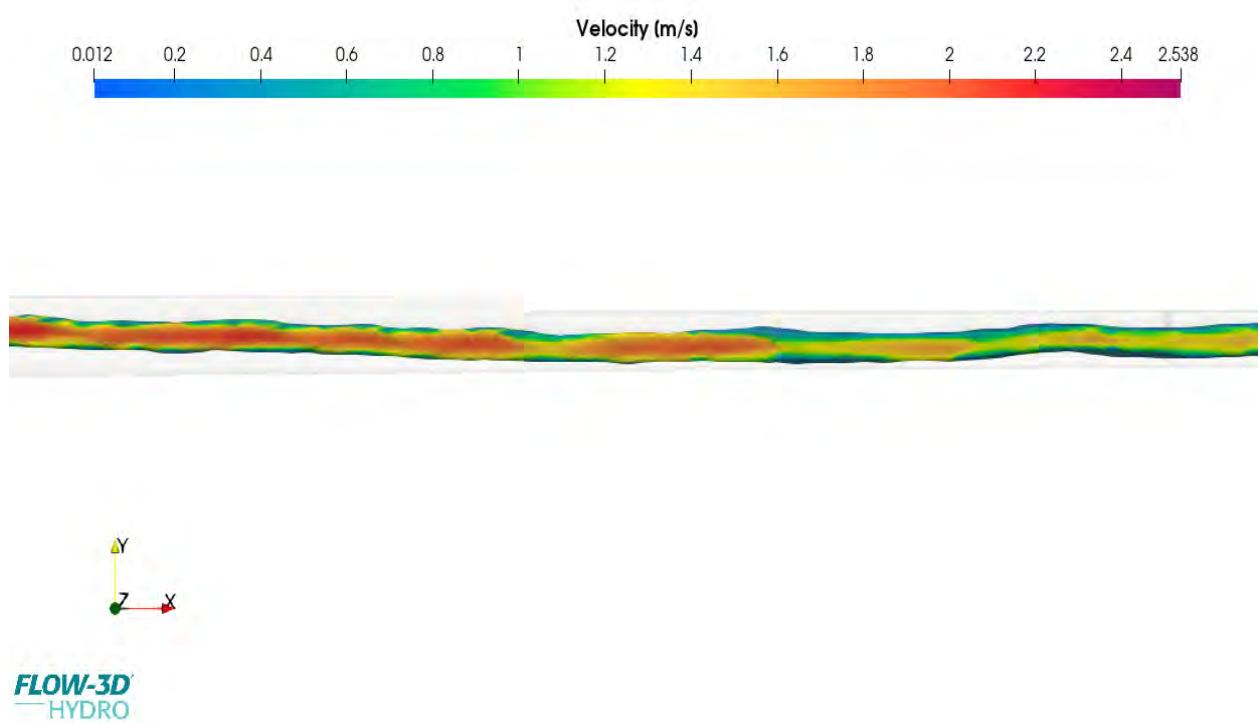
En la representación se observa cómo, aguas arriba del resalto, el flujo presenta velocidades elevadas, reflejadas por tonos rojizos y naranjas que indican valores superiores a 2,2m/s. Inmediatamente después de la transición, se produce una expansión del tirante y una disminución repentina de la velocidad, con predominio de tonos verdes y azules, señalando una clara pérdida de energía cinética y el ingreso a un régimen más estable.

Este tipo de fenómeno, caracterizado por un brusco incremento del tirante y una caída de la velocidad, es común en canales con cambios topográficos o geométricos abruptos, y en este caso particular puede estar asociado tanto al diseño ancestral del canal como a efectos acumulativos del tramo anterior de aceleración. El resalto genera esfuerzos hidráulicos considerables que podrían afectar la integridad estructural de los revestimientos de piedra, además de representar una zona de interés para la disipación natural de energía dentro del sistema.

Figura 127

Isosuperficie velocidad en la zona del resalto hidráulico.

Time: 90.001 s



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Se observa una disminución significativa de la velocidad del flujo, asociada al cambio de régimen provocado por el resalto hidráulico presente en el canal. Este fenómeno se manifiesta como una transición abrupta de flujo supercrítico a subcrítico, caracterizada por un incremento súbito del tirante y una disipación considerable de energía específica. El resalto hidráulico constituye un mecanismo natural de disipación de energía en canales, y su presencia en el sistema hidráulico inca evidencia un conocimiento empírico avanzado de este tipo de fenómenos.

Este comportamiento es coherente con el principio de conservación de la energía, y se explica mediante la ecuación de Bernoulli aplicada al flujo en canales abiertos. En este contexto, a medida que disminuye la velocidad del flujo, aumenta el tirante, y viceversa, manteniéndose el equilibrio energético a lo largo del perfil de corriente. Esta relación es particularmente evidente en el entorno del resalto, donde la pérdida de energía cinética se traduce en un aumento de la energía potencial.

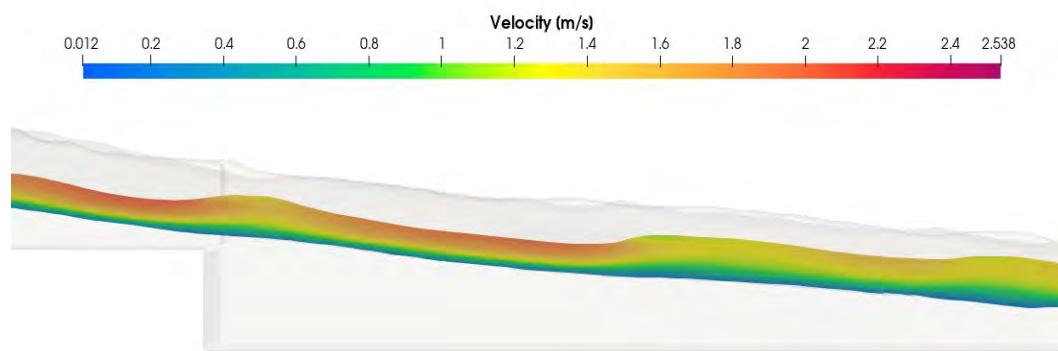
Dado que el tramo analizado presenta una longitud considerable, el estudio detallado del comportamiento hidráulico se ha enfocado en dos secciones representativas del canal, seleccionadas por su relevancia geométrica e hidráulica. Para ello, se realizaron cortes longitudinales y transversales a intervalos regulares de 0.5m, lo que permite observar con mayor precisión la evolución espacial del flujo, así como identificar las variaciones en la velocidad, el tirante y el régimen hidráulico a lo largo del canal.

En el caso específico de la progresiva 0+46 m, donde se desarrolla el resalto hidráulico, los cortes permiten visualizar la zona de transición energética, evidenciando tanto la brusca elevación del nivel del agua como la reducción de la velocidad. Esta representación resulta clave para entender el comportamiento tridimensional del flujo en zonas críticas, especialmente en un canal con geometría irregular como el estudiado, donde la piedra labrada y las condiciones constructivas influyen directamente en el patrón hidráulico:

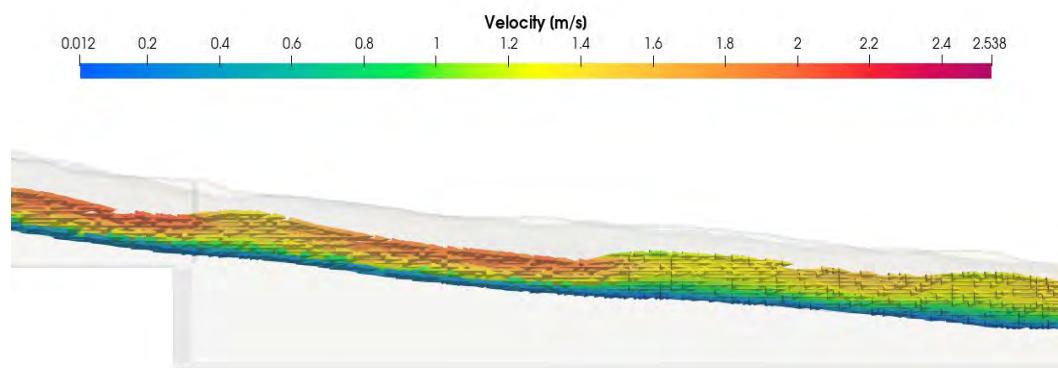
Figura 128

Corte longitudinal Velocidad más vectores en la zona del resalto Hidráulico.

Time: 90.001 s



Time: 90.001 s



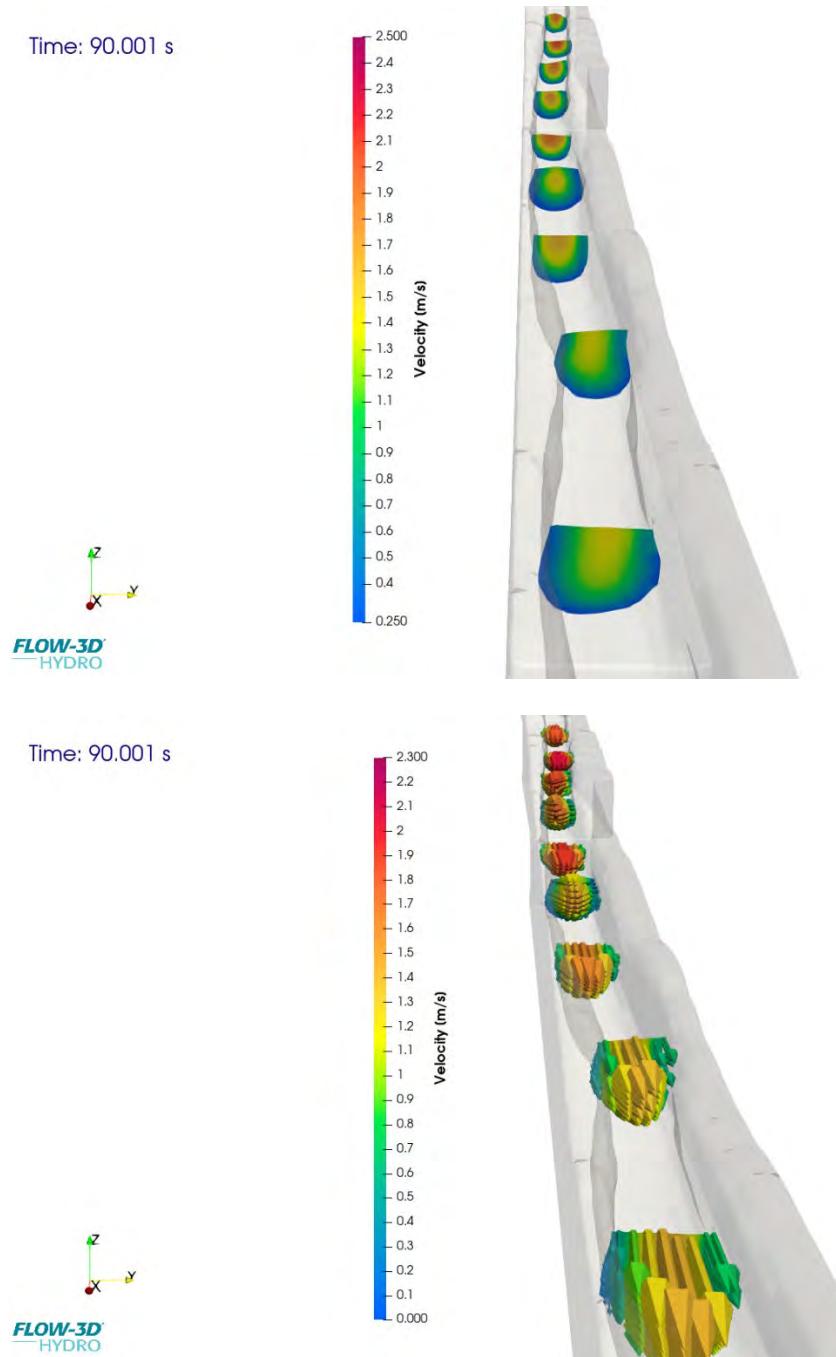
FLOW-3D®
HYDRO

Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 129

Corte Transversal más vectores velocidad cada 0.5m en la parte del resalto Hidráulico

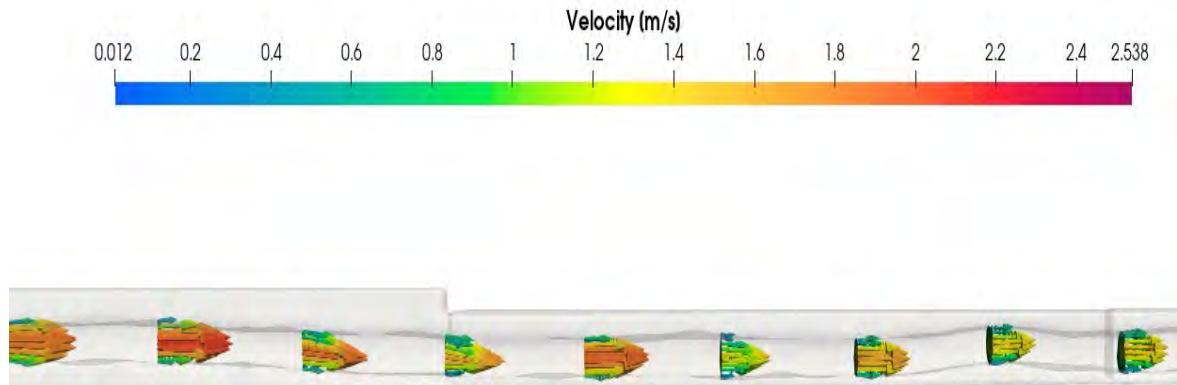


Nota: Extraido de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 130

Corte transversal más vectores vista en planta zona de resalto hidráulico



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

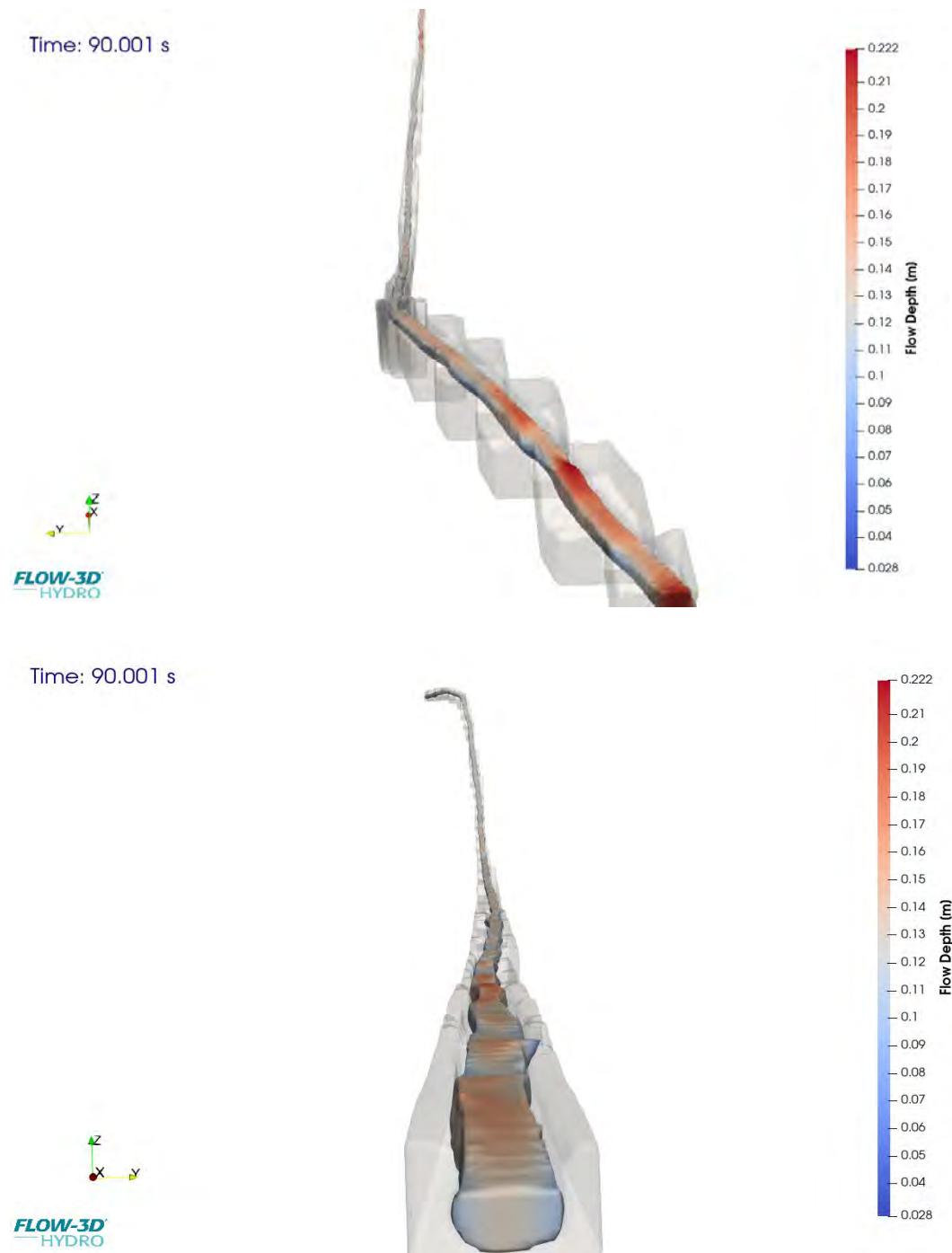
<https://www.flow3d.com>.

Análisis del Tirante

Para una comprensión integral del comportamiento hidráulico del canal inca, no basta con analizar únicamente la velocidad del flujo; es igualmente importante considerar la variación del tirante a lo largo del acueducto. Este parámetro permite identificar zonas de aceleración, transición y disipación de energía, lo que ofrece una visión más completa del régimen de flujo.

En este estudio, se analizó el perfil del tirante en todo el tramo simulado, con especial atención a dos zonas críticas: la contracción en la progresiva 0+05 m y el resalto hidráulico en la 0+46 m, donde se registran cambios significativos en la profundidad del flujo.

La figura siguiente muestra la isosuperficie del tirante obtenida mediante simulación numérica, donde se aprecian claramente las variaciones del nivel del agua en respuesta a las condiciones geométricas.

Figura 131*Isosuperficie Tirante vista al inicio y final del acueducto simulado*

Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Asimismo, esta propiedad fue analizada en las zonas más relevantes del canal, específicamente en la región de contracción y en el área correspondiente al resalto hidráulico.

Contracción Hidráulica. En la progresiva 0+05 m, donde se presenta una contracción hidráulica, se observa una disminución del tirante como consecuencia del incremento de la velocidad del flujo. Esta relación inversa entre velocidad y profundidad es consistente con el principio de conservación de la energía, y refleja cómo la reducción en la sección transversal obliga al flujo a adaptarse hidráulicamente, generando un perfil más estrecho y superficial.

Figura 132

Isosuperficie Tirante zona de contracción hidráulica



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

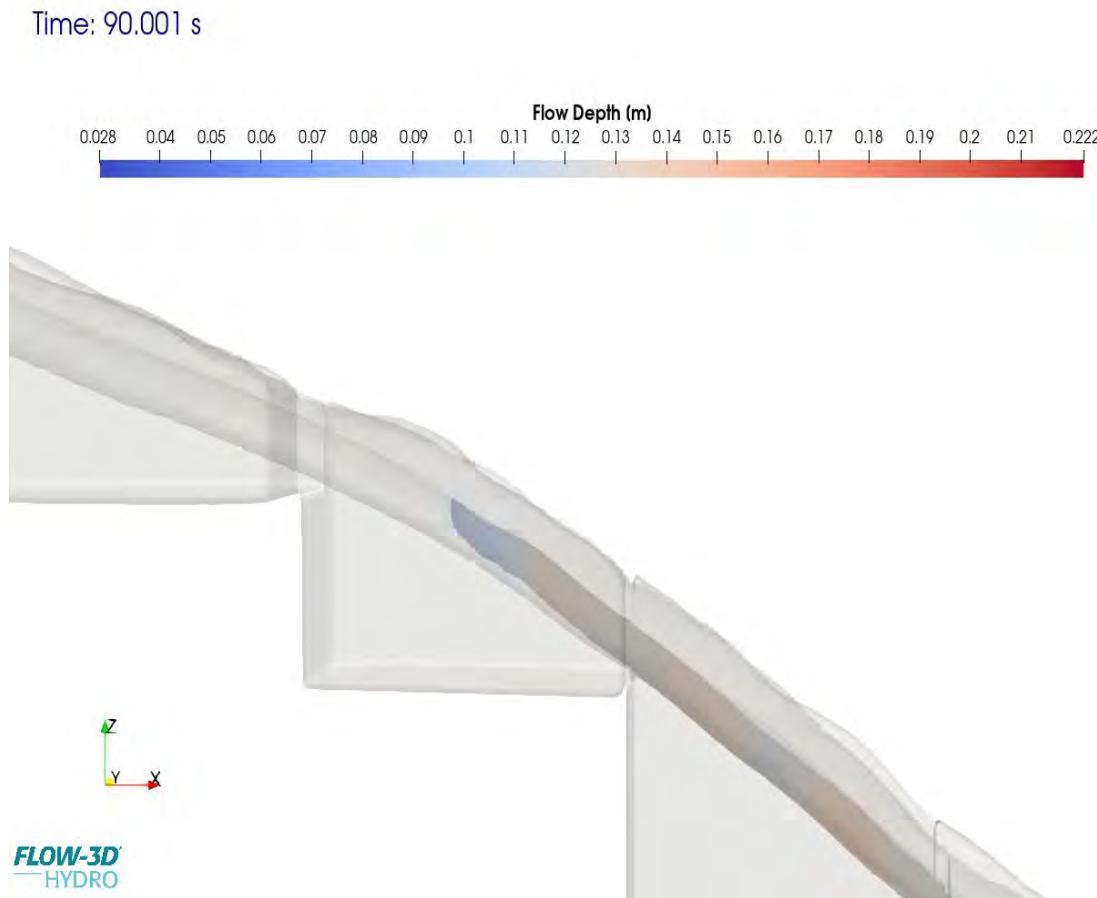
<https://www.flow3d.com>.

Se observa una reducción del tirante en la zona de contracción hidráulica, producto del aumento de la velocidad del flujo generado por la disminución en el área de paso. Este

comportamiento es coherente con la dinámica de flujo en canales abiertos y responde al principio de conservación de la energía. A pesar de tratarse de un canal incaico con geometría irregular, el sistema muestra una adaptación hidráulica eficiente, evidenciando el conocimiento empírico aplicado en su diseño. Esto se ve más a detalle en sus cortes longitudinales y transversales.

Figura 133

Perfil longitudinal Tirante zona de contracción hidráulica

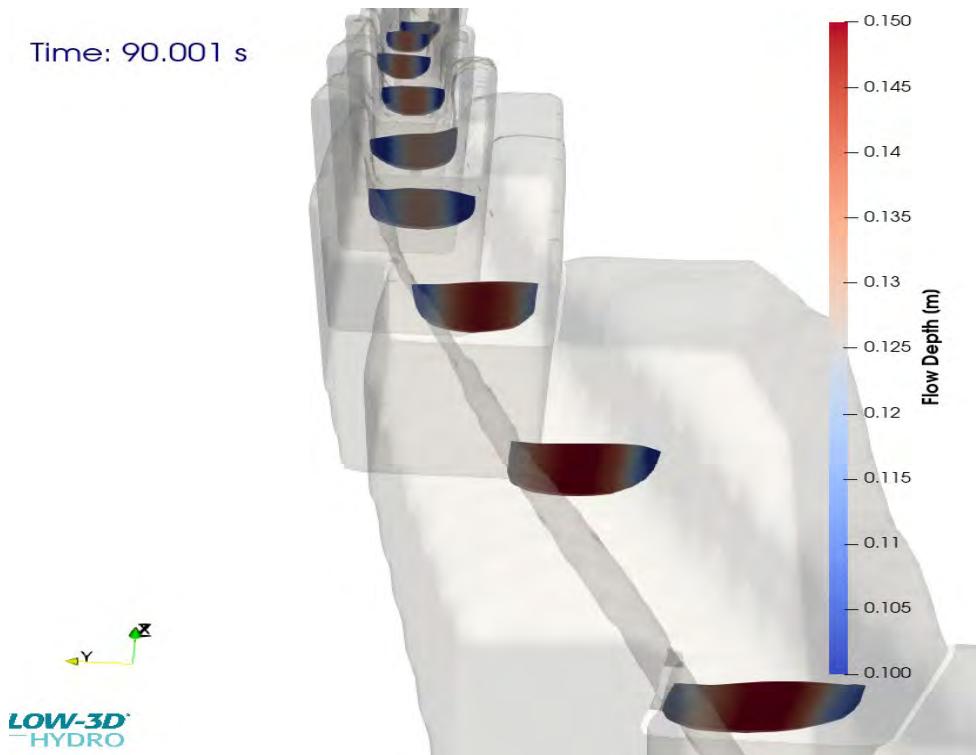


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 134

Corte transversal Tirante zona de contracción hidráulica.



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Del análisis de los cortes longitudinales se observa cómo el flujo se adapta a las variaciones geométricas del canal. En la zona de contracción, la velocidad aumenta y el tirante disminuye, mientras que en el resalto hidráulico ocurre lo contrario: el tirante se incrementa bruscamente y la velocidad se reduce.

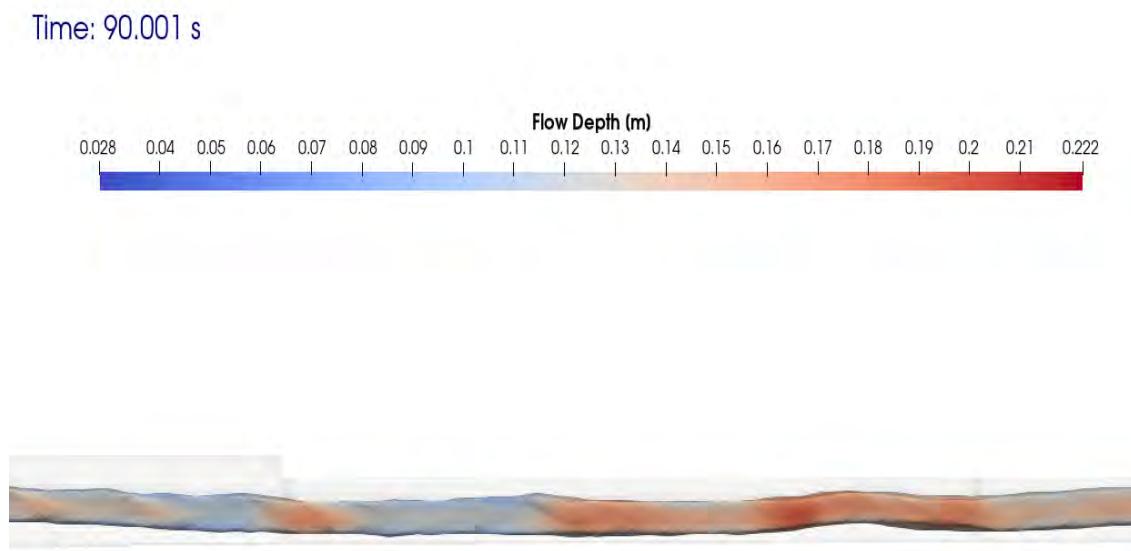
Los cortes transversales muestran una distribución de velocidades mayor en el eje central y menor hacia los bordes, debido a la fricción con las paredes de piedra. En conjunto, estos cortes permiten visualizar con claridad la transición entre régimenes y la respuesta hidráulica del flujo frente a las irregularidades del canal.

Resalto Hidráulico. En la progresiva 0+46 m se observa un incremento abrupto del tirante, asociado al fenómeno del resalto hidráulico. Esta transición refleja el paso de un flujo en régimen supercrítico a subcrítico, donde parte de la energía cinética del flujo se disipa, traduciéndose en un aumento significativo de la profundidad.

La isosuperficie del tirante generada mediante simulación permite visualizar esta variación con claridad. En el tramo previo al resalto, el flujo presenta un tirante reducido, correspondiente a altas velocidades. Inmediatamente después, el tirante se eleva de forma súbita, estableciéndose un nuevo equilibrio con menor velocidad y mayor profundidad.

Figura 135

Isosuperficie Tirante zona de resalto hidráulico.



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

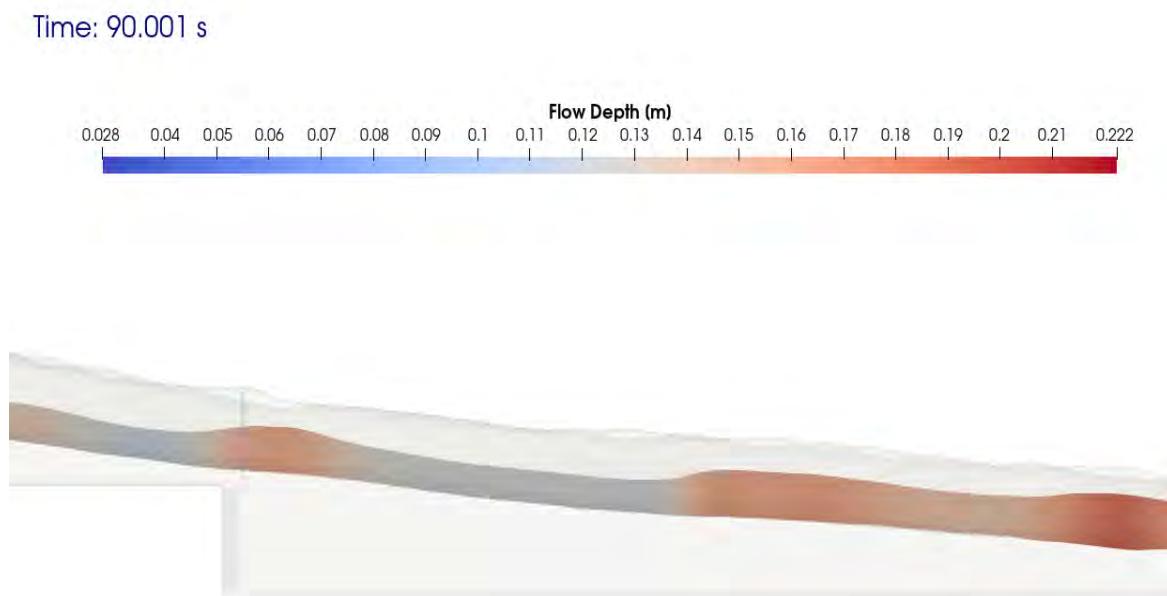
Se observa con claridad un incremento del tirante en la zona del resalto hidráulico, acompañado de una disminución significativa de la velocidad del flujo, lo que evidencia la

transición de régimen supercrítico a subcrítico. Este fenómeno, representado en el canal incaico, cumple una función clave en la disipación de energía, posiblemente aprovechada de forma empírica en su diseño original.

Los cortes longitudinales y transversales realizados permiten visualizar con mayor detalle esta transición, mostrando el aumento abrupto del nivel de agua y la redistribución de velocidades a lo largo y ancho del canal.

Figura 136

Perfil longitudinal Tirante zona de resalto hidráulico

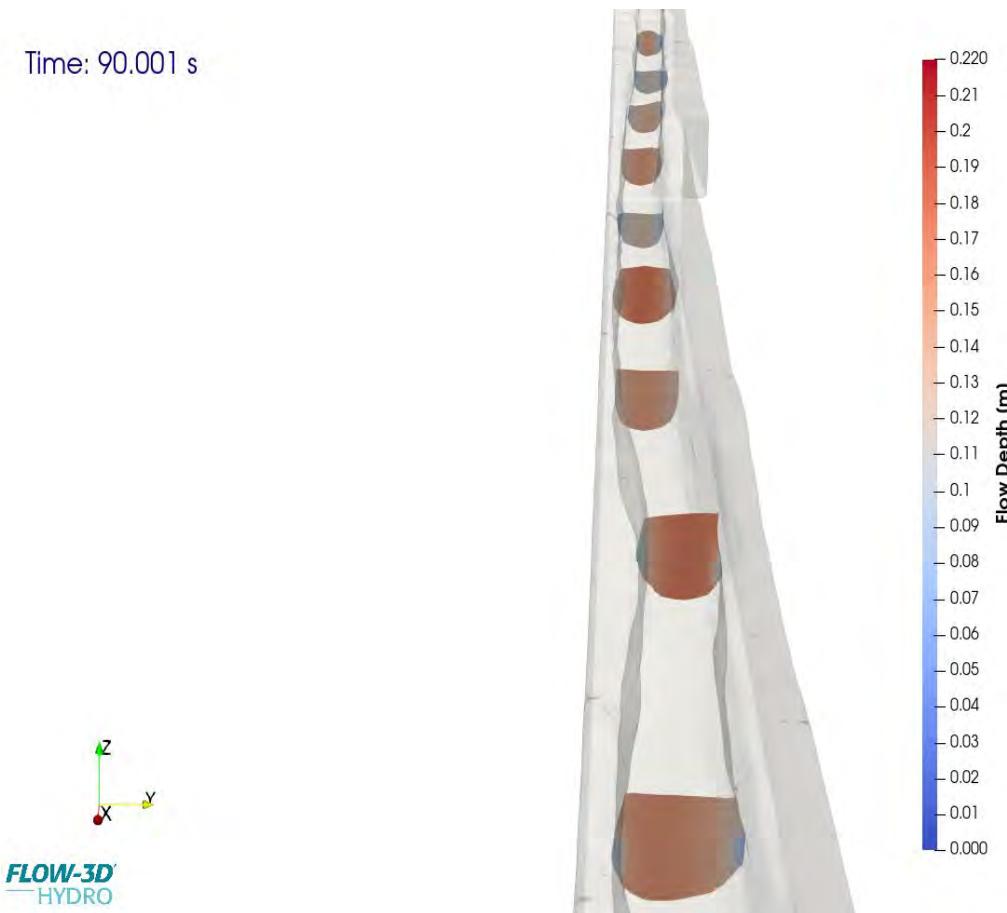


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 137

Corte transversal Tirante cada 0.5m zona de resalto hidráulico



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

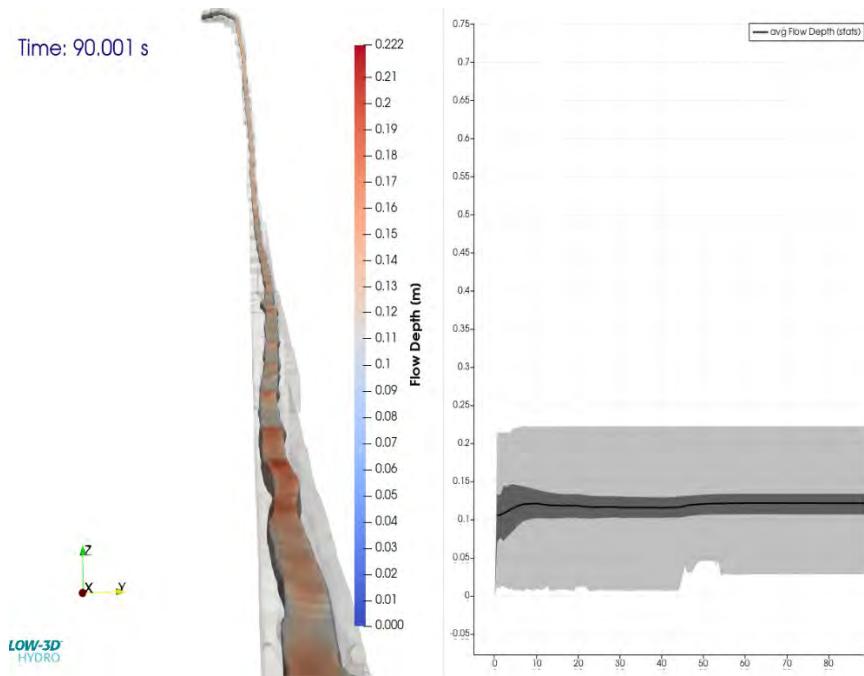
A partir del análisis de los dos fenómenos identificados contracción y resalto hidráulico se puede concluir que los canales construidos en piedra, como los del sistema hidráulico incaico, presentan un comportamiento hidráulico complejo pero estable. A pesar de su geometría irregular, estos canales logran conducir eficientemente el flujo, generando adaptaciones naturales a través de zonas de aceleración y disipación de energía.

Este comportamiento tiene paralelos con los diseños de canales contemporáneos, donde se busca controlar el régimen del flujo y optimizar la pérdida de energía mediante estructuras específicas. Sin embargo, en el caso incaico, estas funciones parecen haberse logrado de forma empírica a través de la geometría del canal y su integración con el terreno, demostrando una comprensión funcional del comportamiento del agua.

El gráfico siguiente representa el promedio del tirante a lo largo de toda la longitud del canal, calculado sobre los 90 segundos de simulación. En él se identifican claramente los valores máximos y mínimos del perfil de agua, lo que permite establecer un tirante medio representativo para el sistema bajo condiciones de flujo permanente.

Figura 138

Gráfico Promedio del Tirante para los 90 segundos de simulación del acueducto



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. Se ve los valores más altos y bajos del Tirante respecto al tiempo en todo su recorrido así como el promedio del tirante en cada segundo del recorrido simulado.

Análisis de Régimen Hidráulico.

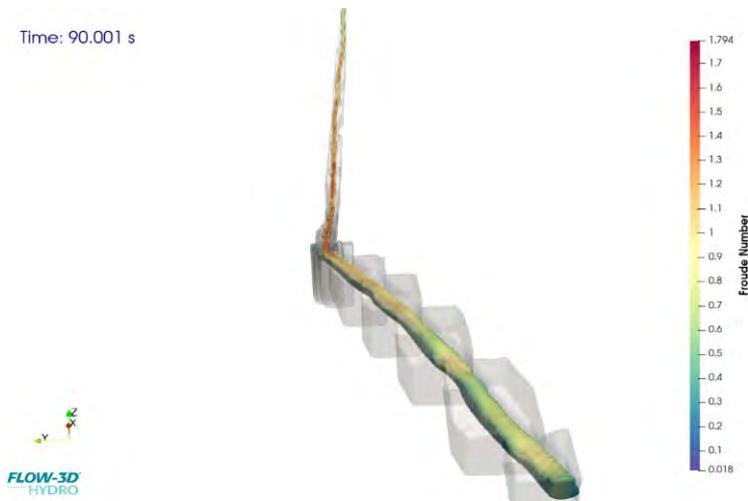
Luego de haber analizado detalladamente la velocidad del flujo y la variación del tirante en las secciones clave del canal, resulta fundamental caracterizar el régimen hidráulico predominante a lo largo del tramo simulado. Para ello, se recurre al estudio del número de Froude, parámetro que permite identificar si el flujo se comporta en régimen subcrítico ($Fr < 1$), crítico ($Fr \approx 1$) o supercrítico ($Fr > 1$).

La distribución del número de Froude refleja cómo el flujo responde a los efectos combinados de la pendiente elevada, la rugosidad y la geometría irregular de los canales de piedra. En este tipo de estructuras, propias del sistema hidráulico incaico, se observa que el régimen varía localmente, alternando entre zonas de aceleración (supercrítico) y zonas de disipación (subcrítico), lo que permite un manejo eficiente del flujo incluso sin estructuras modernas de control.

La figura siguiente muestra la isosuperficie del número de Froude, donde se identifican con claridad las transiciones de régimen a lo largo del canal, especialmente en las zonas de contracción y resalto hidráulico.

Figura 139

Isosuperficie número de Froude al inicio y final del acueducto simulado



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 140

Isosuperficie número de Froude al inicio y final del acueducto simulado



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

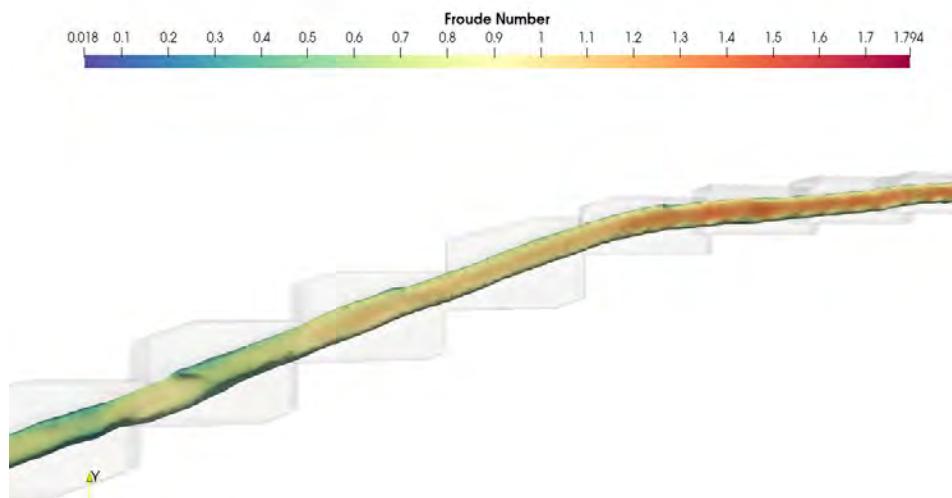
Contracción Hidráulica: En la progresiva 0+05 m del canal, se observa un cambio notable en el régimen del flujo. Debido a la reducción en el ancho efectivo del canal, el agua se ve forzada a acelerar, lo que provoca un aumento del número de Froude. Esta variación puede apreciarse con claridad en la isosuperficie correspondiente, donde el flujo pasa de un régimen subcrítico a supercrítico.

El cambio de régimen se traduce en una transformación del comportamiento hidráulico, el flujo se vuelve más inestable, con mayor velocidad y menor tirante, incrementando su energía cinética. En los canales incaicos construidos en piedra, este fenómeno se presenta de manera natural como resultado de las variaciones geométricas del canal y su integración con el terreno.

A pesar de no contar con estructuras de control hidráulico convencionales, los canales de Tipón logran una transición funcional del régimen de flujo gracias a su diseño empírico y a la rugosidad de sus superficies, lo que contribuye al manejo efectivo del agua.

Figura 141

Isosuperficie número de Froude zona de contracción hidráulica.



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

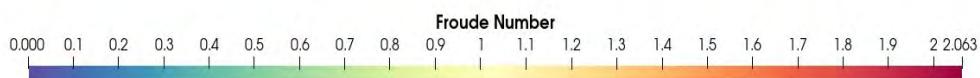
<https://www.flow3d.com>.

También se presentan los cortes longitudinales y transversales a intervalos de 0,5 m, los cuales permiten analizar con mayor detalle el comportamiento del flujo en la zona de contracción, facilitando la interpretación de las variaciones locales del número de Froude y del régimen hidráulico.

Figura 142

Perfil Longitudinal número de Froude zona de contracción hidráulica

Time: 90.001 s

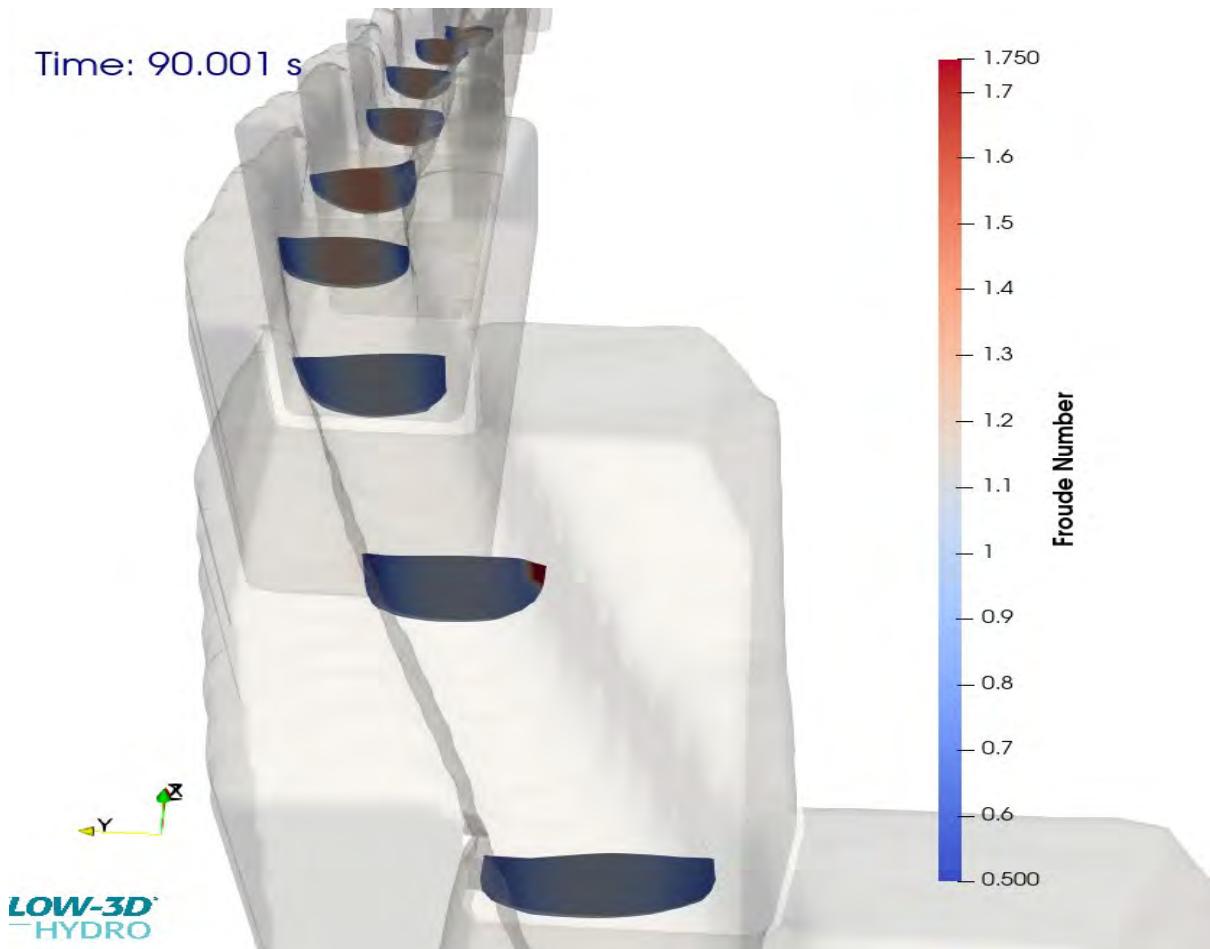


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 143

Corte transversal Número de Froude zona de Contracción Hidráulica



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Este fenómeno se aprecia con mayor claridad en los cortes longitudinales y transversales realizados cada 0,5 m, donde se observa cómo la geometría irregular de las piedras atenúa la intensidad del cambio de régimen. Esta condición podría estar cumpliendo una función hidráulica importante, ya que disminuye la violencia del flujo supercrítico, ayudando a reducir el riesgo de erosión en las superficies internas del canal.

Resalto hidráulico: En el tramo correspondiente a la progresiva 0+46 m se identifica con claridad un resalto hidráulico, evidenciado por una transición abrupta del flujo desde un régimen supercrítico a uno subcrítico, fenómeno típico de canales con pendiente pronunciada y disipación localizada de energía.

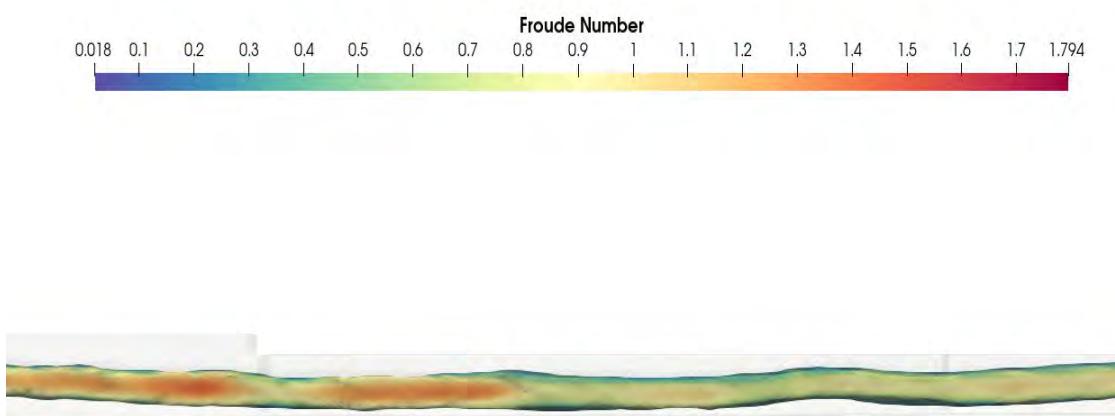
Este cambio hidráulico se manifiesta en un aumento súbito del tirante y una reducción considerable de la velocidad, condiciones que generan una pérdida significativa de energía específica. Dicho comportamiento es coherente con la teoría de flujo en canales abiertos y refleja un manejo hidráulico eficiente, incluso en canales construidos con piedra labrada de geometría irregular, como en el sistema incaico de Tipón.

Este comportamiento tridimensional se representa claramente en la Figura 141, donde se muestra la isosuperficie del número de Froude en la zona del resalto hidráulico.

Figura 144

Isosuperficie Numero de Froude zona de Resalto Hidráulico

Time: 90.001 s



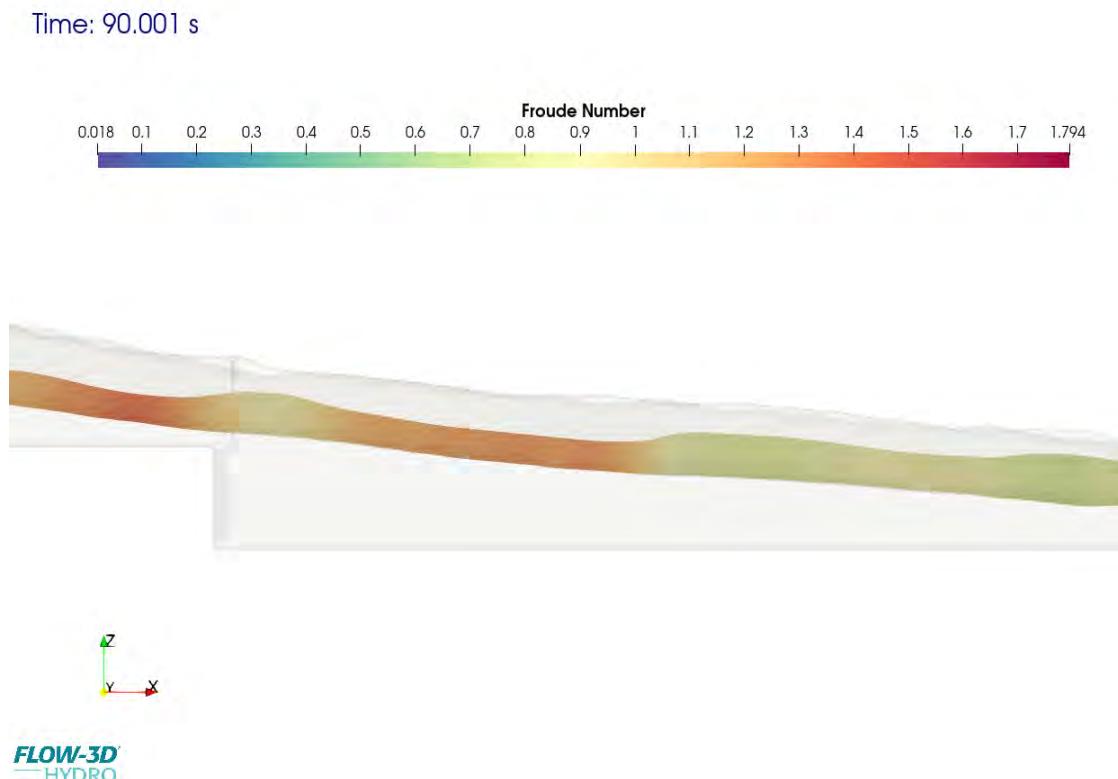
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Este fenómeno se origina principalmente por un cambio en la pendiente del canal, lo que provoca una variación del número de Froude y, en consecuencia, una transición del flujo desde régimen supercrítico a subcrítico. Sin embargo, debido a la rugosidad natural de las superficies de piedra y a la geometría irregular del canal incaico, esta transición no ocurre de manera abrupta. Por el contrario, la fricción adicional generada por las piedras contribuye a disipar la energía del flujo más rápidamente, facilitando el cambio de régimen y controlando la velocidad del agua de forma eficiente.

Figura 145

Perfil Longitudinal Número de Froude zona de Resalto Hidráulico

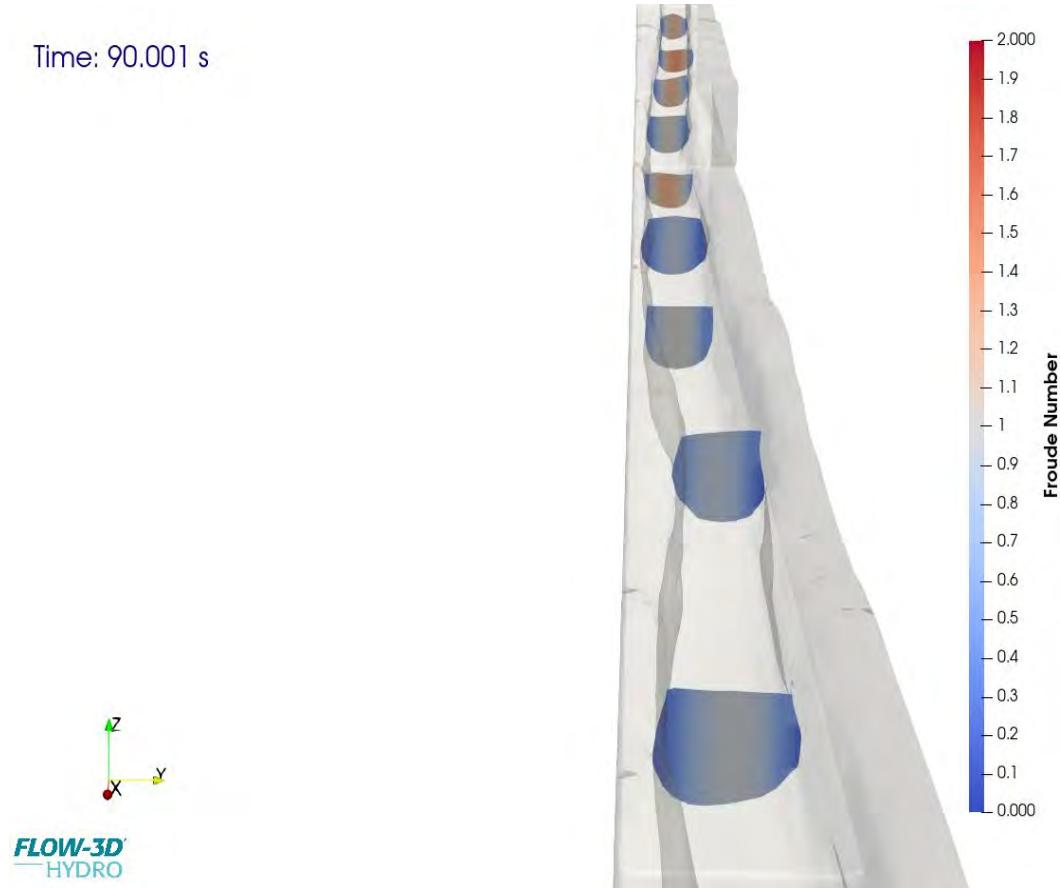


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>.

Figura 146

Corte Transversal Número de Froude zona de Resalto Hidráulico



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

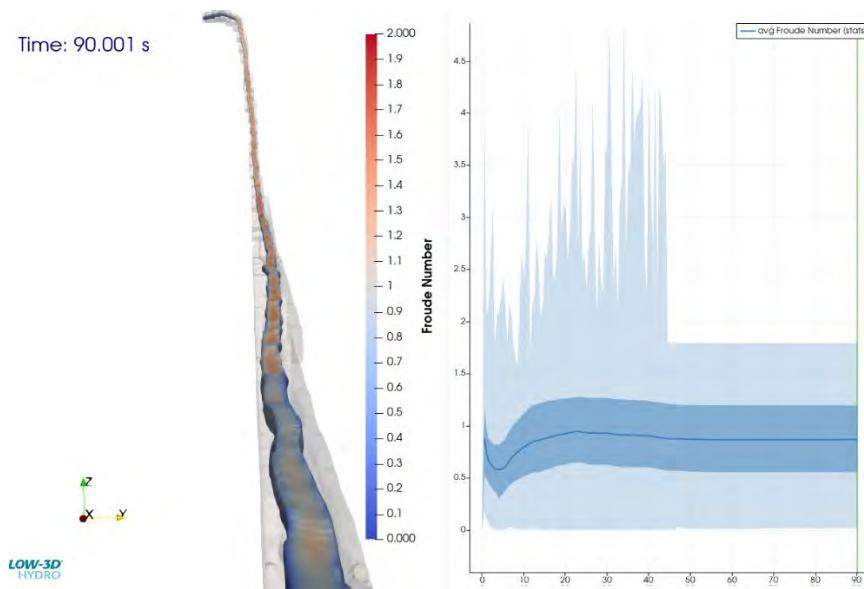
<https://www.flow3d.com>.

Este análisis demuestra que el número de Froude no se comporta de forma uniforme en los canales incaicos, debido a su geometría variable, los cambios de pendiente intencionales y la rugosidad de las superficies de piedra. Estas condiciones permiten que el flujo se autorregule de manera eficiente, facilitando la transición entre regímenes y evitando procesos erosivos intensos. Todo indica que los incas emplearon estos principios de forma empírica para mejorar el control del agua en sistemas de riego, aprovechando la topografía natural y los materiales disponibles.

A continuación, se presenta un gráfico que muestra la evolución del número de Froude a lo largo del canal y durante los 90 segundos de simulación, en el cual se destacan sus valores máximos, mínimos y promedio. Este análisis permite evaluar la severidad de los cambios de régimen y comprender mejor el comportamiento hidráulico en esta estructura ancestral construida con criterios que hoy reconoceríamos como sostenibles y adaptados al entorno.

Figura 147

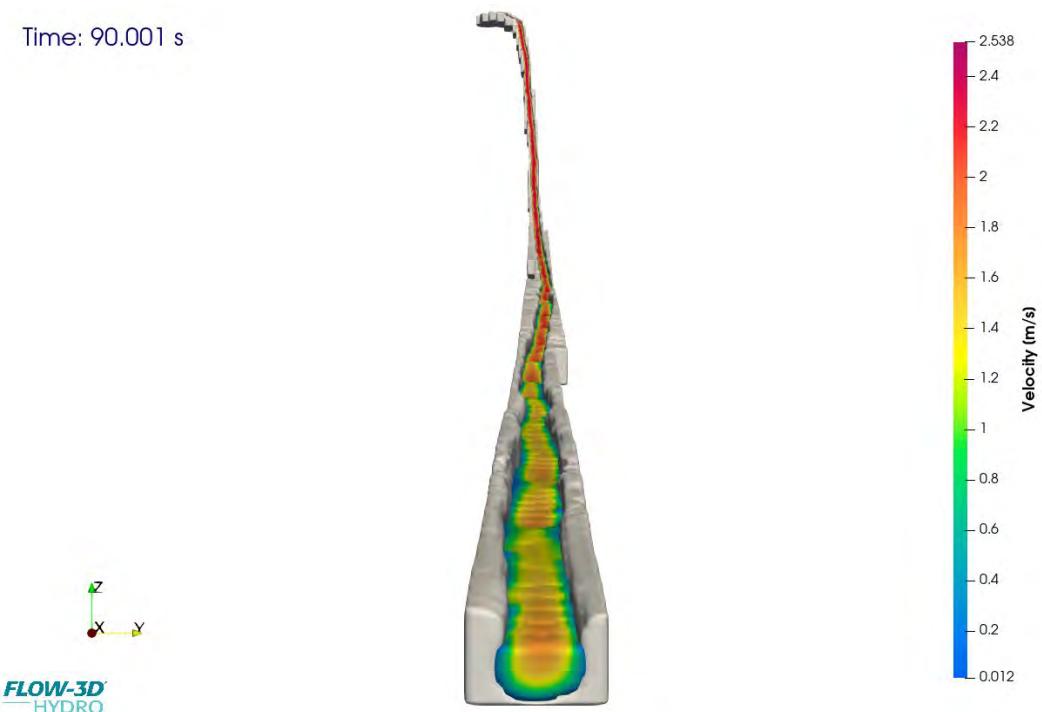
Gráfico Promedio del Número de Froude para los 90 segundo simulados



Nota: Extraido de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>. Se puede observar los valores máximos y mínimos del numero de Froude en los 90 segundos simulados y en todo su recorrido, así como tambien su valor promedio.

Los resultados obtenidos mediante simulación tridimensional muestran una buena concordancia con los datos medidos en campo, tanto en velocidad como en tirante y número de Froude. Las ligeras diferencias se deben a las simplificaciones geométricas y a la resolución del modelo. Aun así, se logra reproducir con precisión los fenómenos hidráulicos principales, como la contracción y el resalto, validando así el comportamiento del flujo simulado frente a la realidad observada.

Figura 148*Comparación realidad y simulación tridimensional*

Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

4.1.5.3.3 Simulación hidráulica de la caída de la terraza 2 de Tipón en FLOW – 3D

Con el objetivo de profundizar en la comprensión del sistema hidráulico inca de Tipón, se llevó a cabo una simulación numérica tridimensional de una caída ubicada en la Terraza 2, considerando tanto el tramo previo como el posterior a la misma. Esto permitió realizar un análisis integral del comportamiento del flujo. **Como condición de entrada, se utilizó el caudal medido en el canal C-L16, anterior a la caída, con valores de 10.74 L/s (LSPIV) y 10.39 L/s (vertedero). Para la simulación, se optó por el valor más crítico: 10.7 L/s. El tirante inicial medido fue de 6 cm**, y la geometría del canal se modeló a partir de datos obtenidos mediante escaneo LiDAR.

En cuanto a la condición de salida, correspondiente al canal C-L17, se registró un caudal cercano de 10.5 L/s y un tirante de 3.5 cm. Con estos parámetros, se ejecutó la simulación durante 90 segundos de tiempo real, requiriendo aproximadamente 24 horas de procesamiento computacional. A diferencia de tramos anteriores, el comportamiento hidráulico en una caída resulta más complejo de modelar mediante enfoques unidimensionales. Sin embargo, los resultados obtenidos validan la simulación, ya que los valores de salida concuerdan con las mediciones de campo, y el comportamiento visual del flujo coincide con el observado en campo.

El análisis incluye el comportamiento hidráulico antes, durante y después de la caída, identificando elementos clave como un disipador de energía (curvatura en la parte baja del canal), un re - aceleración (pendiente pronunciada) y rompe presiones estratégicamente ubicados. Estas soluciones evidencian el avanzado conocimiento hidráulico de los incas, orientado al control eficiente del caudal, la disipación de energía y la minimización de pérdidas por erosión. La simulación se ejecutó durante 90 segundos de tiempo real, y su análisis se basó en la aplicación de las ecuaciones de continuidad y conservación del momento para flujo en canales abiertos. Aunque

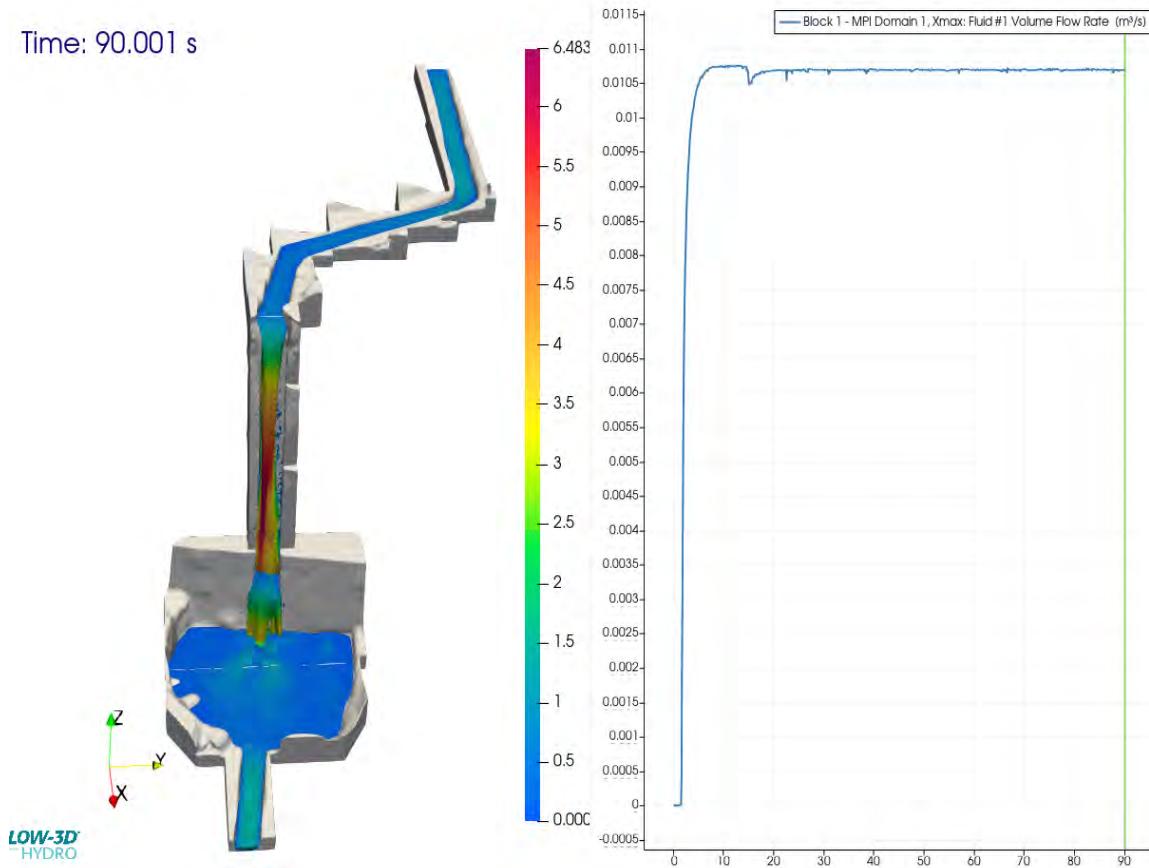
el comportamiento hidráulico resultó complejo debido a la geometría y dinámica de la caída, los valores obtenidos en la salida coincidieron con los datos registrados en campo, lo que valida la precisión del modelo numérico empleado.

Análisis del caudal.

El sistema mantiene un caudal constante de aproximadamente **10.7 L/s** a lo largo del tramo simulado, conforme al principio de conservación de la masa. Las pérdidas menores que pueden presentarse en la realidad son atenuadas por elementos como rompe presiones y la curva en “S” aguas arriba, que reduce la velocidad y estabiliza el flujo.

Figura 149

Gráfico del Caudal $0.0105\text{m}^3/\text{s}$ (10.5L/s) en los 90 segundos simulados



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

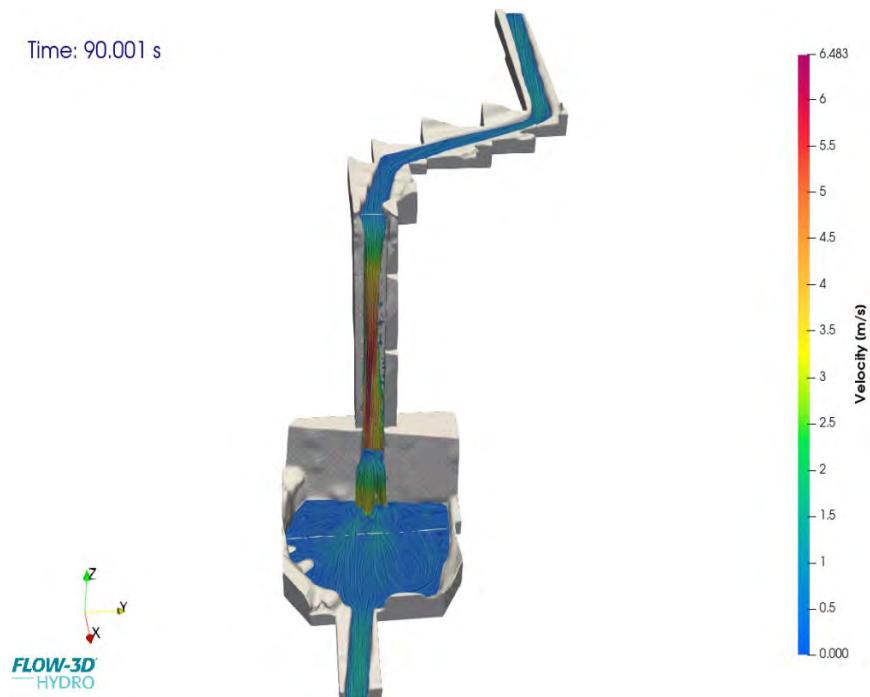
<https://www.flow3d.com>

Análisis de Velocidad

La simulación muestra una variación significativa en la velocidad del flujo a lo largo del tramo analizado. Se identifican zonas de desaceleración, como la curva en S al inicio y los rompe presiones, que actúan como disipadores de energía. Por otro lado, elementos como la caída y la pendiente posterior provocan un aumento brusco de velocidad, facilitando el descenso entre terrazas. Este diseño demuestra que los incas no solo buscaban adaptar el terreno, sino también optimizar el control del agua para fines de riego, mediante un manejo hidráulico funcional y eficiente.

Figura 150

Isosuperficie Velocidad más Líneas de corriente en toda la caída



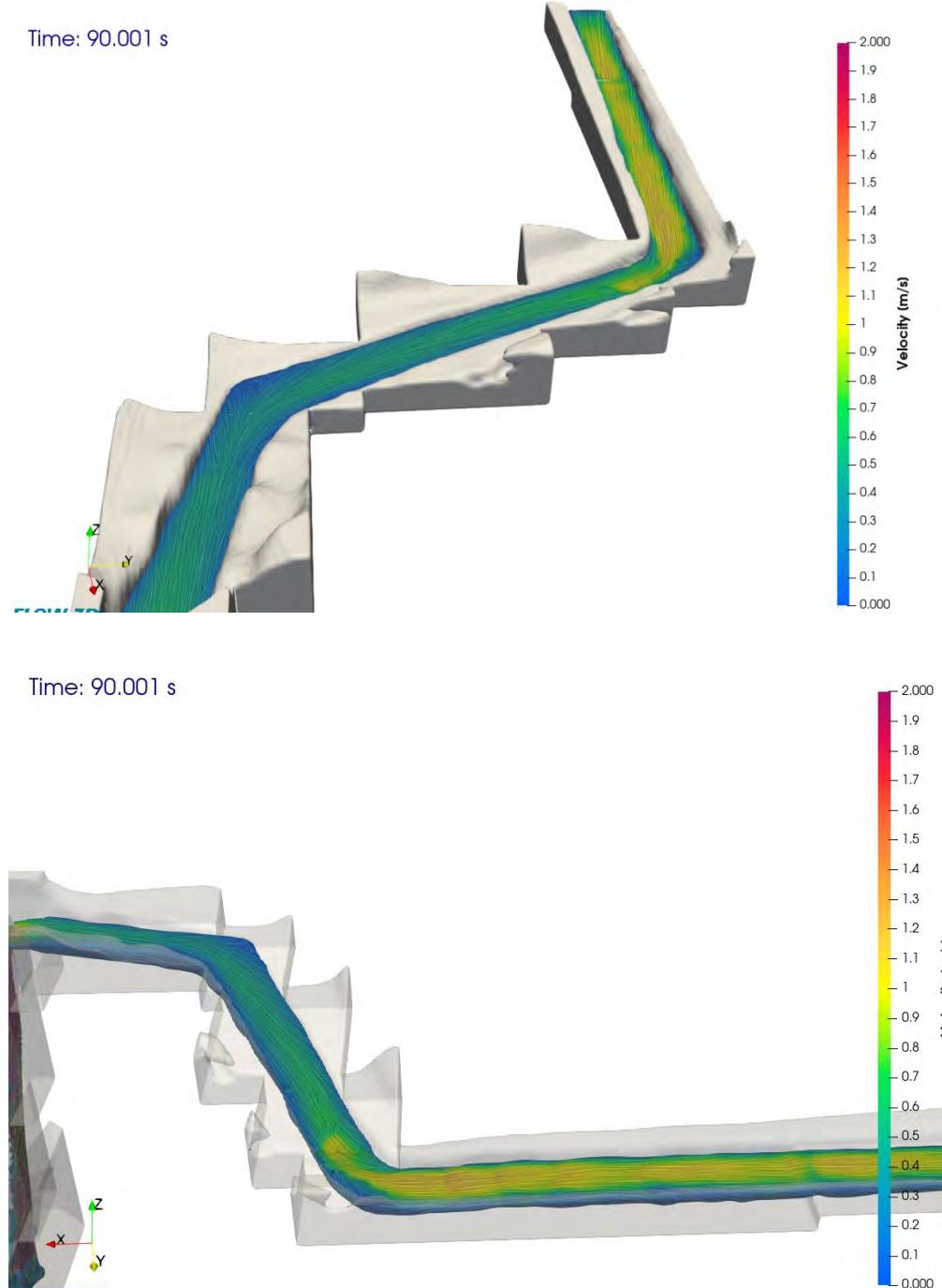
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Se analiza el comportamiento hidráulico antes, durante y después de la caída.

Figura 151

Vista en Planta y perfil de Isosuperficie de Curva S del canal antes de la caída



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

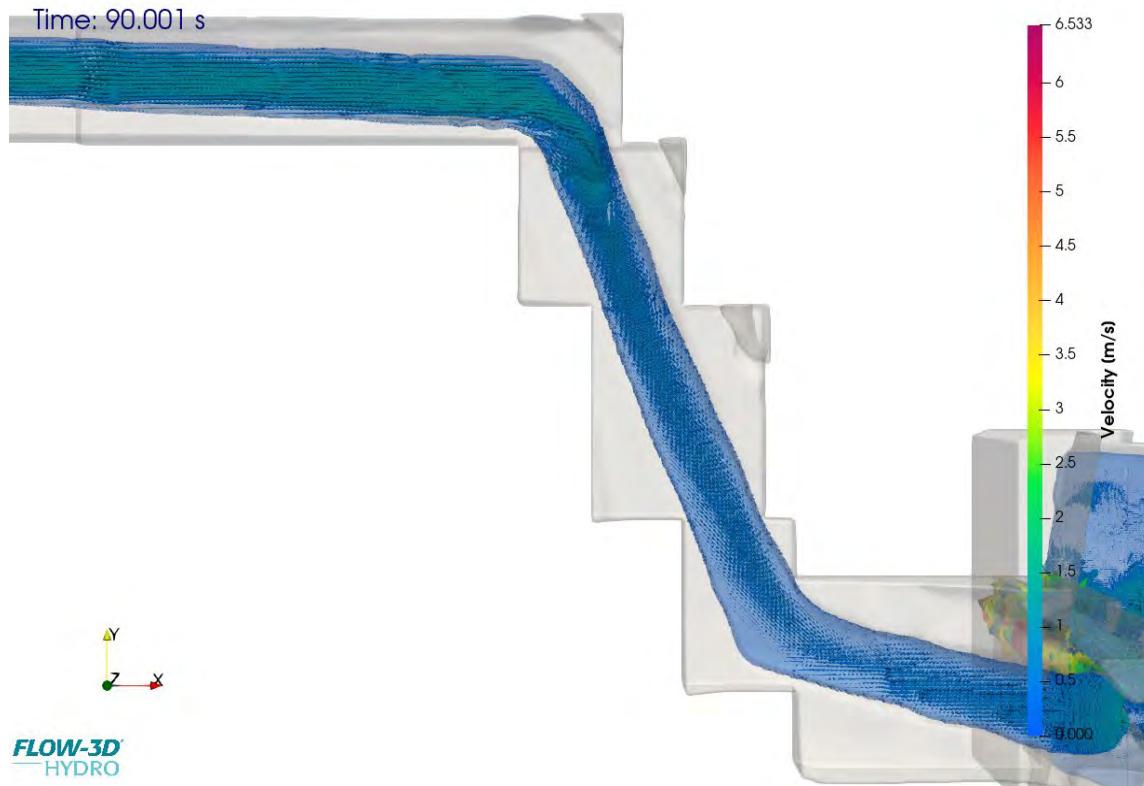
<https://www.flow3d.com>

Previo a la caída, se observa una curva en “S” que genera una disminución progresiva en la velocidad del flujo, lo que a su vez provoca un aumento del tirante y una mejor distribución de energía antes del descenso. Esta configuración hidráulica permite que la velocidad inicial, cercana a 1.1 m/s, se reduzca a aproximadamente 0.5 m/s al ingresar a la zona de caída.

El análisis vectorial revela un patrón de flujo complejo, con zonas de circulación tipo vórtice producto de la doble curvatura. Sin embargo, un tramo recto final posterior a las curvas actúa como estabilizador, alineando el flujo y evitando desviaciones laterales significativas.

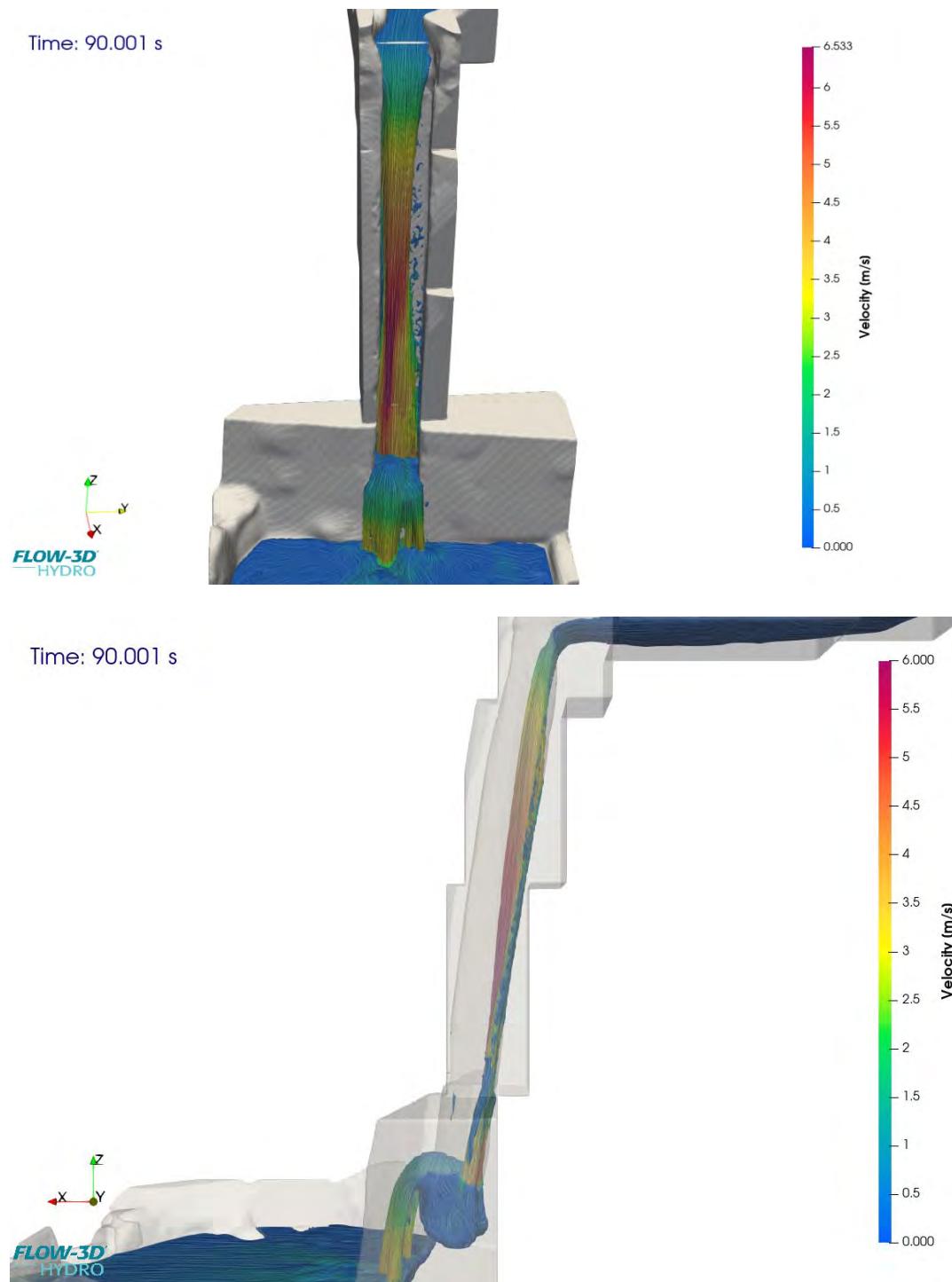
Figura 152

Vectores de velocidad en el canal de curva S antes de la caída



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 153*Isosuperficie de Velocidad Vista de Frente y Perfil de la caída y rompe presión*

Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

En la zona de la caída, se observa que, gracias a la disipación generada por la curva en “S” aguas arriba, el flujo no adquiere una gran proyección longitudinal, es decir, no recorre excesiva distancia en dirección X, manteniéndose relativamente adherido al paramento durante la primera mitad del descenso.

Además, el rompe presiones inferiores, en forma de cavidad o depresión, actúa como elemento disipador adicional, reduciendo la velocidad del flujo desde aproximadamente 6 m/s a 3 m/s, lo que atenúa el impacto contra el fondo y evita daños estructurales. Posteriormente, se identifica una zona ampliada que funciona como un segundo rompe presión natural, permitiendo almacenar temporalmente el agua y encauzarla nuevamente hacia el tramo siguiente del canal.

Figura 154

Vectores velocidad caída y rompe presión

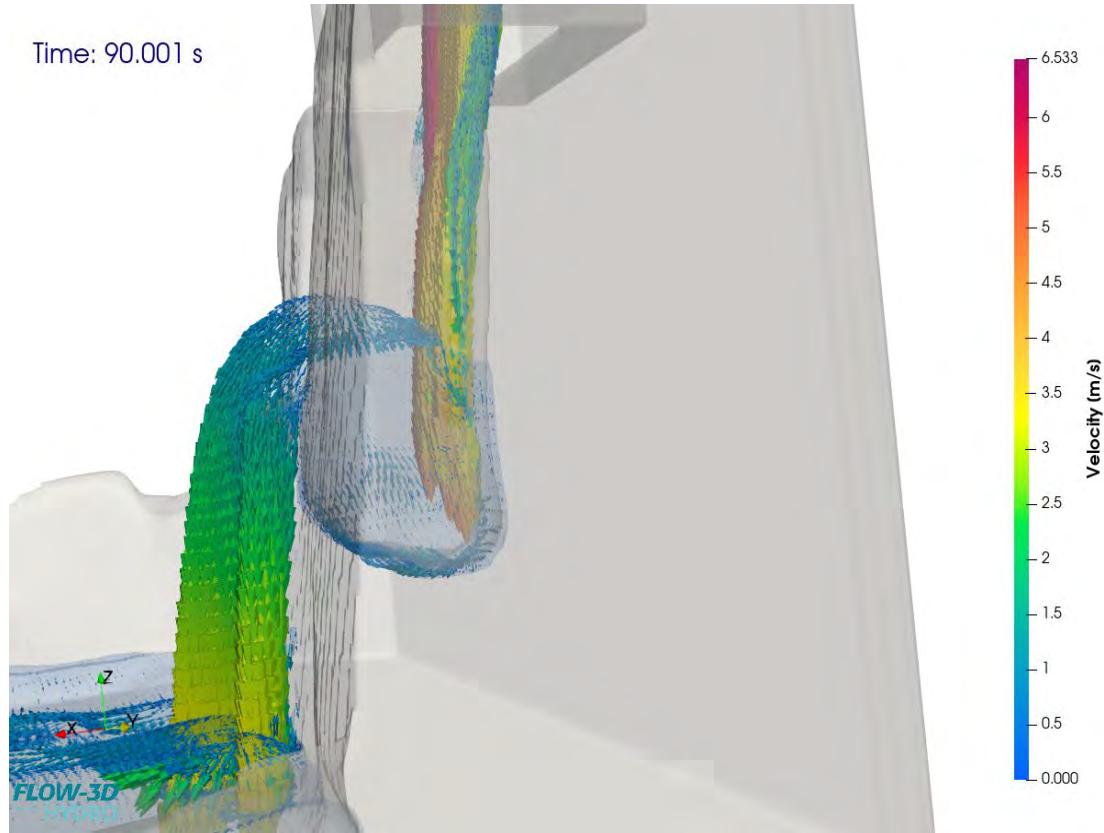


Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Figura 155

Vectores de velocidad en romper presión vista de perfil



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

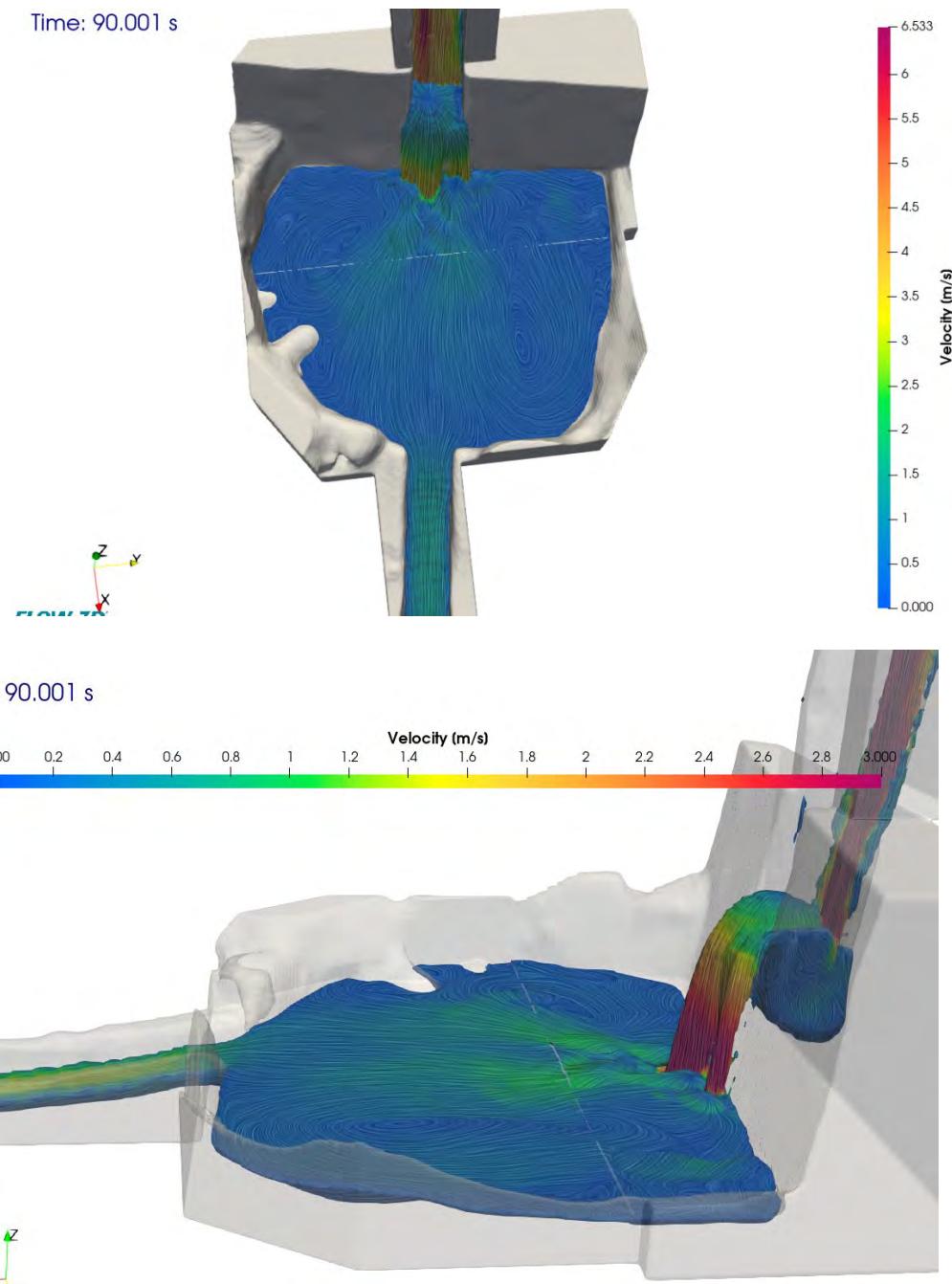
<https://www.flow3d.com>

Posteriormente, se encuentra la zona de disipación secundaria, también conocida como posa de disipación, donde el flujo pierde parte de su energía tras la caída. Esta sección está seguida por un canal con pendiente pronunciada del 15 %, que reactiva el movimiento del agua en su trayecto descendente.

En esta zona se generan vórtices localizados, producto del comportamiento turbulento inducido por el rompe presión. Este patrón de recirculación provoca que parte del flujo se redirija brevemente en sentido contrario antes de reorganizarse y continuar su curso, favoreciendo así la estabilidad del régimen y el control del flujo en el canal posterior.

Figura 156

Isosuperficie Velocidad más líneas de corriente Vista de frente y perfil zona de la posa y canal después de la caída



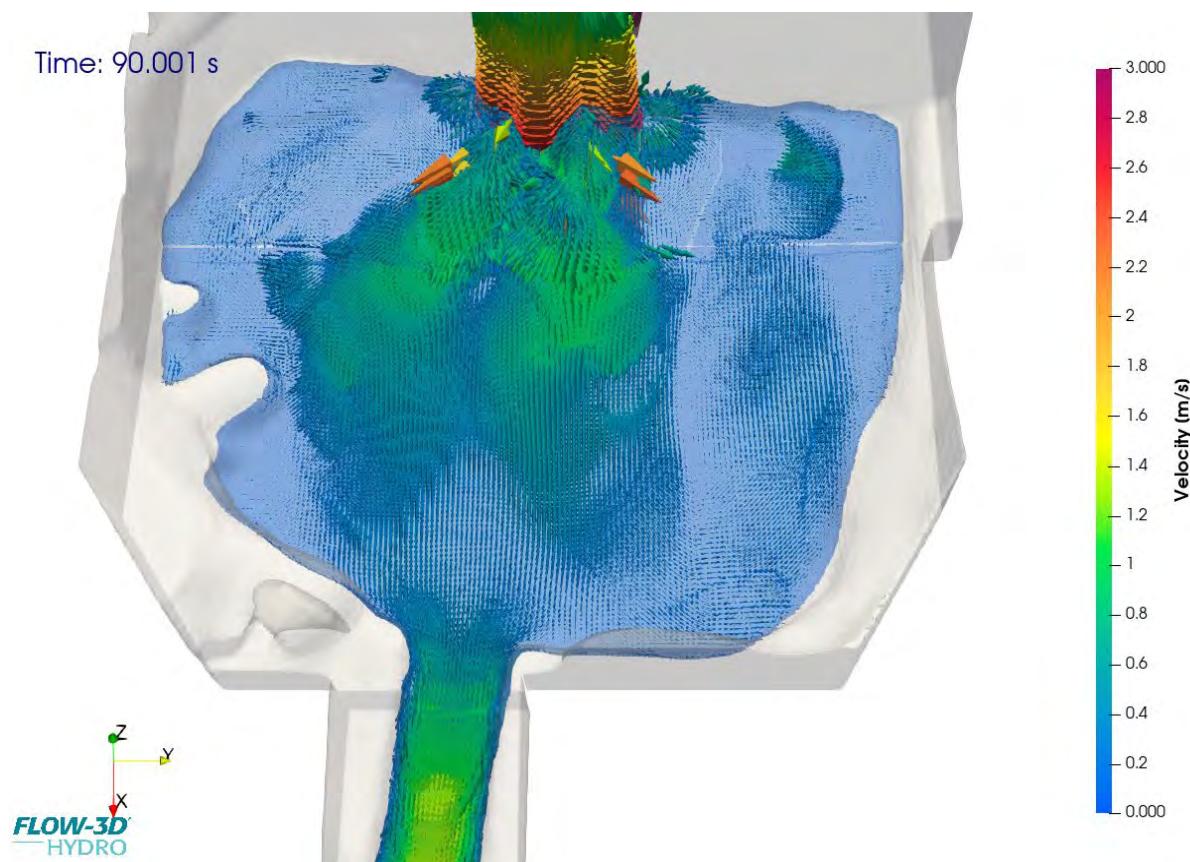
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Se evidencia un aumento progresivo de la velocidad en el canal ubicado posteriormente a la zona de disipación, como resultado de la pendiente pronunciada del 15 %. Simultáneamente, en la zona lateral ampliada, se desarrolla un campo de vorticidad que genera recirculación localizada del flujo, permitiendo que el agua se reincorpore gradualmente al canal principal, lo que favorece la estabilidad hidráulica y la continuidad del flujo en condiciones controladas.

Figura 157

Vectores de Velocidad Zona de la posa y canal después de la caída



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

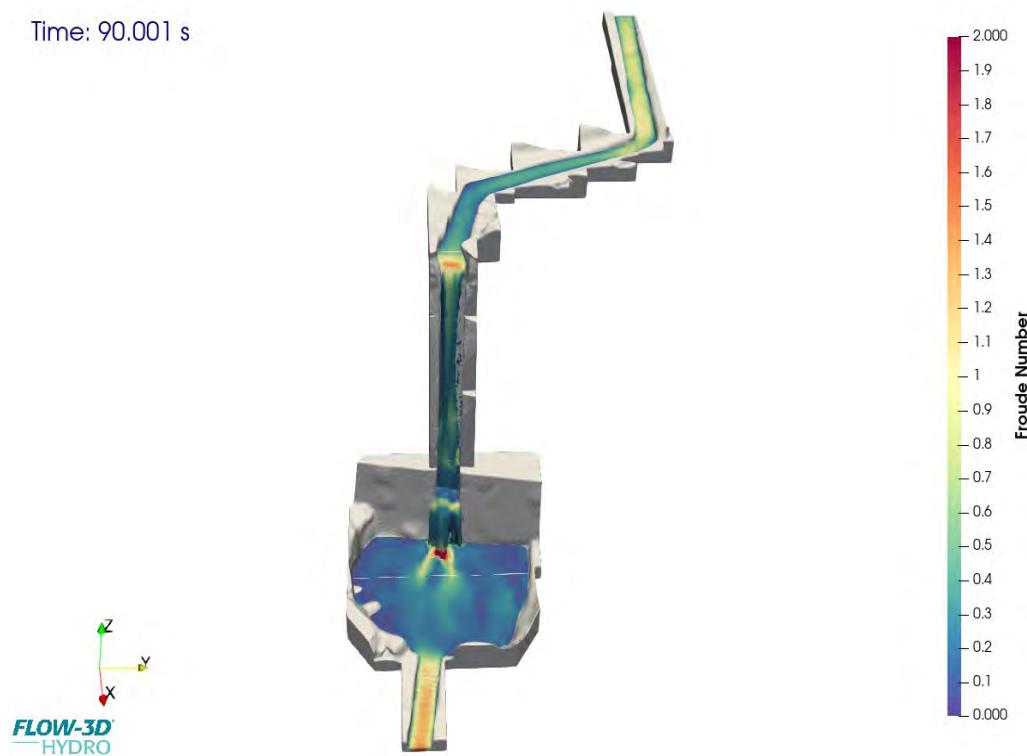
Análisis del régimen hidráulico.

Asimismo, se analiza el comportamiento del número de Froude a lo largo de todo el sistema, incluyendo los tramos antes, durante y después de la caída. Como es característico en este tipo de estructuras, se identifica un flujo supercrítico durante la caída.

Sin embargo, lo más interesante se observa en los canales: una contracción hidráulica aguas arriba, provocada por la curva en “S”, y un resalto hidráulico aguas abajo, inducido por la geometría del canal y los disipadores de energía. Estas configuraciones generan una variabilidad en el número de Froude, evidenciando un diseño que favorece tanto la disipación como la recuperación de energía según el tramo, reflejando un manejo hidráulico complejo y eficiente.

Figura 158

Isosuperficie del Número de Froude en toda la caída



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

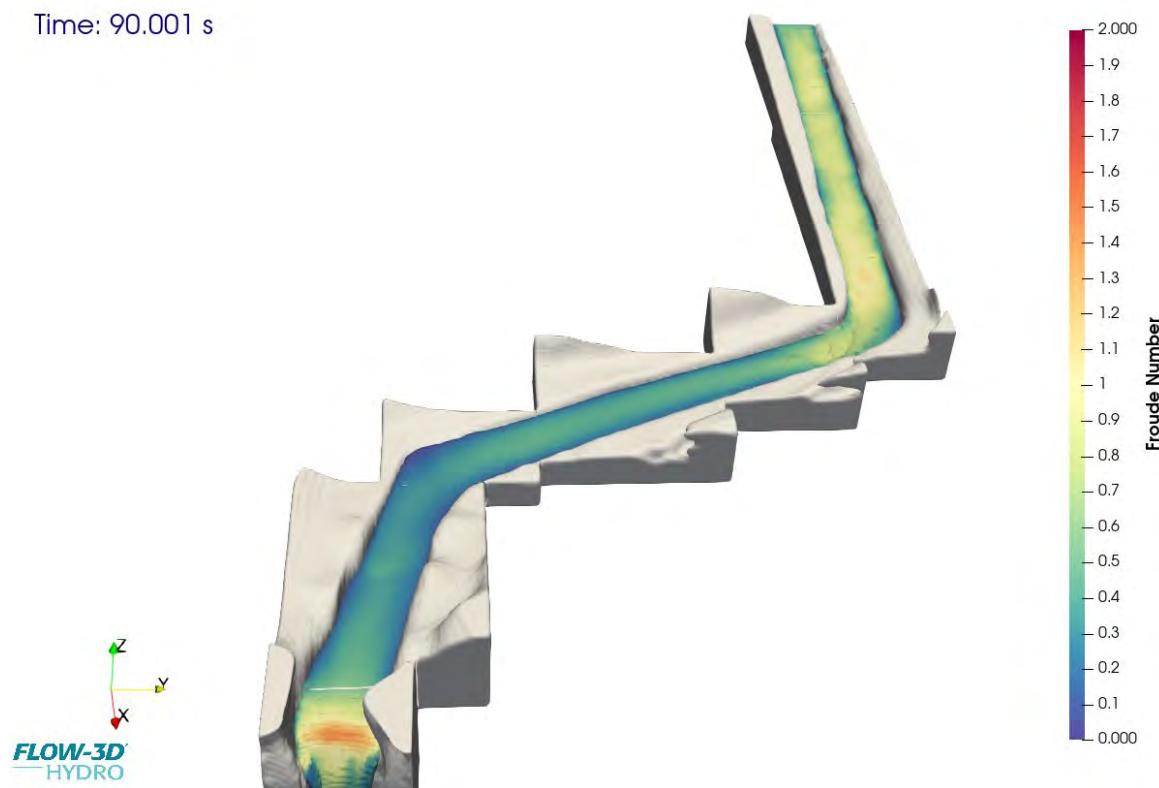
<https://www.flow3d.com>

Análisis Froude Tramo Inicial curva S antes de la caída.

En el tramo inicial, correspondiente a la curva en “S” previa a la caída, se observa una reducción progresiva del número de Froude, producto de la disminución de la velocidad y el aumento del tirante. Esta configuración permite una transición controlada del flujo, favoreciendo condiciones subcríticas antes del cambio de régimen.

Figura 159

Isosuperficie Número de Froude canal con curva S antes de la caída



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

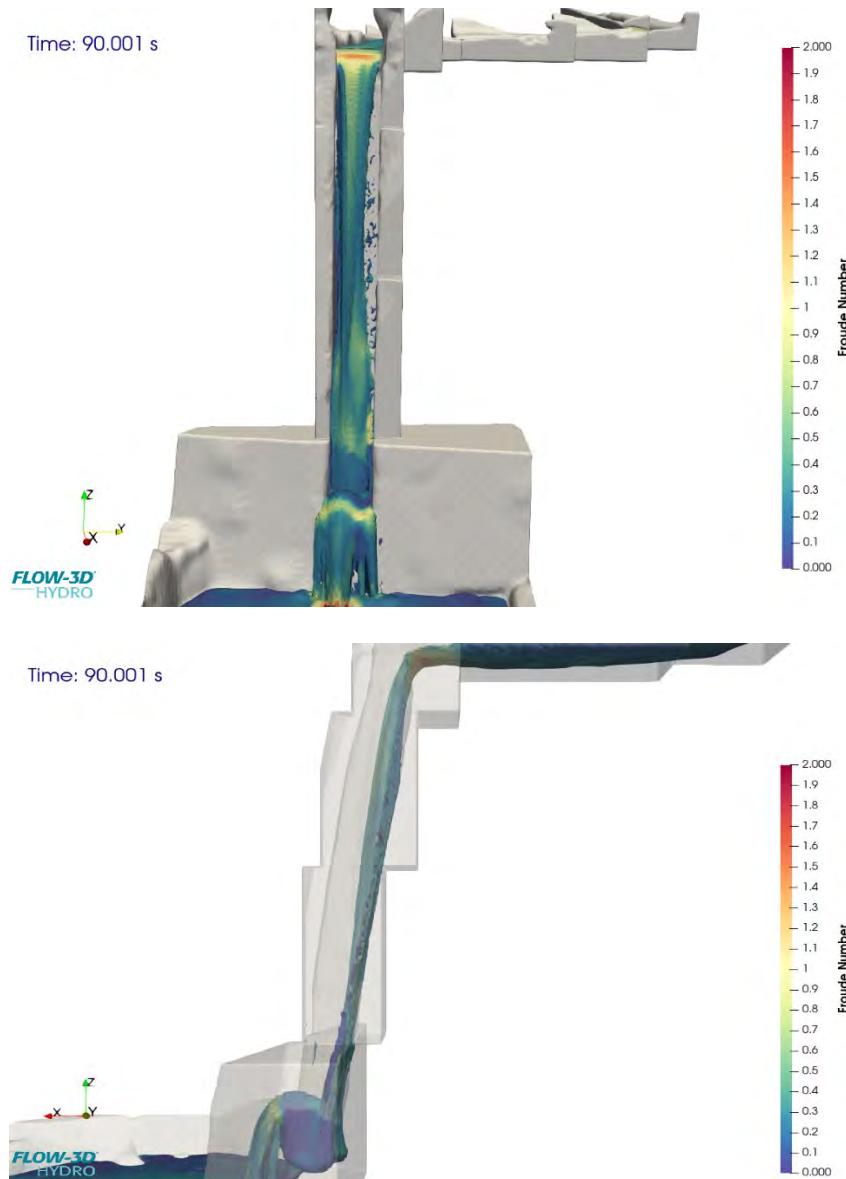
Se observa que, en la entrada al sistema, el número de Froude presenta valores cercanos o ligeramente superiores a 1, indicando un flujo cercano al régimen crítico. Sin embargo, debido a la presencia de la curva en “S”, este valor disminuye progresivamente hasta aproximadamente 0.7,

reflejando la transición hacia un régimen subcrítico. Este comportamiento está directamente relacionado con el aumento del tirante y la reducción de la velocidad, lo que evidencia un mejor control hidráulico del flujo antes de la caída.

Análisis Froude Tramo de la Caída.

Figura 160

Isosuperficie Número de Froude Vista de Frente y Perfil en la Caída y Rompe presión



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

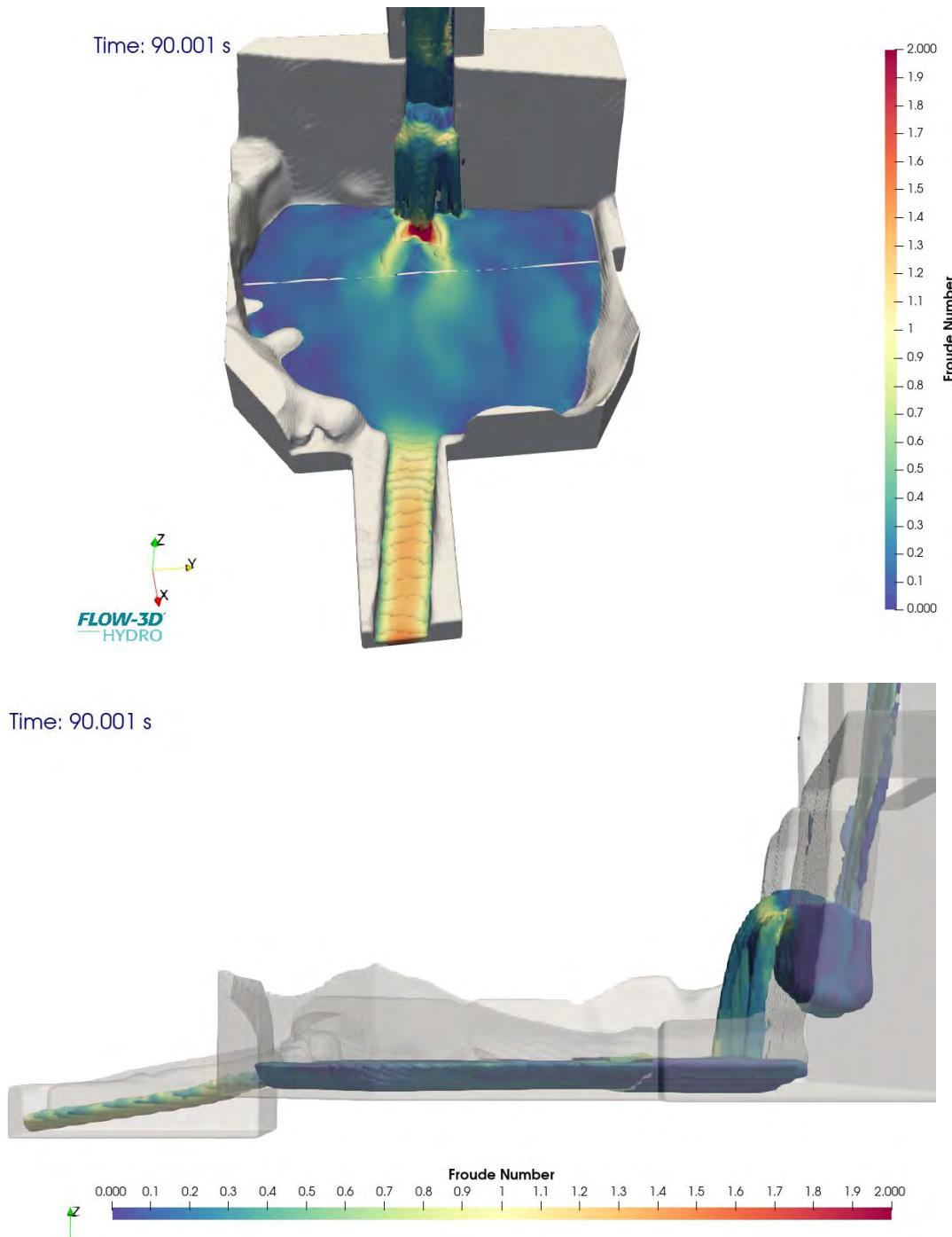
<https://www.flow3d.com>

Se identifican valores del número de Froude cercanos o ligeramente superiores a 1 en el eje central del canal, mientras que en los bordes laterales estos valores tienden a ser ligeramente menores, lo cual podría explicarse por la reducción de velocidad provocada por los disipadores de energía o por la proximidad del tirante a las paredes, lo que altera localmente el régimen del flujo.

En la zona de la caída, la velocidad del flujo alcanza valores de hasta 6 m/s. No obstante, al analizar la fórmula unidimensional del número de Froude se observa que, a pesar de la alta velocidad, el tirante reducido en la caída (y) limita el crecimiento del Froude, manteniéndolo en el rango del flujo supercrítico. Por tanto, se concluye que la dominancia del régimen en este tramo se debe principalmente a la profundidad reducida del flujo.

Análisis Froude Después de la caída, Posa de disipación. En la zona posterior a la caída, el flujo ingresa a una poza de disipación, donde se observa una reducción significativa del número de Froude, alcanzando valores menores a 1, lo que indica un régimen subcrítico. Este comportamiento es resultado de la disipación de energía causada por el impacto del flujo y la amplitud de la sección, que favorecen la formación de vórtices y recirculación.

A medida que el agua vuelve a incorporarse al canal de sección más estrecha y con pendiente pronunciada el número de Froude aumenta, superando el valor crítico, y evidenciando una transición hacia régimen supercrítico. Este cambio hidráulico, inducido por la geometría y las condiciones de contorno, representa una contracción hidráulica funcional, cuya eficiencia en el control del flujo es resultado del diseño ancestral del sistema.

Figura 161*Isosuperficie Número Froude Vista de Frente y Perfil Posa y Canal después de la Caída*

Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

En la zona de la poza de disipación, se registran valores del número de Froude menores a 1, correspondientes a un flujo subcrítico. Sin embargo, al ingresar nuevamente al canal caracterizado por una sección más estrecha y una pendiente pronunciada el Froude aumenta progresivamente, alcanzando valores que indican un régimen supercrítico.

Este cambio se ve favorecido por la recirculación del flujo en la poza, que redirige el agua hacia el canal, generando una contracción hidráulica efectiva. Este fenómeno resulta particularmente interesante, ya que evidencia cómo la combinación entre geometría, pendiente y condiciones de borde permite regular el régimen del flujo de manera pasiva, optimizando el funcionamiento del sistema hidráulico.

Análisis del Tirante

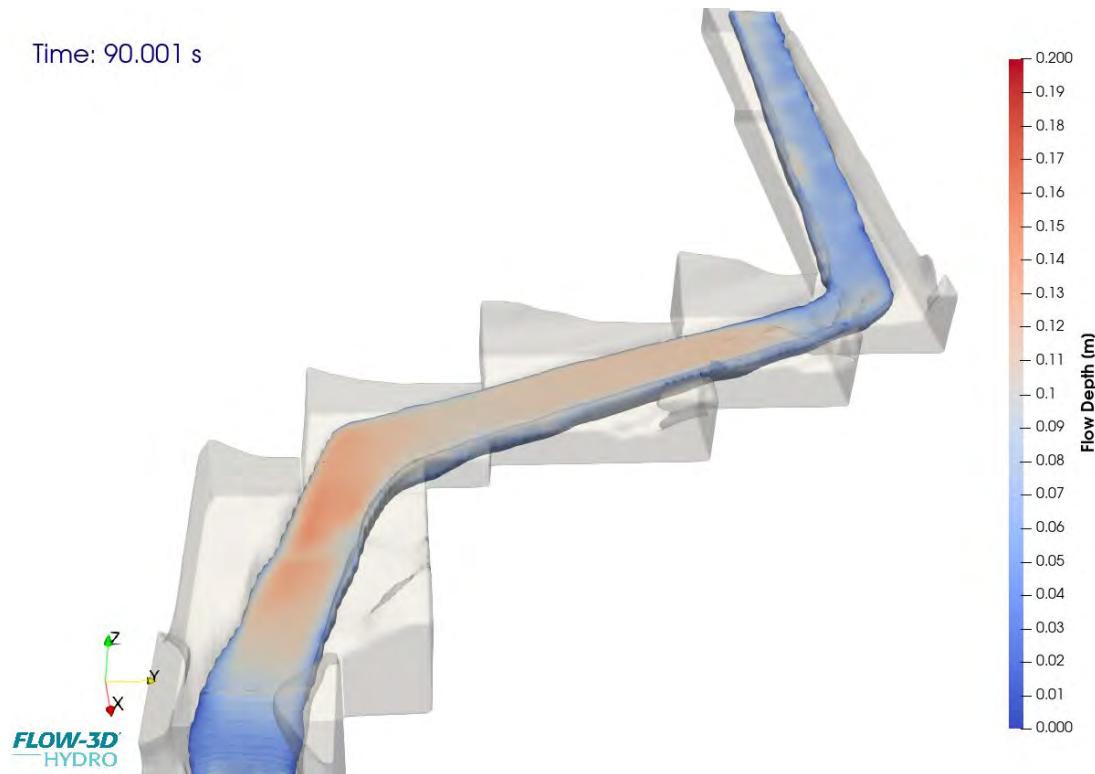
En la simulación realizada, se observa que el tirante presenta variaciones significativas a lo largo del tramo analizado. En las zonas de disipación, como la curva en “S” y la poza posterior a la caída, el tirante tiende a incrementarse debido a la disminución de velocidad y la acumulación de energía potencial. Por el contrario, en tramos con pendiente pronunciada o secciones contraídas, el tirante disminuye como respuesta al aumento de velocidad, tal como lo predice la ecuación de Bernoulli y el principio de conservación de energía.

Estos cambios evidencian el funcionamiento eficiente del sistema hidráulico incaico, que, mediante transiciones geométricas y elementos disipadores, logra controlar el régimen del flujo y mantener un tirante adecuado para el transporte y distribución del agua.

Análisis Tirante Tramo Inicial curva S antes de la caída.

Figura 162

Isosuperficie Tirante en Canal con curva S antes de la caída



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Efectivamente, en el tramo inicial se aprecia un aumento progresivo del tirante, asociado a la disminución de la velocidad del flujo, producto de la acción de la curva en “S”. Esta configuración geométrica permite una transición hidráulica controlada, que prepara el flujo antes de la caída, reduciendo su energía cinética y favoreciendo una distribución más estable del régimen

Análisis Tirante Tramo de la Caída.

Figura 163

Isosuperficie Tirante en la caída y rompe presión.



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

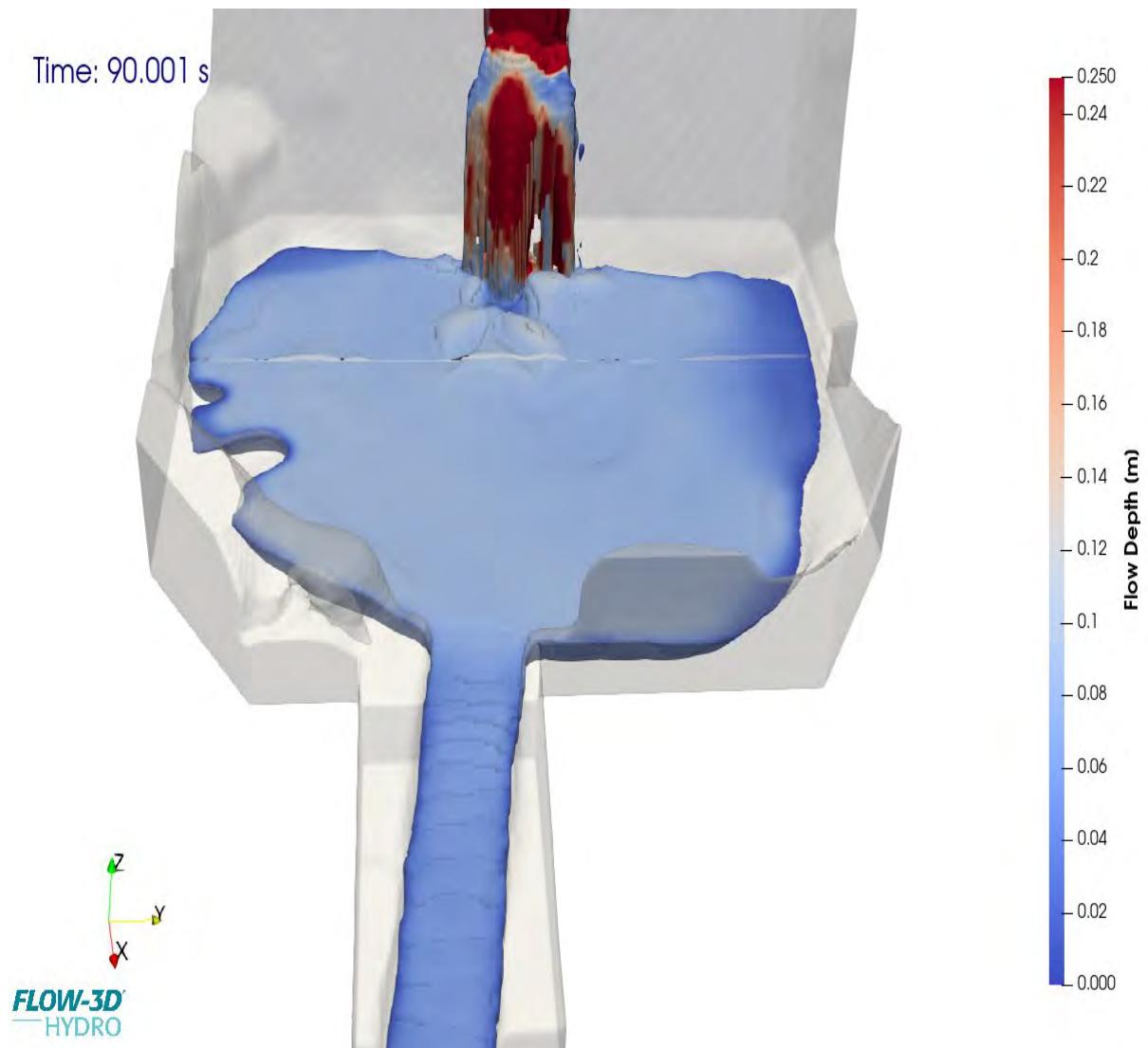
<https://www.flow3d.com>

Se comprobó que los tirantes se mantienen, en su mayoría, por debajo de los 0.25 m, alcanzando puntualmente valores de hasta 0.40 m en zonas específicas. Esta condición, combinada con la proximidad del flujo a las paredes laterales, permite que, a pesar de presentar altas velocidades, el número de Froude se mantenga dentro del rango previsto, reflejando un régimen coherente con la geometría del canal y el comportamiento observado.

Análisis Froude Después de la caída, Posa de disipación.

Figura 164

Isosuperficie Tirante en la posa y canal después de la caída



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Finalmente, se observa que el tirante alcanza un valor máximo de aproximadamente 0.12 m en la poza de disipación, disminuyendo posteriormente a cerca de 0.04 m en el tramo canalizado. Esta reducción se debe a la pendiente pronunciada, el cambio de sección y la recirculación previa,

aspectos que están en concordancia con el comportamiento del número de Froude y los valores de velocidad simulados.

A continuación, se presentan imágenes comparativas entre los resultados obtenidos en la simulación y las observaciones realizadas en campo, lo que permite validar visualmente el modelo numérico.

Figura 165

Comparación Realidad y simulación Tridimensional.



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

4.1.5.3.4 Simulación hidráulica del templo del agua de Tipón en FLOW – 3D

Se modelaron 200 segundos de flujo en el sector del Templo del Agua, empleando las mismas bases teóricas de simulaciones previas: la ecuación de continuidad y la ecuación de

conservación de cantidad de movimiento. Estas permitieron representar de forma precisa el comportamiento hidráulico tridimensional del flujo en esta zona ceremonial.

El caudal de entrada fue determinado mediante el método LSPIV en el punto inicial del templo y verificado posteriormente en los canales secundarios, obteniéndose un valor promedio de 5.225 L/s. La calibración del modelo incluyó un coeficiente de rugosidad de Manning de $n = 0.0165 s \cdot m^{-\frac{1}{3}}$, ajustado según las condiciones de campo.

Para validar los resultados, se empleó una condición de salida tipo “outflow” y se compararon los resultados de tirante y número de Froude con registros audiovisuales reales, mostrando una buena correspondencia.

A pesar de no ser una estructura con función hidráulica utilitaria directa, el Templo del Agua refleja un elevado conocimiento técnico y simbólico. La forma en la que el agua se distribuye a través de caídas, orificios y recintos escalonados, así como su movimiento controlado en las pozas, destaca la intencionalidad ritual y el dominio hidráulico de los incas. A continuación, se analiza el comportamiento del flujo en cuanto a velocidades, tirantes y número de Froude en todo el recorrido del templo.

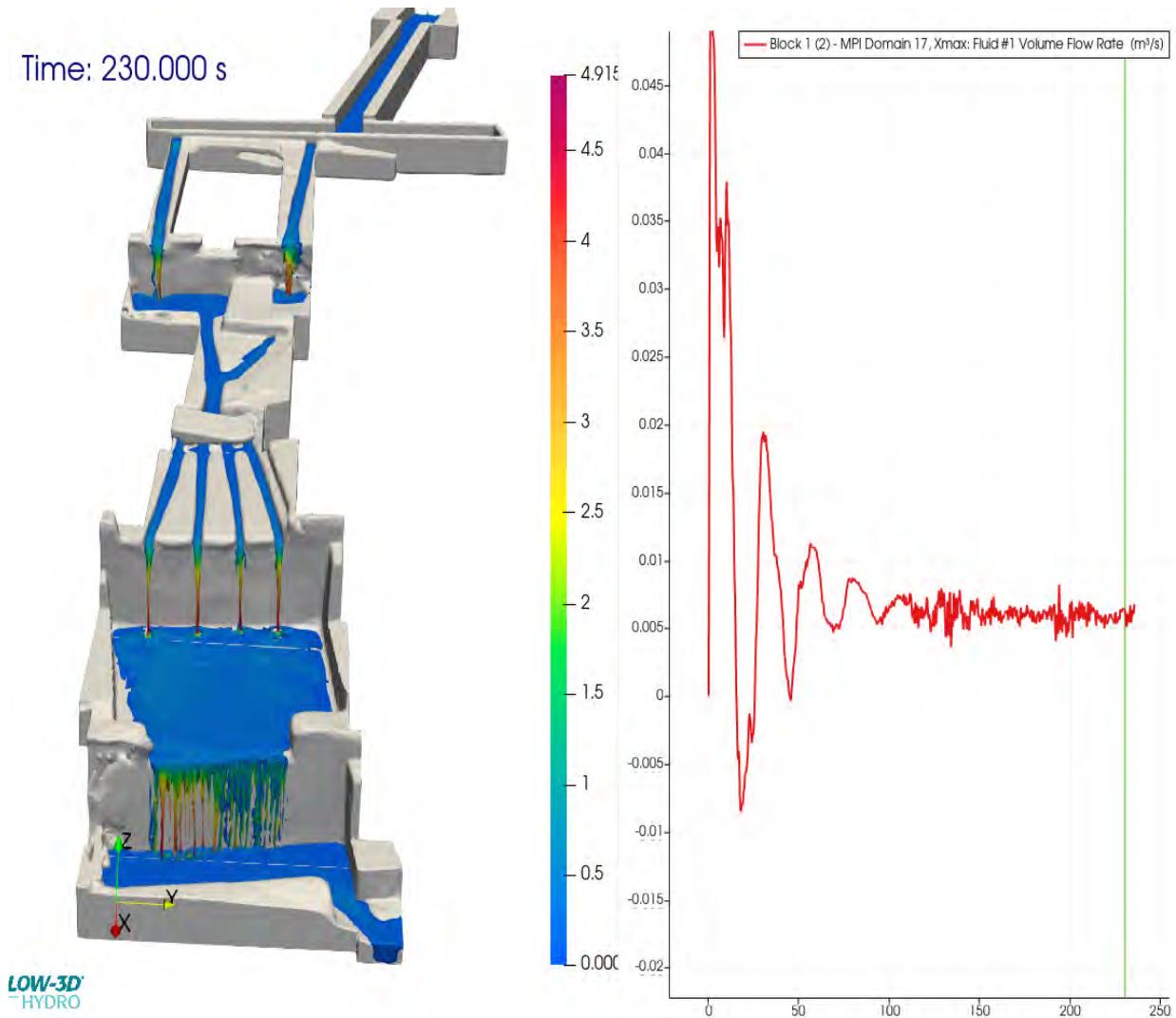
Análisis el caudal

El caudal de ingreso al Templo del Agua fue estimado en 5.225 L/s, valor que se mantiene a lo largo del sistema por efecto de la conservación de masa. Este caudal se distribuye dinámicamente a través de los diferentes elementos arquitectónicos del complejo.

Inicialmente, el flujo se bifurca en dos ramales principales, los cuales posteriormente se reconectan antes de dividirse nuevamente en cuatro canales secundarios. Estos últimos vuelven a confluir en una serie de pozas escalonadas, que funcionan como espacios de redistribución y control del flujo, tal como se aprecia en la figura siguiente.

Figura 166

Gráfico de Caudal al inicio del recorrido del templo del agua



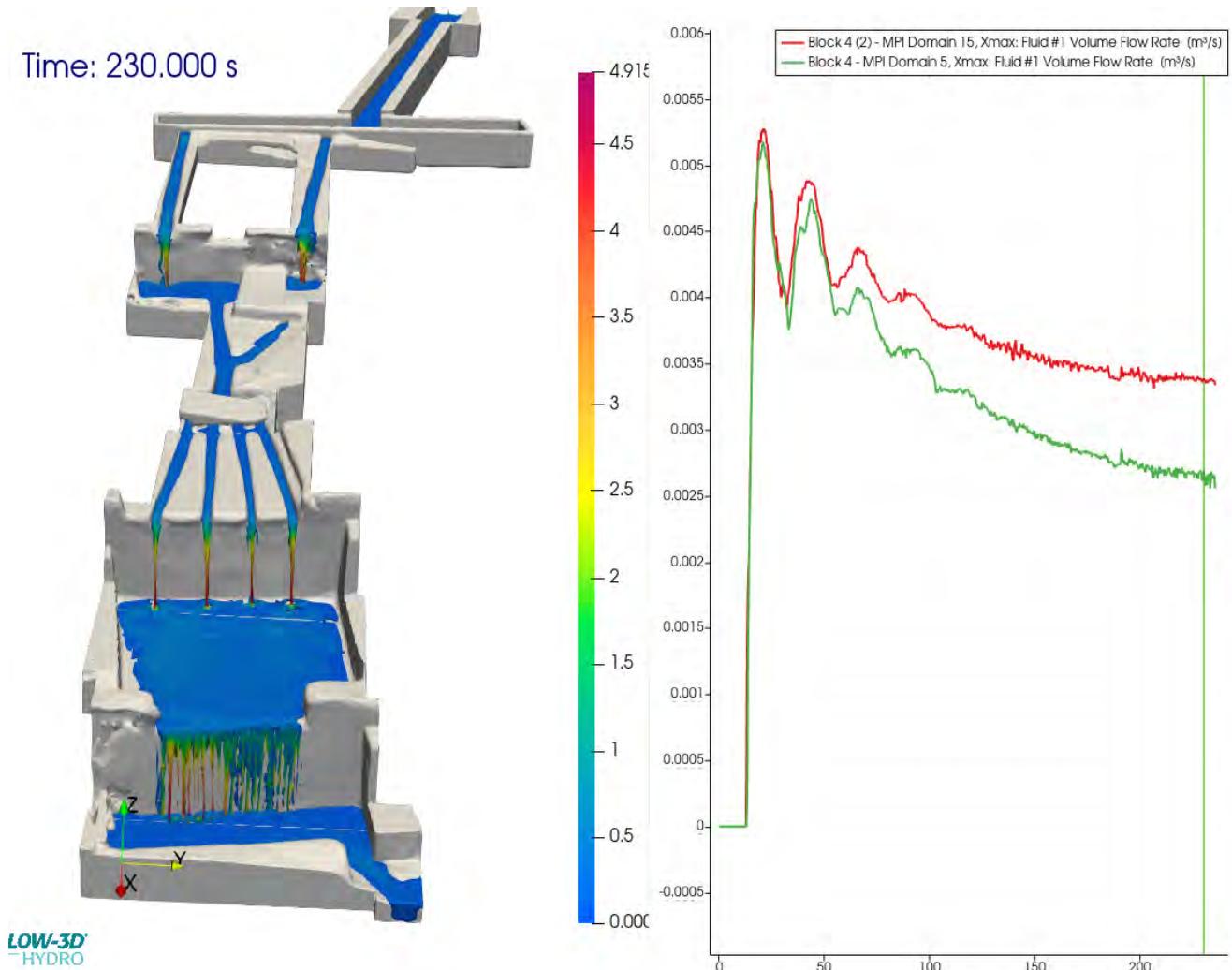
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Se observa que el caudal de entrada, establecido en 5.2 L/s, se mantiene con ligeras variaciones a lo largo del tiempo, producto de la adaptación progresiva del flujo a la geometría y condiciones del sistema. A medida que avanza la simulación, el caudal tiende a estabilizarse y calibrarse automáticamente, lo que confirma la consistencia del modelo numérico y la validez de las condiciones de contorno empleadas.

Figura 167

Gráfico de caudal en los 2 canales que continúan el recorrido del flujo



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

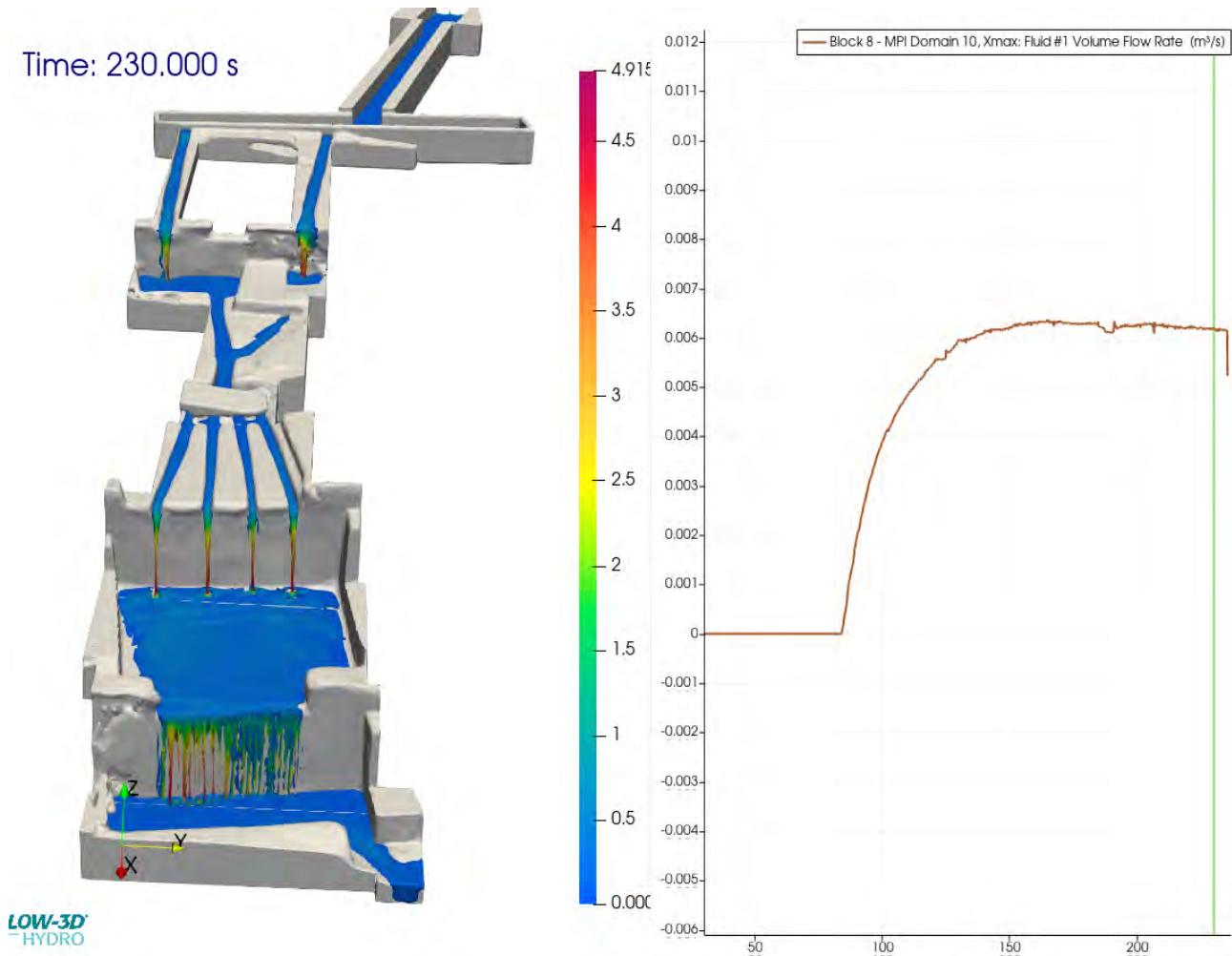
<https://www.flow3d.com>

Se identifican dos caudales parciales provenientes de los bloques de entrada asignados a cada canal, los cuales, al ser sumados, arrojan un valor total cercano a los 5 L/s, consistente con el caudal de diseño. La diferencia en magnitud entre ambos caudales se debe a la posición relativa de cada bloque respecto al canal principal y al tamaño de los orificios de ingreso.

En la simulación, uno de los caudales alcanza aproximadamente 0.35 L/s, mientras que el otro registra cerca de 0.25 L/s, lo cual representa una ligera desviación respecto al valor inicial asignado, posiblemente atribuible a ajustes automáticos del solver en el proceso de estabilización hidráulica

Figura 168

Grafico de caudal en la salida de los 4 canales que acaban en caídas pequeñas



Nota: Extraido de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

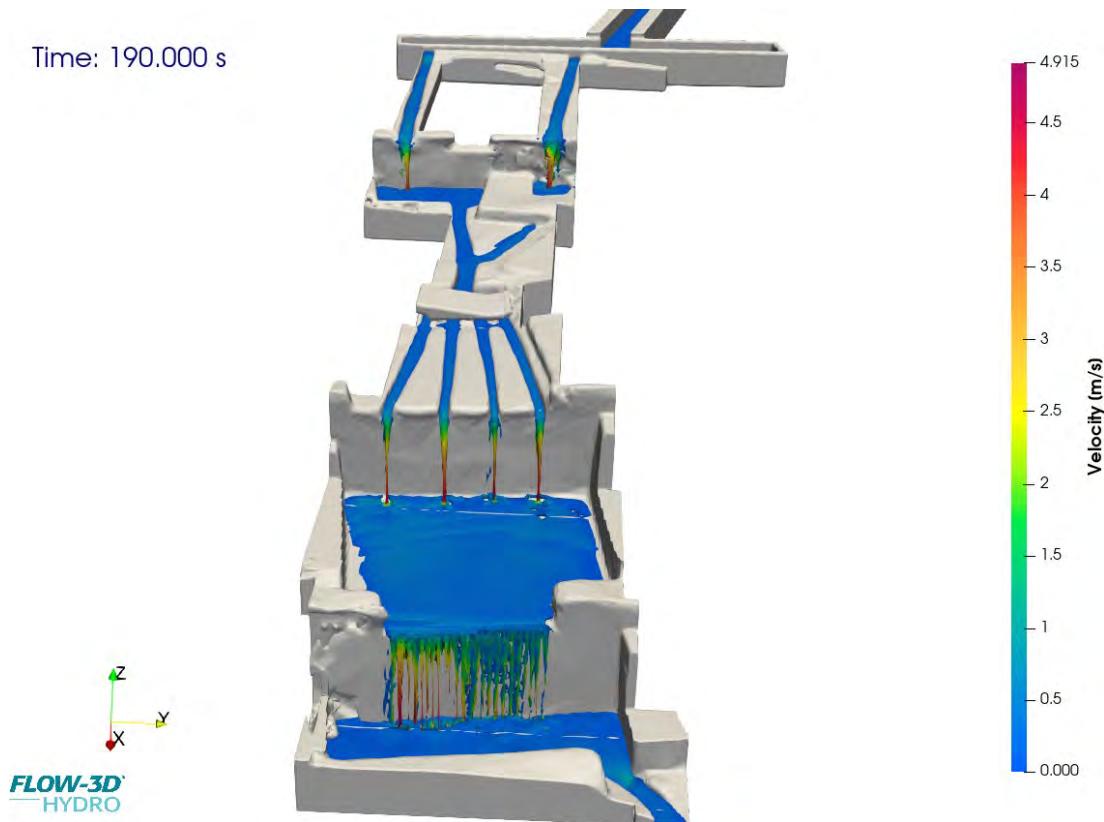
Se muestra el comportamiento del caudal volumétrico medido en la salida de los cuatro canales que culminan en pequeñas caídas. Se observa que, tras un periodo inicial de estabilización

(200 s), el caudal aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor cercano a $0.006 \text{ m}^3/\text{s}$ (6 L/s), estabilizándose a partir de los 150 s de simulación.

Este comportamiento indica que, a medida que el flujo se distribuye en los cuatro ramales, el sistema alcanza una condición cuasi estacionaria, en la que el flujo se mantiene constante con fluctuaciones mínimas. La curva también refleja la eficiencia hidráulica del sistema incaico, en tanto que la geometría y la disposición de los canales permiten una distribución simétrica del caudal sin pérdidas significativas

Figura 169

Gráfico de caudal a la salida del templo del agua



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

La figura muestra la evolución del caudal volumétrico en la salida del Templo del Agua. Se aprecia una estabilización progresiva del flujo, seguida de una ligera reducción hasta aproximadamente $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$, lo cual representa una pérdida cercana a $0.0015 \text{ m}^3/\text{s}$ respecto al valor máximo alcanzado. Esta variación sugiere que, pese a las complejidades geométricas del sistema, el diseño incaico logra mantener una eficiencia hidráulica notable.

La escasa pérdida registrada refleja un control refinado del flujo, resultado de la disposición estratégica de pozas, canales y elementos disipadores. Dicho comportamiento no solo resalta el conocimiento técnico hidráulico de los incas, sino también su capacidad para integrar funcionalidad y simbolismo ceremonial en una sola infraestructura.

Análisis de velocidad

Se realizó una visualización general del sistema con el objetivo de analizar el comportamiento global del flujo en el Templo del Agua. Inicialmente, el agua fluye por un canal principal de mayor dimensión, que se bifurca en dos canales secundarios más estrechos. Esta reducción de sección, junto con la presencia de orificios de salida, genera un aumento de velocidad debido al efecto de presión y la aceleración del flujo a través de aberturas pequeñas.

Posteriormente, el flujo es disipado en dos primeras pozas, que actúan como elementos de transición hidráulica. Desde estas pozas, el agua se canaliza nuevamente: cada poza alimenta un canal independiente, que luego se re conectan brevemente antes de dividirse nuevamente en cuatro canales paralelos. Esta división se logra mediante una piedra tallada con cuatro orificios circulares, que distribuye el flujo de forma uniforme.

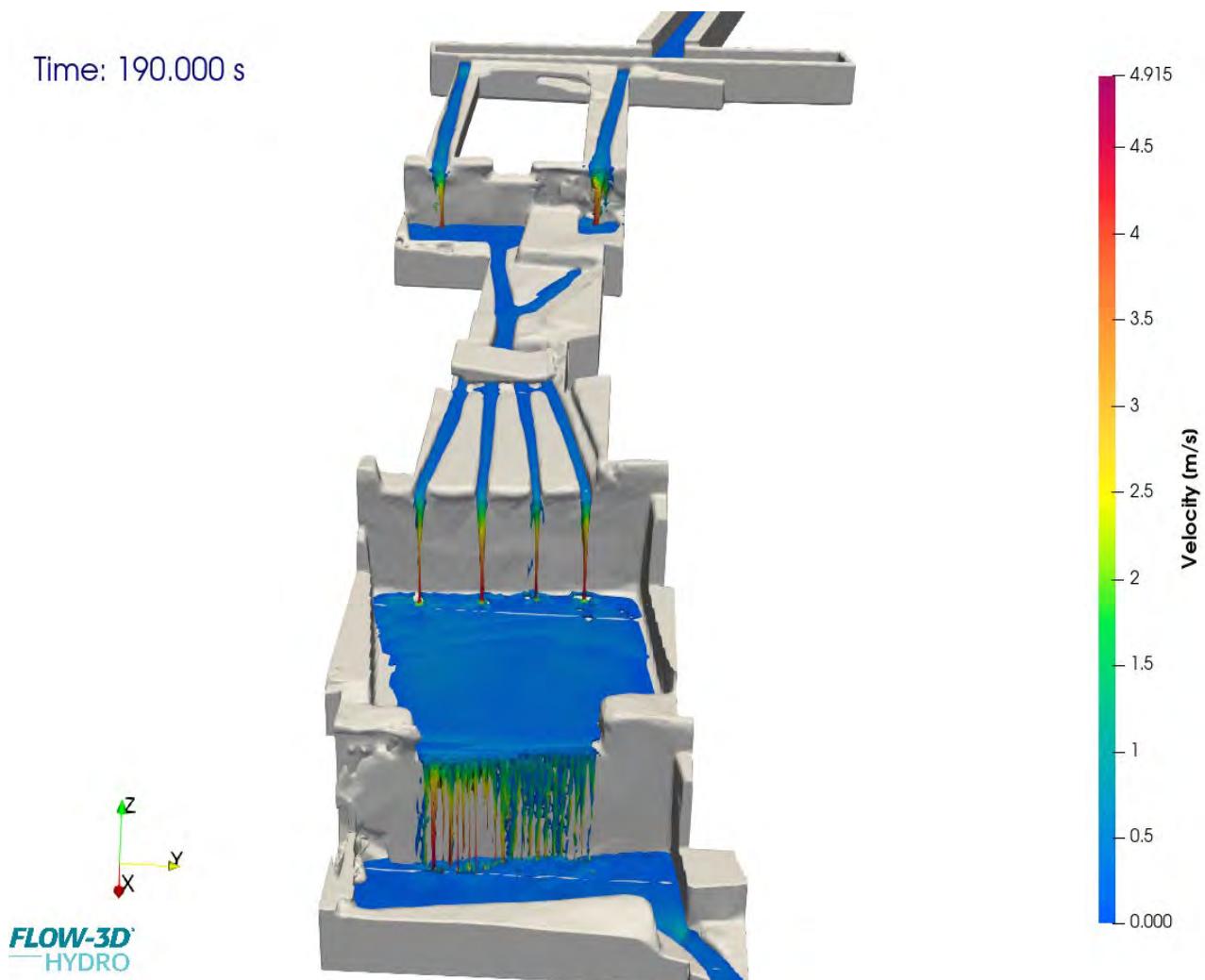
Los cuatro canales resultantes presentan pequeñas caídas escalonadas, que desembocan en una nueva poza intermedia. Desde allí, el agua fluye hacia una segunda poza inferior, y finalmente

se encauza a través de un canal de sección regular, que conduce el flujo hacia el resto del complejo hidráulico arqueológico.

Este patrón de distribución y recolección evidencia un diseño hidráulico sofisticado, donde se alternan fases de aceleración, disipación y control del caudal, reflejando un manejo ceremonial y técnico altamente avanzado por parte de los constructores incas.

Figura 170

Isosuperficie de Velocidad Templo del Agua



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

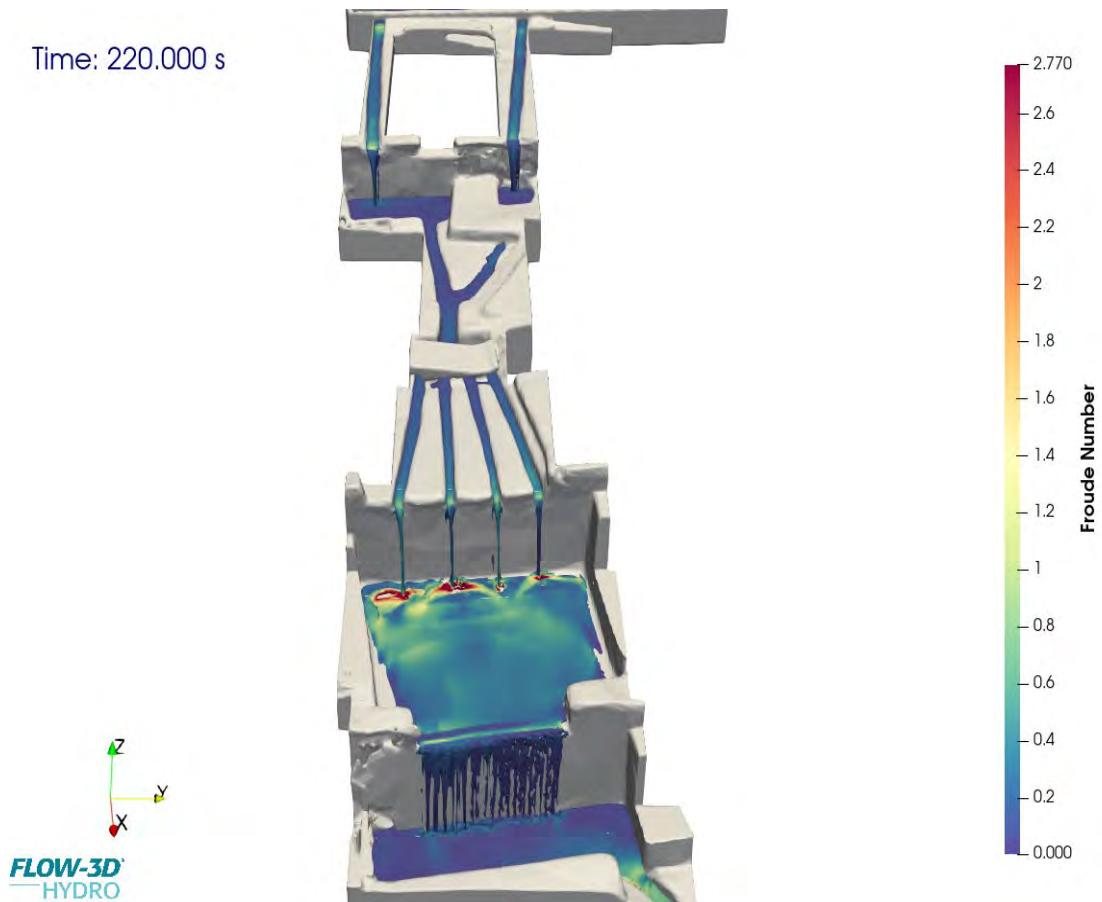
<https://www.flow3d.com>

Análisis del número de Froude

A partir de los resultados obtenidos sobre la velocidad del flujo y el tirante, se deduce el comportamiento del número de Froude, el cual varía a lo largo del recorrido en función de la geometría, la pendiente y los elementos estructurales del canal. Este parámetro permite identificar con precisión las transiciones de régimen hidráulico, evidenciando zonas de flujo subcrítico, supercrítico y de transición, en correspondencia con las configuraciones hidráulicas presentes en el Templo del Agua.

Figura 171

Número de Froude en el templo del agua



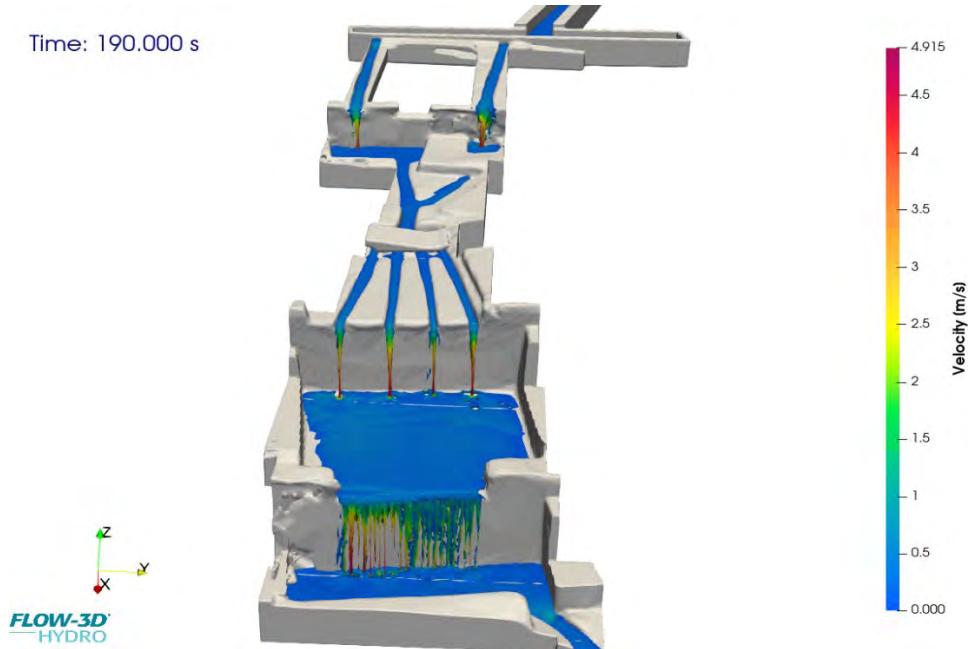
Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

Comparación con la realidad y simulación 3D

Figura 172

Comparación simulación 3D vs imagen real del templo del agua



Nota: Extraído de FLOW-3D® Versión 2023R1 [Software]. (2023). Santa Fe, NM: Flow Science, Inc.

<https://www.flow3d.com>

4.2 Resultados respecto al objetivo general

Los resultados obtenidos permiten presentar una visión integrada del sistema hidráulico inca del Parque Arqueológico de Tipón, a partir de la información topográfica, de las mediciones hidráulicas en campo y de las simulaciones numéricas realizadas. El levantamiento topográfico permitió generar un modelo digital del terreno del área de estudio, a partir del cual se identificaron los canales principales, acueductos y estructuras de caída de agua, información que fue utilizada para la definición de los dominios computacionales empleados en la simulación hidráulica.

Las mediciones hidráulicas realizadas mediante la técnica LSPIV proporcionaron registros de caudales y velocidades superficiales en los tramos seleccionados del sistema, los cuales fueron utilizados como datos de referencia para el análisis hidráulico.

Por su parte, las simulaciones mediante dinámica de fluidos computacional permitieron obtener la distribución espacial de velocidades, presiones y perfiles de tirante en los canales analizados, así como identificar zonas de disipación de energía en las estructuras hidráulicas estudiadas.

En conjunto, los resultados obtenidos describen las principales características geométricas e hidráulicas del sistema hidráulico de Tipón y constituyen la base para el análisis e interpretación del comportamiento del flujo, los cuales se desarrollan en el capítulo de discusión.

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El sistema hidráulico inca de Tipón constituye uno de los ejemplos más complejos y mejor conservados de ingeniería hidráulica prehispánica, cuya comprensión requiere la integración de diversas metodologías de análisis. En este capítulo se discuten los resultados obtenidos a partir del levantamiento topográfico, las mediciones hidráulicas en campo y las simulaciones numéricas mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), con el objetivo de interpretar el comportamiento hidráulico del sistema y contrastar los hallazgos con principios teóricos de la hidráulica y aplicaciones de la ingeniería moderna.

5.1 Descripción de los resultados obtenidos

A partir del levantamiento topográfico realizado mediante tecnología Dron LiDAR fue posible describir la morfología del terreno en el Parque Arqueológico de Tipón, así como la geometría, cotas y pendientes de los canales hidráulicos. Esta información permitió caracterizar el sistema hidráulico inca desde un enfoque ingenieril, apoyado en herramientas modernas de análisis. El área de estudio abarca aproximadamente 240 hectáreas y presenta un terreno predominantemente sinuoso, con pendientes naturales que superan los 30°. En este contexto, los incas construyeron aproximadamente 13 terrazas hidráulicas distribuidas en un área cercana a las 6 hectáreas, lo que permitió aprovechar la energía gravitacional para la conducción y distribución del agua. La presencia de estas terrazas se traduce en pendientes reducidas en los canales, lo que favorece condiciones de flujo predominantemente subcríticas, disminuyendo el potencial erosivo y la generación de turbulencias excesivas. Esta configuración resulta adecuada para fines de irrigación, ya que permite una distribución más uniforme del agua a lo largo del sistema.

El sistema hidráulico de Tipón fue construido empleando bloques de piedra volcánica (andesita) y sedimentaria (caliza) de diferentes tamaños, seleccionados y adaptados según su

función estructural. En los muros de contención de las terrazas se utilizaron bloques de mayor tamaño, mientras que en los canales se emplearon piedras medianas y pequeñas, finamente labradas y ensambladas con precisión. Esta configuración constructiva se refleja en el comportamiento hidráulico del sistema, ya que el análisis permitió calibrar una rugosidad equivalente de $ks = 0.0058\text{ m}$, correspondiente a un coeficiente de Manning aproximado de $n = 0.0165\text{ s} \cdot \text{m}^{-\frac{1}{3}}$. Dicho valor es representativo de canales revestidos de piedra relativamente lisa, lo que favorece un flujo controlado a lo largo de los tramos analizados.

Los canales de Tipón en su mayoría tendría una temperatura de 14°C dando una densidad de 999.2kg/m² además su viscosidad dinámica tiene un valor de aproximadamente 0.0011683 kg/(m-s).

Los caudales observados en el sistema varían desde aproximadamente 4 L/s en sectores como el Templo del Agua, hasta valores cercanos a 30 L/s en los canales ubicados en las terrazas inferiores. Se observa un incremento progresivo del caudal conforme se desciende en el sistema o se atraviesan diferentes niveles de terrazas. No obstante, la presencia de estructuras de disipación, tales como codos, disipadores en “T” y tramos con pendientes invertidas, contribuye a regular el flujo en puntos específicos del sistema, permitiendo controlar la energía hidráulica y favorecer una distribución más eficiente del agua para riego.

El análisis de velocidades mediante la técnica LSPIV evidenció que los canales de Tipón presentan perfiles de velocidad variables y más heterogéneos en comparación con estructuras hidráulicas modernas, debido principalmente a la geometría irregular y a la rugosidad del material de construcción. Sin embargo, los resultados muestran que el sistema mantiene condiciones de flujo subcrítico en la mayoría de sus secciones, con tirantes relativamente uniformes que oscilan

entre 3 y 6 cm. Este comportamiento sugiere un manejo intencional de pendientes, velocidades y caudales orientado a garantizar una irrigación controlada y continua.

El uso del software FLOW-3D como herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) permitió describir el comportamiento hidráulico del sistema inca de Tipón en aspectos que no pueden ser analizados únicamente mediante técnicas de medición en campo. A partir de las simulaciones numéricas fue posible identificar y analizar los principales **patrones de flujo**, obteniéndose los siguientes resultados relevantes.

- **Distribución de velocidades:** Las simulaciones muestran que las velocidades del flujo en los canales son coherentes con la geometría y el diseño hidráulico inca, favoreciendo un transporte eficiente y controlado del agua. A pesar de la naturaleza irregular del material pétreo empleado en la construcción, las velocidades se mantienen dentro de rangos compatibles con un régimen estable, evitando condiciones altamente erosivas
- **Distribución de presiones en las estructuras:** Se identificó que las mayores concentraciones de presión se presentan en zonas con cambios geométricos significativos, como codos y transiciones de sección. Sin embargo, los valores de presión obtenidos no alcanzan niveles críticos, lo que evidencia que el diseño hidráulico permitió una adecuada distribución de esfuerzos y una operación segura del sistema.
- **Pérdidas por fricción:** Los resultados del modelo CFD evidencian pérdidas energéticas relativamente reducidas a lo largo de los canales, atribuibles a la calidad constructiva, al buen ensamblaje de los bloques de piedra y a las pendientes controladas, lo que contribuye a una mayor eficiencia hidráulica del sistema.

- **El régimen hidráulico:** Predominante identificado mediante las simulaciones es subcrítico en la mayor parte del sistema. No obstante, en estructuras específicas, como el acueducto principal, se presentan transiciones locales de régimen (subcrítico–crítico o subcrítico–supercrítico), asociadas a cambios de pendiente y geometría, las cuales cumplen una función de disipación de energía y control del flujo.

5.2 Discusión de los resultados

Al comparar los resultados obtenidos mediante las diferentes metodologías empleadas en la investigación, así como con estudios previos, se evidencia que el sistema hidráulico inca de Tipón fue diseñado para optimizar la gestión del agua en un entorno de alta pendiente, logrando un funcionamiento eficiente y controlado del flujo. Los resultados permiten interpretar que el diseño hidráulico responde a criterios técnicos orientados a la regulación de velocidades, caudales y energía hidráulica.

La aplicación conjunta de las metodologías de medición y análisis (LSPIV, cálculos de caudal mediante vertederos y simulación CFD) permitió obtener resultados consistentes entre sí, lo que refuerza la confiabilidad de los datos. Cada técnica presenta limitaciones propias; sin embargo, su integración permitió una comprensión más completa del comportamiento hidráulico del sistema. En particular, la técnica LSPIV resultó fundamental para la estimación de velocidades superficiales, aunque presenta limitaciones en la determinación directa del caudal. Esta limitación fue compensada mediante el uso de vertederos, lo que permitió establecer una relación entre velocidad superficial y caudal a través de un factor de corrección α .

La información obtenida mediante estas metodologías, junto con el levantamiento topográfico LiDAR y los escaneos detallados de las estructuras, constituyó la base para la

definición de las condiciones de entrada del modelo CFD. Como resultado, las simulaciones realizadas en FLOW-3D reprodujeron de manera satisfactoria el comportamiento del flujo observado en campo, mostrando valores de velocidad, régimen hidráulico y distribución de presiones coherentes con las mediciones experimentales.

Desde el punto de vista de la innovación tecnológica inca, los resultados obtenidos confirman que los incas poseían un conocimiento hidráulico avanzado, reflejado en el control del régimen de flujo, la gestión de transiciones hidráulicas y la disipación de energía en puntos estratégicos del sistema. Las simulaciones evidencian que el flujo turbulento no fue evitado completamente, sino aprovechado y controlado mediante la geometría y las pendientes de los canales.

En términos de sostenibilidad y eficiencia hidráulica, el sistema de Tipón demuestra una alta capacidad para distribuir el agua de manera uniforme a lo largo de las terrazas, minimizando pérdidas por erosión y desperdicio de caudal. Este comportamiento es coherente con un diseño orientado a la irrigación continua y al aprovechamiento óptimo del recurso hídrico.

Finalmente, la investigación adopta un enfoque integrador entre la ingeniería y el patrimonio cultural. La coordinación con el Ministerio de Cultura permitió realizar las mediciones y levantamientos topográficos sin afectar la integridad del sitio arqueológico. Asimismo, la caracterización hidráulica del sistema contribuye tanto al conocimiento técnico de la ingeniería ancestral como a la valoración y preservación del patrimonio histórico, ya que la información generada puede servir como base para futuras acciones de conservación y monitoreo del sistema hidráulico inca de Tipon

5.3 Limitaciones del Estudio

La validación de los resultados se realizó mediante la comparación entre las simulaciones numéricas y las mediciones directas efectuadas *in situ*. La alta correlación observada entre ambos conjuntos de datos respalda la confiabilidad del modelo CFD empleado. No obstante, como toda investigación aplicada en un contexto real y patrimonial, el presente estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas y que pueden ser abordadas en investigaciones futuras.

En primer lugar, el nivel de investigación desarrollado es de tipo exploratorio–descriptivo, con un número limitado de variables hidráulicas analizadas. Este enfoque responde a la naturaleza pionera del estudio, al tratarse de una de las primeras investigaciones que emplea dinámica de fluidos computacional para caracterizar un sistema hidráulico inca. En este sentido, futuras investigaciones podrían ampliar el nivel de análisis incorporando enfoques explicativos o correlacionales, así como un mayor número de variables hidráulicas y geométricas.

En segundo lugar, no se incluyó el análisis de los canales subterráneos del sistema hidráulico de Tipón. Esta limitación se debe tanto a restricciones presupuestarias como a que dichos elementos no formaron parte del alcance definido del estudio. Asimismo, el análisis de estos canales requiere un mayor conocimiento previo del sistema completo y el uso de herramientas especializadas, por lo que su inclusión constituye una línea relevante para investigaciones posteriores.

Debido a la magnitud y complejidad del sistema hidráulico de Tipón, las simulaciones CFD se realizaron únicamente en un conjunto representativo de estructuras hidráulicas. Si bien este enfoque permitió comprender los mecanismos esenciales del comportamiento hidráulico del sistema, no se modeló la totalidad de la red hidráulica, lo cual podría ser abordado en estudios futuros mediante modelos integrales de mayor escala.

El trabajo de campo se desarrolló durante el año 2024, específicamente entre los meses de agosto y diciembre, periodo que corresponde a una época climática particular. En consecuencia, los resultados podrían variar bajo condiciones hidrológicas distintas, como las asociadas a la temporada de lluvias. Sin embargo, esta limitación no invalida los resultados obtenidos, ya que el objetivo principal fue la caracterización general del flujo y del comportamiento hidráulico del sistema.

Asimismo, el estudio se centró en variables relacionadas con la topografía, la geometría de los canales, los materiales de conformación y la caracterización del fluido y del flujo. No se incluyeron variables asociadas a procesos de sedimentación, transporte sólido o deterioro estructural, los cuales podrían influir en el comportamiento hidráulico a largo plazo.

Finalmente, no se emplearon instrumentos de medición puntual de velocidad, como correntómetros o sensores acústicos, debido a limitaciones presupuestarias y a las restricciones propias de un sitio arqueológico protegido. El uso de este tipo de instrumentos podría complementar las mediciones realizadas mediante LSPIV y mejorar la resolución de los datos hidráulicos en futuras investigaciones.

A pesar de estas limitaciones, el estudio proporciona una base técnica sólida para la comprensión del sistema hidráulico inca de Tipón y establece un marco metodológico replicable para el análisis de otras obras hidráulicas ancestrales mediante herramientas modernas de ingeniería.

5.4 Comparación crítica con la literatura existente

La presente investigación constituye uno de los pocos estudios a nivel nacional orientados a la caracterización cuantitativa de la ingeniería hidráulica ancestral, y el primero que aplica de manera sistemática la dinámica de fluidos computacional (CFD) para el análisis del sistema

hidráulico inca de Tipón. En consecuencia, la literatura científica directamente comparable es limitada, lo que refuerza el carácter exploratorio e innovador del presente trabajo.

Uno de los estudios más relevantes sobre Tipón es el libro “**Tipón: Water Engineering Masterpiece of the Inca Empire**”, elaborado por los esposos Wright, en el cual se describe el sistema hidráulico desde un enfoque predominantemente descriptivo e ingenieril basado en observaciones de campo y el uso de ecuaciones hidráulicas empíricas. Dicho estudio presenta importantes similitudes con la presente investigación en cuanto a la interpretación general del comportamiento del flujo y la eficiencia del diseño hidráulico inca.

En el trabajo de Wright, los caudales y tirantes fueron estimados en diferentes secciones del canal principal mediante relaciones empíricas y mediciones directas, lo que permitió identificar un régimen hidráulico predominantemente subcrítico ($Fr < 1$), condición que favorece un control estable del flujo. Estos resultados concuerdan con los hallazgos del presente estudio, donde tanto las mediciones con LSPIV como las simulaciones CFD confirmaron la predominancia del régimen subcrítico en la mayor parte del sistema. No obstante, el análisis numérico permitió identificar con mayor detalle zonas específicas de transición de régimen, particularmente en el acueducto principal superior, donde se evidencian cambios locales que influyen en la disipación de energía y el control hidráulico.

En relación con la rugosidad hidráulica, Wright estimó valores del coeficiente de Manning a partir de la observación de los materiales constructivos y la comparación con estructuras hidráulicas similares. En contraste, el presente estudio realizó una calibración directa de la rugosidad mediante simulaciones numéricas, obteniendo un valor equivalente de $ks = 0.225 \text{ m}$, correspondiente a un coeficiente de Manning aproximado de $n = 0.0165 \text{ s} \cdot m^{-\frac{1}{3}}$. Este resultado

confirma que los canales de Tipón presentan superficies relativamente lisas y optimizadas para el transporte del agua, validando cuantitativamente las conclusiones planteadas por Wright.

La principal diferencia entre ambos estudios radica en el enfoque metodológico. Mientras que el trabajo de Wright se sustenta en estimaciones empíricas y observaciones cualitativas, la presente investigación integra mediciones experimentales en campo con herramientas avanzadas de simulación CFD, lo que permite validar, refinar y ampliar los resultados previamente reportados en la literatura.

Asimismo, existen investigaciones desarrolladas desde un enfoque más cultural y cualitativo, como las realizadas por la Universidad Andina bajo la dirección del Dr. Víctor Arangoitia. Estos estudios, aunque no presentan resultados hidráulicos cuantitativos, coinciden en reconocer a Tipón como una obra maestra de la ingeniería hidráulica ancestral y destacan el avanzado conocimiento matemático y técnico de los incas. En este sentido, el presente trabajo complementa dichas investigaciones al aportar un análisis cuantitativo e ingenieril que fortalece la comprensión integral del sistema.

En conjunto, la comparación con la literatura existente demuestra que los resultados obtenidos son consistentes con estudios previos, al tiempo que aportan un mayor nivel de detalle y precisión en la caracterización hidráulica del sistema de Tipón. De esta manera, la presente investigación contribuye a cerrar brechas de conocimiento mediante la integración de enfoques empíricos, culturales y numéricos.

5.5 Implicancias de la investigación

La presente investigación presenta implicancias relevantes en los ámbitos de la ingeniería hidráulica, la conservación del patrimonio cultural y la investigación interdisciplinaria. Mediante la integración de herramientas modernas como LiDAR, LSPIV y la dinámica de fluidos

computacional (CFD) a través del software FLOW-3D, se logró caracterizar de manera cuantitativa el comportamiento hidráulico del sistema inca de Tipón, aportando nuevos conocimientos sobre su diseño, funcionamiento y eficiencia.

Desde el punto de vista ingenieril, los resultados obtenidos permiten validar la eficiencia hidráulica del diseño inca, demostrando que los canales fueron concebidos para operar mayoritariamente bajo condiciones de flujo subcrítico, con una adecuada disipación de energía y control de velocidades. La calibración de la rugosidad hidráulica, expresada mediante un valor equivalente de ks y su correspondiente coeficiente de Manning, constituye un aporte técnico que puede ser aplicado como referencia en el diseño y análisis de sistemas de riego y conducción de agua en terrenos de alta pendiente y condiciones similares a las del entorno andino.

Asimismo, la aplicación de CFD permitió identificar patrones de flujo, distribución de presiones y zonas de transición de régimen que no pueden ser descritas únicamente mediante técnicas de medición en campo. Esto demuestra la utilidad de la modelación numérica como una herramienta complementaria en estudios hidráulicos complejos, tanto en sistemas modernos como en infraestructuras históricas.

Desde una perspectiva metodológica, esta investigación evidencia que la combinación de mediciones experimentales en campo (LSPIV y vertederos), levantamientos topográficos de alta precisión (LiDAR) y simulaciones CFD constituye una estrategia robusta para el estudio de sistemas hidráulicos ancestrales. Este enfoque integrador puede ser replicado en otros sitios arqueológicos con infraestructura hidráulica, estableciendo un marco metodológico aplicable a futuras investigaciones similares.

En el ámbito cultural, los resultados contribuyen a una mejor comprensión del valor ingenieril del sistema hidráulico de Tipón, reforzando su importancia como patrimonio histórico

y tecnológico. La información generada permite evaluar el estado hidráulico de las estructuras sin necesidad de intervenciones físicas directas, lo que resulta fundamental para la conservación y gestión sostenible del sitio. Asimismo, el estudio fortalece el enfoque ingeniería–cultura, integrando herramientas tecnológicas modernas con la preservación del legado ancestral.

Finalmente, la presente investigación abre nuevas líneas de estudio orientadas al análisis de infraestructuras hidráulicas antiguas mediante herramientas de simulación avanzada. Se promueve así la colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, arqueólogos e historiadores, permitiendo ampliar el conocimiento existente y contrastar los resultados obtenidos con estudios previos, como los desarrollados por Wright, contribuyendo al desarrollo de investigaciones más profundas y de mayor alcance en el campo de la ingeniería hidráulica ancestral.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones:

El levantamiento **topográfico** realizado mediante tecnología LiDAR permitió determinar con alta precisión la topografía del Parque Arqueológico de Tipón, identificándose un terreno predominantemente sinuoso y de alta pendiente, con inclinaciones naturales superiores a 30°. Se concluye que los incas adaptaron eficazmente esta topografía mediante la construcción de aproximadamente 13 andenes casi horizontales, lo que permitió aprovechar la energía gravitacional para la conducción y distribución controlada del agua a lo largo del sistema hidráulico.

Se concluye que el sistema hidráulico de Tipón fue construido principalmente con piedras de origen volcánico (andesita) y sedimentario (caliza), seleccionadas estratégicamente según su función estructural. Los muros de contención de las terrazas emplean bloques de mayor tamaño, mientras que los canales utilizan piedras medianas y pequeñas finamente labradas, lo que garantiza estabilidad estructural, baja erosión y un adecuado comportamiento hidráulico del sistema.

El **análisis geométrico** permitió concluir que los canales presentan secciones relativamente uniformes, con dimensiones promedio cercanas a 0.30 m de ancho y 0.30 m de profundidad, con ligeras variaciones a lo largo de su recorrido. Esta uniformidad geométrica, combinada con la disposición de terrazas y estructuras de disipación, evidencia un diseño hidráulico intencional orientado al control del flujo y a la optimización de la distribución del agua para fines agrícolas y ceremoniales.

Se determinó que el **fluido** que circula en el sistema hidráulico de Tipón corresponde a agua incompresible y homogénea, con una temperatura promedio cercana a 14 °C, una densidad aproximada de 999.2 kg/m³ y una viscosidad dinámica del orden de 0.001168 kg/(m·s). Estas

propiedades fueron consideradas tanto en las mediciones de campo como en las simulaciones numéricas, permitiendo una adecuada caracterización hidráulica del sistema.

El análisis hidráulico y las simulaciones CFD permitieron concluir que **el flujo en el sistema** hidráulico de Tipón es predominantemente subcrítico, con números de Froude menores a 1 ($Fr \approx 0.4\text{--}0.9$) en la mayor parte del recorrido, garantizando un flujo estable y controlado. En zonas puntuales se identificaron transiciones de régimen asociadas a cambios de pendiente y geometría, como contracciones y resaltos hidráulicos controlados. Los caudales varían entre aproximadamente 4 L/s y 30 L/s, con velocidades comprendidas entre 0.5 m/s y 1.5 m/s, y tirantes hidráulicos entre 0.02 m y 0.05 m, evidenciando un manejo eficiente de la energía hidráulica.

En función de los resultados obtenidos, se concluye que el sistema hidráulico inca del Parque Arqueológico de Tipón fue diseñado bajo principios hidráulicos eficientes, sostenibles y adaptados al entorno natural además de caracterizar su flujo en su mayor parte como subcrítica para mejorar su eficiencia de riego. También la rugosidad tomó un papel importante en el comportamiento del flujo. Toda la información que se obtuvo fue gracias a la integración de levantamientos LiDAR, mediciones LSPIV y simulaciones CFD permitió evaluar de manera integral sus características topográficas, geométricas e hidráulicas, confirmando que la dinámica de fluidos computacional constituye una herramienta eficaz para el estudio y valoración de la ingeniería hidráulica ancestral.

6.2 Recomendaciones:

Se recomienda ampliar el análisis hidráulico a un mayor número de estructuras del sistema, incorporando no solo los canales principales, sino también canales secundarios, subterráneos y elementos complementarios, con el fin de lograr una comprensión integral del comportamiento hidráulico del conjunto del sistema hidráulico de Tipón.

Asimismo, se sugiere realizar campañas de medición de campo y simulaciones numéricas en distintas épocas del año, considerando la variabilidad estacional de los caudales. Esto permitirá evaluar la estabilidad del régimen hidráulico, la respuesta del sistema ante diferentes escenarios hidrológicos y la eficiencia de las estructuras de disipación de energía bajo condiciones variables de operación.

Se propone promover y fortalecer investigaciones interdisciplinarias, así como establecer convenios institucionales que faciliten el acceso a equipamiento especializado (como velocímetros acústicos Doppler – ADV) y licencias de software de simulación avanzada (FLOW-3D u otros modelos CFD). Ello contribuirá a profundizar la comprensión del comportamiento hidráulico del sistema hidráulico inca, permitiendo cuantificar con mayor precisión su eficiencia hidráulica y su rol en el control y mantenimiento del régimen subcrítico predominante.

Finalmente, se recomienda continuar con la simulación progresiva de las restantes estructuras hidráulicas incas del complejo, con la finalidad de alcanzar un modelamiento integral del sistema. Este enfoque permitirá analizar la interacción conjunta entre canales, obras de disipación y demás elementos hidráulicos, proporcionando una visión sistémica del funcionamiento hidráulico global del conjunto arquitectónico.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, J. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. 1995. *McGrawhill Inc.*
- 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.
- Blazek, J. (2015). Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications: Third Edition. En *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications: Third Edition*.
<https://doi.org/10.1016/C2013-0-19038-1>
- Bodart, G., Le Coz, J., Jodeau, M., & Hauet, A. (2024). Quantifying and Reducing the Operator Effect in LSPIV Discharge Measurements. *Water Resources Research*, 60(2).
<https://doi.org/10.1029/2023WR034740>
- Chanson, H. (2002). The Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(3).
- 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).
<https://doi.org/10.1090/noti1095>
- Cruzado Mendoza, G. E. (2023). *Eficiencia de sedimentación para diferentes caudales en un desarenador tipo tanque aplicando modelación numérica tridimensional: Caso el Ronquillo - Cajamarca*. Universidad Nacional de Cajamarca.
- 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*. Universidad Católica de Santa María Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil y del Ambiente Escuela Profesional de Ingeniería Civil .
- Dong, P., & Chen, Q. (2017). LiDAR remote sensing and applications. En *LiDAR Remote Sensing and Applications*. <https://doi.org/10.4324/9781351233354>
- Estruch-Samper, D. (2012). Particle Image Velocimetry, R. J. Adrian and J. Westerweel, Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge, CB2 2RU, UK. 2011. 558pp. £75. ISBN 978-0-521-44008-0. *The Aeronautical Journal*, 116(1176).
<https://doi.org/10.1017/s0001924000006734>
- Flow Science, Inc. (2023). *FLOW-3D, Version~2023R1*. <https://flow3d.com>

Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36(3).

<https://doi.org/10.1080/00221689809498626>

Giles, R. V., Evett, J. B., & Liu, C. (1994). Mecánica de Fluidos e Hidráulica. En *mgray-hill*.

Gullberg, R. (2017). Computational Fluid Dynamics in OpenFOAM - Mesh Generation and Quality. *Report TKP*, 4555.

Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (McGraw-Hill, Ed.; 6.^a ed., Vol. 2). México.

Loaiza Schiaffino, C. H. (1990). Sistemas de disipación de energía hidráulica en canales incas. *VIII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Piura*.

López Fry, A. A., & Chung Benites, J. W. (2023). *Estudio experimental de un vertedero triangular y modelación con OpenFOAM*. UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS.

Moin, P. (2010). Fundamentals of engineering numerical analysis. En *Fundamentals of Engineering Numerical Analysis* (Vol. 9780521884327). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511781438>

Mott, R. L. (1996). Mecánica de Fluidos Aplicada, 4a Edición. En *Editorial Pearson* (Vol. 7, Número 2).

Munson, B. R., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (1994). Fundamentals of fluid mechanics. *Fundamentals of fluid mechanics*. <https://doi.org/10.1201/b15874-2>

NOAA. (2012). Lidar 101 : An Introduction to Lidar Technology , Data , and Applications. *NOAA Coastal Services Center, November*.

Ortloff, C. R. (2022). Inka Hydraulic Engineering at the Tipon Royal Compound (Peru). *Water (Switzerland)*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/w14010102>

Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. <https://doi.org/10.13182/nse81-a20112>

Rodi, W. (1984). *Turbulence models and their application in hydraulics*. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(81\)90171-7](https://doi.org/10.1016/0045-7825(81)90171-7)

Sassetti Mendes, L. (2021). *Modelado Computacional de Dinámica de Fluidos de Flujos en Aliviaderos de Canal*. <https://github.com/fmarotta/kaobook>

Sotelo Avila, G. (2018). Hidraulica General. En *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952.

Streeter, V. L. (2002). Mecánica de los Fluidos - Merle. En *Thomson*.

- Tu, J., Yeoh, G. H., & Liu, C. (2018). Computational fluid dynamics: A practical approach. En *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*.
- Valdez Castañeda, A. V. (2019). *Evaluación, mejoramiento y optimización hidráulica del sistema de lagunas de estabilización de San José aplicando modelos CFD – Lambayeque, 201*. Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo.
- Wright, K., McEwan, G., & Wright, R. (2021). Tipón: masterpiece of hydraulic engineering from the Inca Empire. En *Devenir (Peru)* (Vol. 8, Número 16).
<https://doi.org/10.21754/devenir.v8i16.1365>
- Apple Inc. (2023). iPhone 15 Pro Max – Technical specifications. Apple.
<https://www.apple.com/iphone-15-pro/specs/>
- DigiKey. (2020). VCSELs put LiDAR into Apple iPhones: What can you do? DigiKey Electronics.
<https://www.digikey.com/en/blog/vcsels-put-lidar-into-apple-iphones-what-can-you-do>
- Cai, S., Liu, Y., Zhang, L., & Wang, J. (2024). Accuracy evaluation of smartphone LiDAR for 3D mapping applications. *Sensors*, 24(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s24092745>
- Polycam Inc. (2024). How to use LiDAR scanning on supported devices. Polycam Help Center.
<https://learn.poly.cam/hc/en-us/articles/360050937611>
- Apple Inc. (2023). LiDAR Scanner overview. Apple Developer Documentation.
<https://developer.apple.com/augmented-reality/lidar/>

ANEXOS

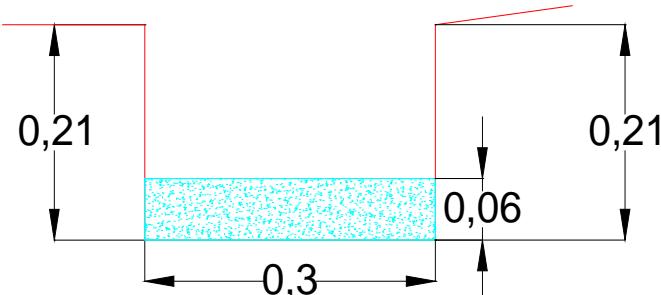
- 8.1 Matriz de consistencia:**
- 8.2 Ficha de recolección de datos llenados.**
- 8.3 Proceso De Elaboración Del Modelo De Elevación Digital (DEM) Del Parque Arqueológico En Terrasolid-Spatix.**
- 8.4 Proceso del cálculo de velocidades y caudales de los canales con la metodología LSPIV En RIVER- Matlab.**
- 8.5 Proceso del cálculo de velocidades y caudales de los canales con la metodología LSPIV En RIVER- Matlab.**
- 8.6 Proceso de simulación cfd de las principales obras hidráulicas de tipón En FLOW - 3D**
- 8.7 Permiso**
- 8.8 Panel fotográfico**

ANEXOS

8.1. Matriz de consistencia:

<u>MATRIZ DE CONSISTENCIA</u>								
PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS	Metodología	
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE	SUBVARIABLES DIMENSIONES	INDICADORES			
¿Cómo son las características que describen el sistema hidráulico inca utilizando la dinámica de fluidos computacional en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	Evaluar las características que describen el sistema hidráulico inca empleando la dinámica de fluidos computacional en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	La Dinámica de Fluidos Computacional permite evaluar las características y principios fundamentales del diseño del sistema hidráulico inca, evidenciando que este optimiza el uso del agua a través de estructuras adaptativas y eficientes, que minimizan pérdidas y se integran de manera sostenible, en armonía con la topografía y el entorno natural de Tipón.	SISTEMA HIDRAULICO INCA	Topografia del terreno	*Pendientes *Elevaciones digitales *Curvas de nivel	DRON RTK CON SENSOR LIDAR, LSPIV, CAMARAS FOTOGRAFICAS A 120FPS, FLOW - 3D, TRIPODES, VERTEEROS, TERMOMETROS, GPS DIFERENCIAL, WINCHAS, ESCALIMETROS, FLOTARDORES	Metodo de investigaciòn: Tipo de investigaciòn: La investigación tiene “Un enfoque cuantitativo”, ya que las variables fueron medidas numéricamente, lo que permitió medir y analizar datos cuantitativos para determinar las características y el comportamiento del sistema hidráulico de Tipón permitiéndonos evaluar su funcionamiento y eficiencia	
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS		Materiales de conformación	*Caracteristicas fisicas del enrocamiento *Petografía *Rugosidad			
• ¿Cómo es la topografía del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	• Determinar la topografía del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	* La ubicación de Tipón responde a la topografía regional y al acceso a fuentes hídricas, aprovechadas mediante terrazas y pendientes que optimizan el control del flujo por gravedad y aseguran el funcionamiento eficiente y sostenible del sistema hidráulico inca		Caracteristias geometricas	*Forma geometrica *Pendiente *Ancho *Altura *Radio Hidráulico *Perimetro mojado		Nivel de investigación: El nivel de investigación es “Exploratorio – Descriptivo” ya que la investigación se centra en estudiar la variable de estudio “Sistema Hidráulico inca de Tipón” con el fin de evaluar sus características y comportamiento, con ayuda del CFD	
• ¿Cuáles son los Materiales de conformación de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	• Identificar los materiales de conformación de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	• Los materiales naturales empleados en las obras hidráulicas incas de Tipón, como la piedra tallada y materiales terrosos, presentan propiedades de rugosidad y permeabilidad que contribuyen a la disipación de energía y al control de filtraciones del flujo.						
• ¿Cuáles son las características geométricas de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	• Determinar las características geométricas de las obras hidráulicas incas en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	• Las características geométricas de los canales y estructuras hidráulicas de Tipón presentan secciones y pendientes diseñadas para evitar desbordamientos y optimizar de manera eficiente el comportamiento del flujo.		Fluido	*Densidad *Viscosidad *Temperatura		Diseño de la investigación: Según el diseño, la investigación es no experimental porque no implica la manipulación de la variable: “Sistema hidráulico inca de Tipón” para analizar y evaluar su funcionamiento. Si no se trata de describir Tipón, para ello se realizaron levantamientos topográficos con LIDAR con el fin de tener el relieve de todo Tipón para posteriormente caracterizar el sistema hidráulico con la metodología LSPIV y finalmente poder realizar simulaciones 3D con ayuda del CFD haciendo ensayos técnicos en FLOW 3D evaluándose las características del sistema hidráulico del parque arqueológico de Tipón.	
• ¿Cuáles son las propiedades del fluido del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	• Determinar las propiedades del fluido del sistema hidráulico inca de Tipón en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	• Las propiedades del fluido del sistema hidráulico inca de Tipón se caracterizan por una viscosidad baja y una distribución de presión uniforme a lo largo del sistema, lo que evita puntos de alta presión que puedan generar daños estructurales y asegura un flujo estable.						
• ¿Cuáles son las características del flujo del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024?	• Determinar las características del flujo del sistema hidráulico inca en el Parque Arqueológico de Tipón, Cusco 2024	• El flujo del sistema hidráulico inca de Tipón es predominantemente subcrítico en secciones largas y condiciones críticas en áreas específicas, lo que favorece la estabilidad y eficiencia en la conducción del agua.		Flujo	*Caudal liquido *Velocidad promedio *Regimen Hidraulico			

8.2. Ficha de recolección de datos llenados.

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL			
MEDICIONES DE CANALES				
Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe				
Fecha: 11/11/2024				
Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco				
Temperatura: 14°C				
Observaciones: Entrada a Tipón				
Nº:	1	UBICACIÓN		
Código:	C-L18	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	Inicio	Inicio	198,679.15	8,497,916.65
Altitud (msnm):	3,448.89	Fin	198,670.16	8,497,903.82
Descripción:				
Medición de secciones				
Medición				
Prog-Canal (P+):	3.700 m			
Longitud (L+):	15.670 m			
Base inferior (b):	0.295 m			
Base superior (b):	0.300 m			
Altura Derecha h(d):	0.215 m			
Altura Izquierda h(i):	0.220 m			
Talud Derecha Z(d):	0.040 m/m			
Talud Izquierda Z(i):	0.043 m/m			
Tirante Y:	0.060 m			



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

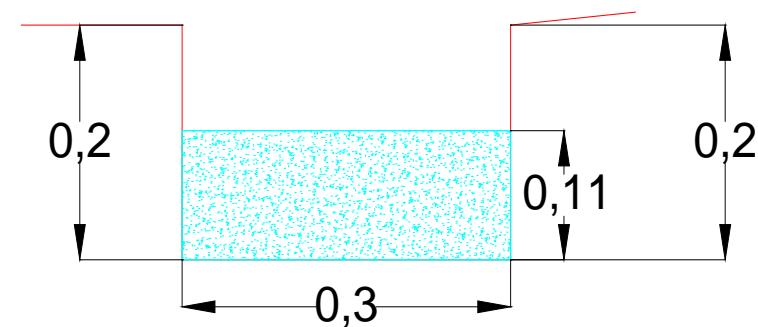
Nº:	2	UBICACIÓN		
Código:	C-L17	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	1	Inicio	198,703.17	8,497,945.84
Altitud (msnm):	3,456.50	Fin	198,680.19	8,497,918.45

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	20.000	m
Longitud (L+):	35.750	m
Base inferior (b):	0.283	m
Base superior (b):	0.310	m
Altura Derecha h(d):	0.202	m
Altura Izquierda h(i):	0.202	m
Talud Derecha Z(d):	0.063	m/m
Talud Izquierda Z(i):	1.000	m/m
Tirante Y:	0.110	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

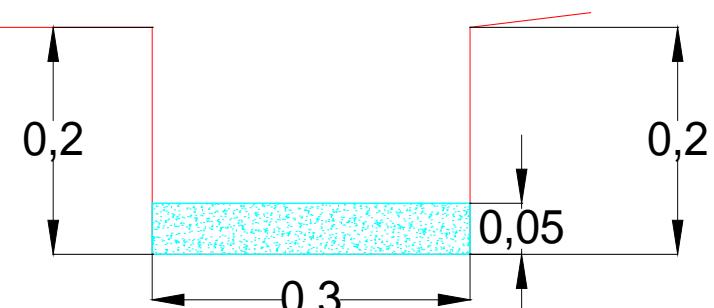
Nº:	3	UBICACIÓN		
Código:	C-L16	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	2	Inicio	198,726.07	8,497,971.97
Altitud (msnm):	3,464.34	Fin	198,704.74	8,497,947.55

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	20.000	m
Longitud (L+):	34.420	m
Base inferior (b):	0.289	m
Base superior (b):	0.310	m
Altura Derecha h(d):	0.204	m
Altura Izquierda h(i):	0.192	m
Talud Derecha Z(d):	0.010	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.020	m/m
Tirante Y:	0.050	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

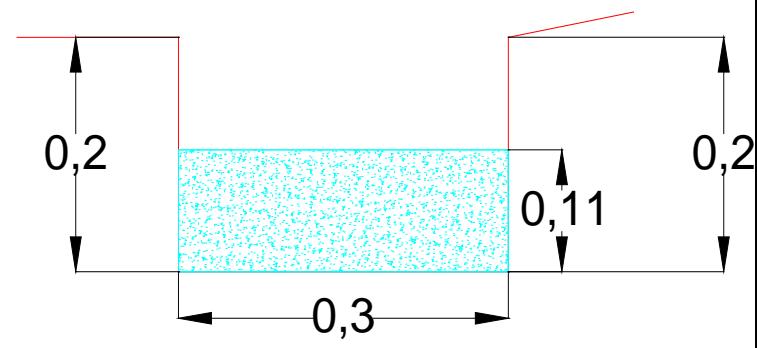
Nº:	4	UBICACIÓN		
Código:	C-L14	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	3	Inicio	198,746.18	8,497,998.18
Altitud (msnm):	3,468.87	Fin	198,727.22	8,497,973.44

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	20.000	m
Longitud (L+):	31.160	m
Base inferior (b):	0.280	m
Base superior (b):	0.300	m
Altura Derecha h(d):	0.202	m
Altura Izquierda h(i):	0.202	m
Talud Derecha Z(d):	0.009	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.009	m/m
Tirante Y:	0.105	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

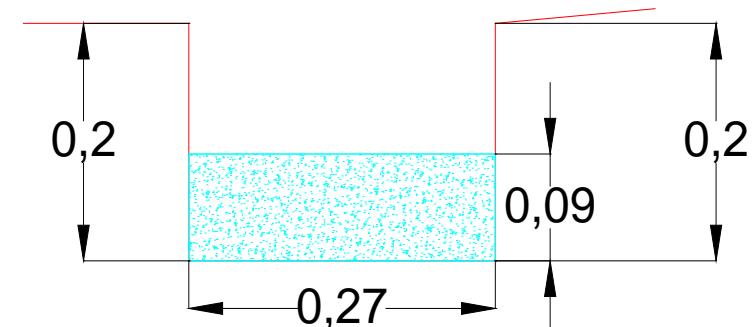
Nº:	5	UBICACIÓN		
Código:	C-H12-I	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	2	Inicio	198,726.13	8,497,972.95
Altitud (msnm):	3,465.35	Fin	198,701.12	8,497,995.98

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	20.000	m
Longitud (L+):	34.001	m
Base inferior (b):	0.272	m
Base superior (b):	0.272	m
Altura Derecha h(d):	0.200	m
Altura Izquierda h(i):	0.208	m
Talud Derecha Z(d):	0.016	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.016	m/m
Tirante Y:	0.090	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

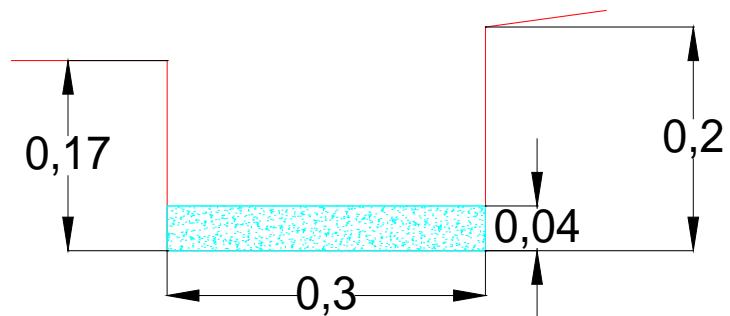
Nº:	6	UBICACIÓN		
Código:	C-H11-I	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	3	Inicio	198,694.98	8,498,001.56
Altitud (msnm):	3,469.30	Fin	198,701.34	8,497,997.53

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	7.500	m
Longitud (L+):	8.680	m
Base inferior (b):	0.300	m
Base superior (b):	0.300	m
Altura Derecha h(d):	0.200	m
Altura Izquierda h(i):	0.170	m
Talud Derecha Z(d):	0.171	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.094	m/m
Tirante Y:	0.040	m



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

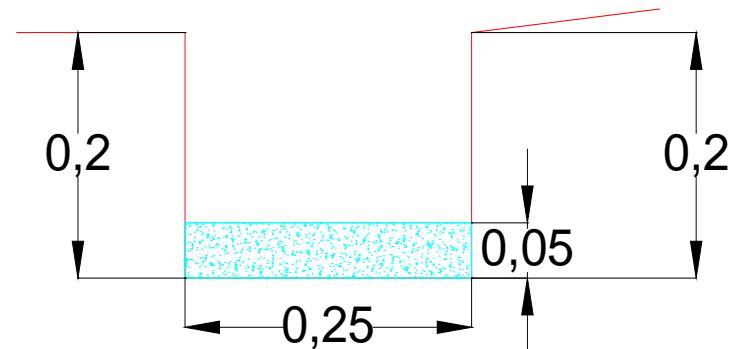
Nº:	7	UBICACIÓN		
Código:	C-L15	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	3	Inicio	198,710.61	8,498,032.21
Altitud (msnm):	3,472.92	Fin	198,693.37	8,498,003.56

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	20.000	m
Longitud (L+):	33.434	m
Base inferior (b):	0.250	m
Base superior (b):	0.250	m
Altura Derecha h(d):	0.198	m
Altura Izquierda h(i):	0.204	m
Talud Derecha Z(d):	0.000	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.000	m/m
Tirante Y:	0.050	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

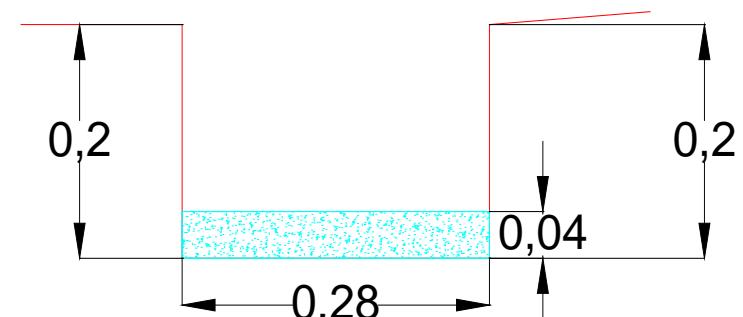
Nº:	8	UBICACIÓN		
Código:	C-L13	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	4	Inicio	198,721.88	8,498,062.34
Altitud (msnm):	3,477.48	Fin	198,709.52	8,498,033.31

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	25.000	m
Longitud (L+):	35.230	m
Base inferior (b):	0.280	m
Base superior (b):	0.280	m
Altura Derecha h(d):	0.190	m
Altura Izquierda h(i):	0.200	m
Talud Derecha Z(d):	0.000	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.000	m/m
Tirante Y:	0.040	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

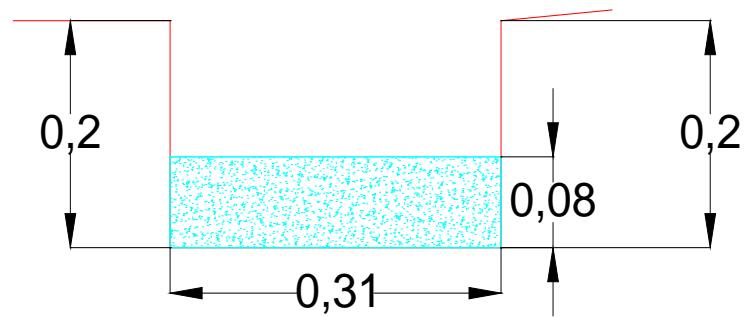
Nº:	9	UBICACIÓN		
Código:	C-L12	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	4	Inicio	198,762.04	8,498,021.78
Altitud (msnm):	3,472.96	Fin	198,747.22	8,497,999.66

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	24.600	m
Longitud (L+):	27.200	m
Base inferior (b):	0.310	m
Base superior (b):	0.310	m
Altura Derecha h(d):	0.211	m
Altura Izquierda h(i):	0.200	m
Talud Derecha Z(d):	0.003	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.003	m/m
Tirante Y:	0.080	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 12/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

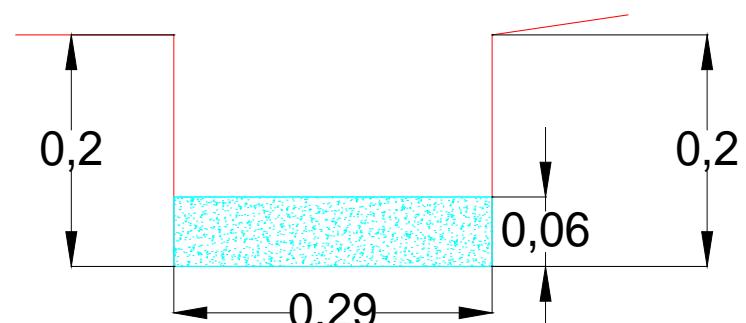
Observaciones: Entrada a Tipón

Nº:	10	UBICACIÓN		
Código:	C-L11	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	5	Inicio	198,770.89	8,498,112.53
Altitud (msnm):	3,481.38	Fin	198,722.34	8,498,063.88

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	20.000	m
Longitud (L+):	68.730	m
Base inferior (b):	0.290	m
Base superior (b):	0.280	m
Altura Derecha h(d):	0.195	m
Altura Izquierda h(i):	0.200	m
Talud Derecha Z(d):	0.050	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.050	m/m
Tirante Y:	0.060	m





MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 12/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

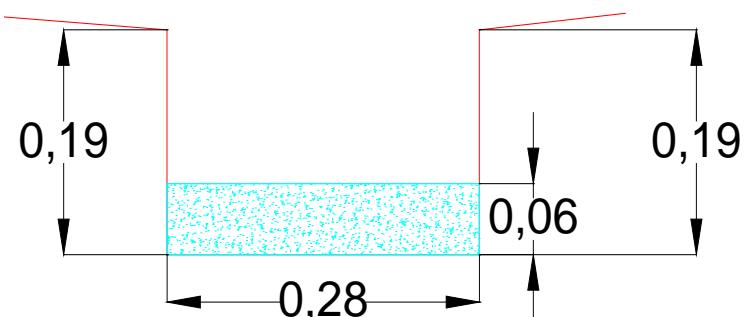
Nº:	11	UBICACIÓN		
Código:	C-H10-D	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	5	Inicio	198,771.36	8,498,112.38
Altitud (msnm):	3,481.38	Fin	198,814.08	8,498,070.82

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+)	: 20.000	m
Longitud (L+)	: 59.600	m
Base inferior (b)	: 0.282	m
Base superior (b)	: 0.283	m
Altura Derecha h(d)	: 0.190	m
Altura Izquierda h(i)	: 0.190	m
Talud Derecha Z(d)	: 0.160	m/m
Talud Izquierda Z(i)	: 0.160	m/m
Tirante Y	: 0.060	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 12/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

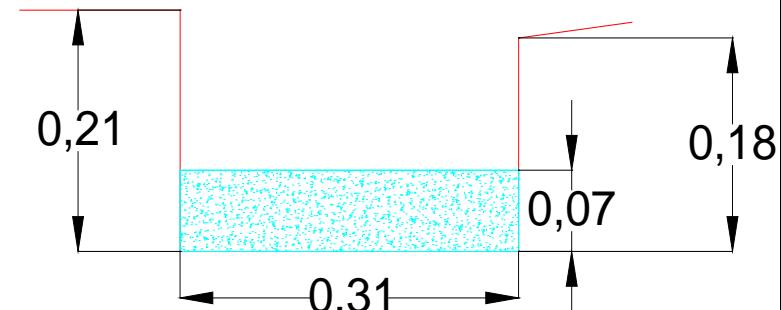
Observaciones: Entrada a Tipón

N°:	12	UBICACIÓN		
Código:	C-L10	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	5	Inicio	198,813.84	8,498,070.39
Altitud (msnm):	3,482.21	Fin	198,764.21	8,498,023.55

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+)	: 20.000	m
Longitud (L+)	: 70.700	m
Base inferior (b)	: 0.312	m
Base superior (b)	: 0.300	m
Altura Derecha h(d)	: 0.184	m
Altura Izquierda h(i)	: 0.208	m
Talud Derecha Z(d)	: 0.160	m/m
Talud Izquierda Z(i)	: 0.160	m/m
Tirante Y	: 0.070	m



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

Nº:	13	UBICACIÓN		
Código:	C-H09-D	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	5	Inicio	198,820.39	8,498,064.75
Altitud (msnm):	3,485.79	Fin	198,815.33	8,498,069.55

Descripción:

Medición de secciones		
Medición		
Prog-Canal (P+):	3.000	m
Longitud (L+):	6.973	m
Base inferior (b):	0.300	m
Base superior (b):	0.300	m
Altura Derecha h(d):	0.286	m
Altura Izquierda h(i):	0.300	m
Talud Derecha Z(d):	0.040	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.030	m/m
Tirante Y:	0.130	m



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

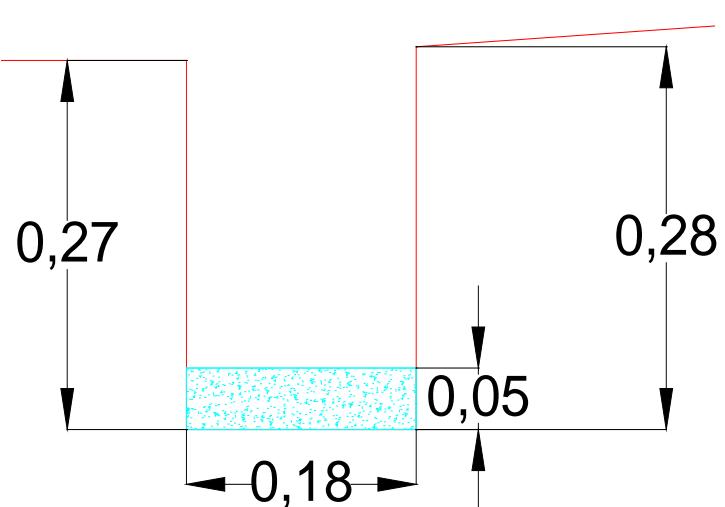
Observaciones: Entrada a Tipón

Nº:	14	UBICACIÓN		
Código:	C-H08-D	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	5	Inicio	198,825.11	8,498,060.29
Altitud (msnm):	3,489.24	Fin	198,821.30	8,498,063.92

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	3.000	m
Longitud (L+):	5.260	m
Base inferior (b):	0.175	m
Base superior (b):	0.180	m
Altura Derecha h(d):	0.280	m
Altura Izquierda h(i):	0.270	m
Talud Derecha Z(d):	0.070	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.070	m/m
Tirante Y:	0.050	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 12/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

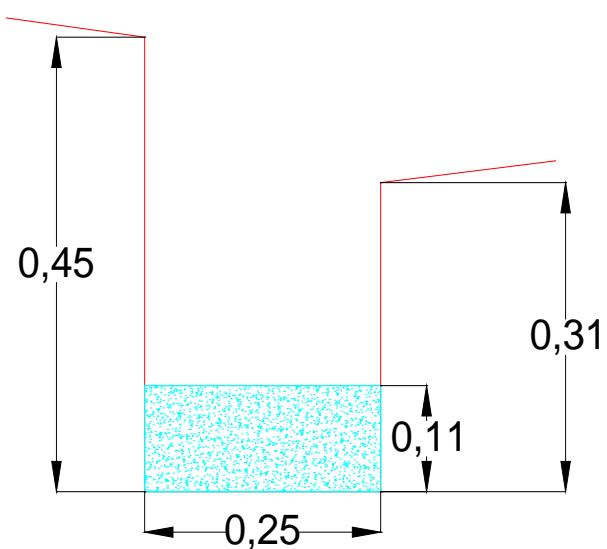
Observaciones: Entrada a Tipón

Nº:	15	UBICACIÓN		
Código:	C-H07-D	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	5	Inicio	198,828.59	8,498,057.16
Altitud (msnm):	3,492.52	Fin	198,825.64	8,498,059.86

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	2.000	m
Longitud (L+):	4.000	m
Base inferior (b):	0.250	m
Base superior (b):	0.260	m
Altura Derecha h(d):	0.306	m
Altura Izquierda h(i):	0.450	m
Talud Derecha Z(d):	0.160	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.160	m/m
Tirante Y:	0.105	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 12/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

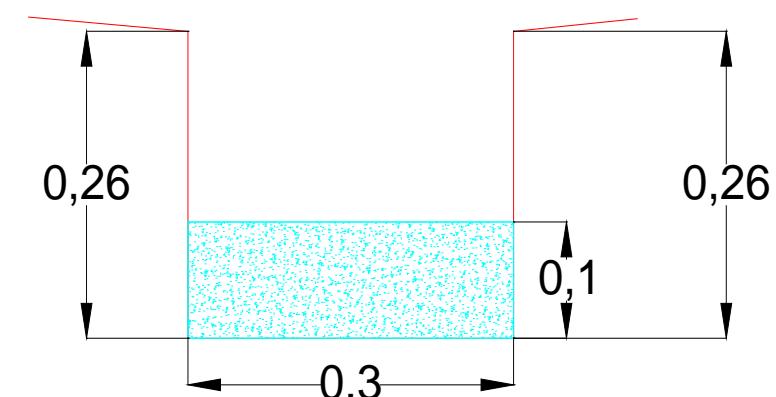
Observaciones: Entrada a Tipón

N°:	16	UBICACIÓN		
Código:	C-H06-D	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	6	Inicio	198,823.17	8,498,067.15
Altitud (msnm):	3,485.90	Fin	198,819.83	8,498,070.36

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	2.000	m
Longitud (L+):	4.630	m
Base inferior (b):	0.300	m
Base superior (b):	0.300	m
Altura Derecha h(d):	0.262	m
Altura Izquierda h(i):	0.264	m
Talud Derecha Z(d):	0.050	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.050	m/m
Tirante Y:	0.100	m





MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 13/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

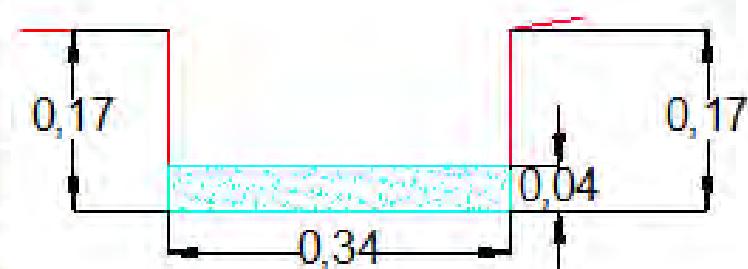
Observaciones: Entrada a Tipón

Nº:	18	UBICACIÓN		
Código:	C-L08	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	6	Inicio	198,844.64	8,498,088.92
Altitud (msnm):	3,486.21	Fin	198,823.13	8,498,067.72

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	15.000	m
Longitud (L+):	30.203	m
Base inferior (b):	0.350	m
Base superior (b):	0.340	m
Altura Derecha h(d):	0.170	m
Altura Izquierda h(i):	Pared	m
Talud Derecha Z(d):	0.050	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.035	m/m
Tirante Y:	0.040	m





MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 11/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

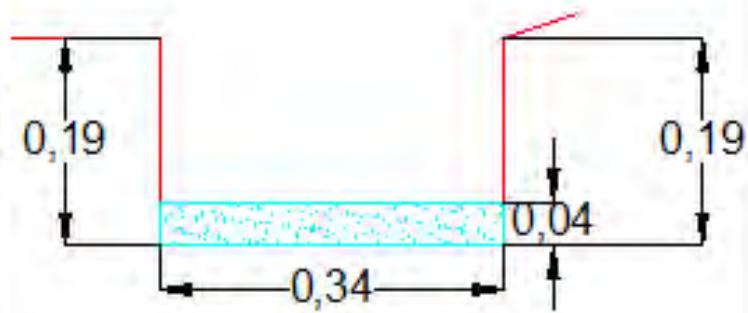
Observaciones: Entrada a Tipón

Nº:	19	UBICACIÓN		
Código:	C-L07	Coordenadas	X(Este)	Y(Norte)
Terraza:	7	Inicio	198,867.25	8,498,111.92
Altitud (msnm):	3,488.81	Fin	198,845.82	8,498,089.90

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	15.000	m
Longitud (L+):	30.720	m
Base inferior (b):	0.340	m
Base superior (b):	0.345	m
Altura Derecha h(d):	0.190	m
Altura Izquierda h(i):	Pared	m
Talud Derecha Z(d):	0.050	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.020	m/m
Tirante Y:	0.040	m





MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 13/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14 °C

Observaciones: Entrada a Tipón

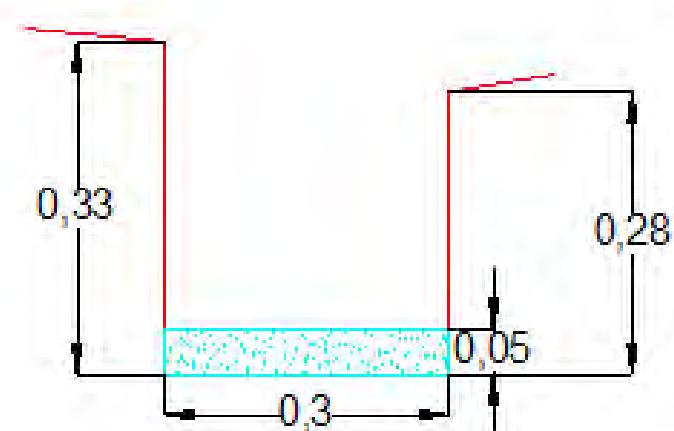
Nº:	20	UBICACIÓN		
Código:	C-L06	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	6-7	Inicio	198,884.32	8,498,113.87
Altitud (msnm):	3,495.61	Fin	198,829.82	8,498,056.96

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	60.000	m
Longitud (L+):	78.800	m
Base inferior (b):	0.300	m
Base superior (b):	0.305	m
Altura Derecha h(d):	0.280	m
Altura Izquierda h(i):	0.330	m
Talud Derecha Z(d):	0.050	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.050	m/m
Tirante Y:	0.050	m





MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 13/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

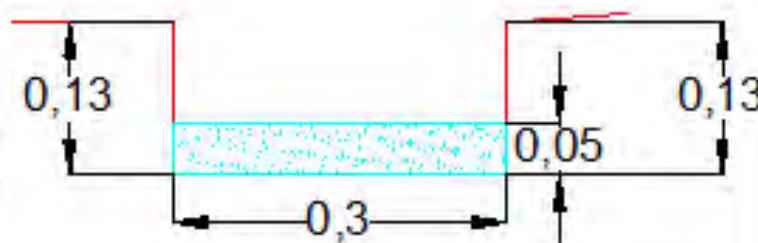
Nº:	21	UBICACIÓN		
Código:	C-L05	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	8	Inicio	198,884.40	8,498,129.70
Altitud (m s.n.m):	3,491.57	Fin	198,868.54	8,498,112.69

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	10.000	m
Longitud (L+):	23.260	m
Base inferior (b):	0.300	m
Base superior (b):	0.300	m
Altura Derecha h(d):	0.130	m
Altura Izquierda h(i):	Pared	m
Talud Derecha Z(d):	0.000	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.000	m/m
Tirante Y:	0.045	m



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 13/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

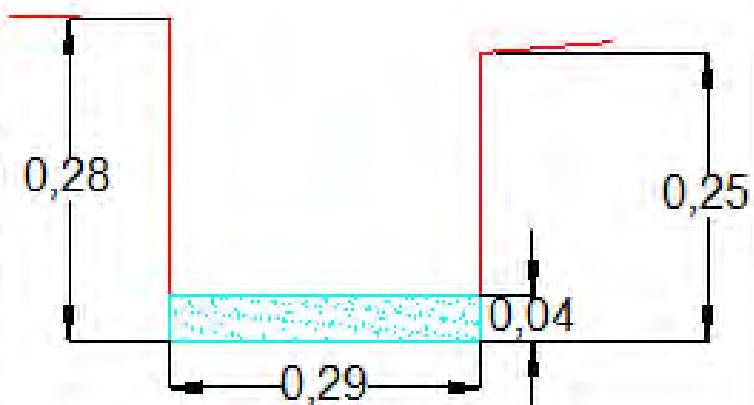
Observaciones: Entrada a Tipón

Nº:	22	UBICACIÓN		
Código:	C-L04	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	9	Inicio	198,898.98	8,498,144.14
Altitud (msnm):	3,494.48	Fin	198,884.86	8,498,130.47

Descripción:

Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	15.000	m
Longitud (L+):	21.940	m
Base inferior (b):	0.290	m
Base superior (b):	0.285	m
Altura Derecha h(d):	0.254	m
Altura Izquierda h(i):	0.284	m
Talud Derecha Z(d):	0.011	m/m
Talud Izquierda Z(i):	-0.015	m/m
Tirante Y:	0.040	m



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 13/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14 °C

Observaciones: Entrada a Tipón

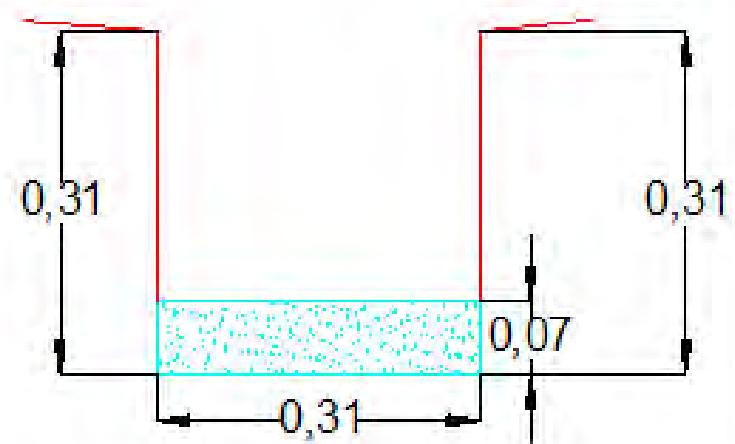
Nº:	23	UBICACIÓN		
Código:	C-L03	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	8 - 9	Inicio	198,907.52	8,498,137.98
Altitud (msnm):	3,496.11	Fin	198,885.25	8,498,114.87

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog.-Canal (P+):	40.000	m
Longitud (L+):	32.090	m
Base inferior (b):	0.305	m
Base superior (b):	0.305	m
Altura Derecha h(d):	0.300	m
Altura Izquierda h(i):	0.305	m
Talud Derecha Z(d):	0.001	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.001	m/m
Tirante Y:	0.065	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 14/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

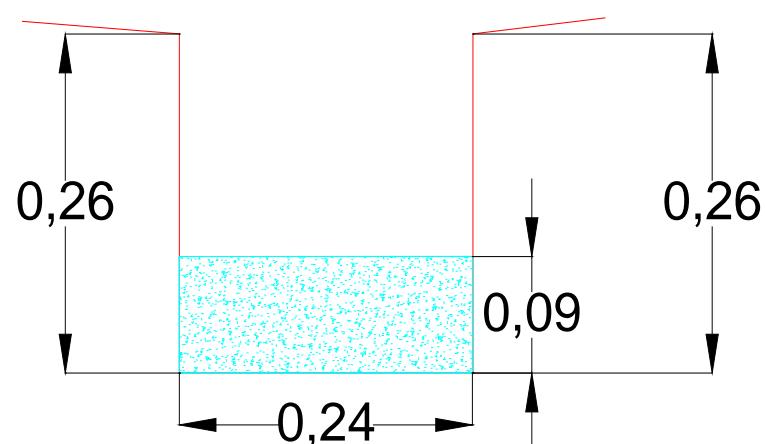
N°:	24	UBICACIÓN		
Código:	C-H04-I	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	8-9	Inicio	198,907.56	8,498,138.51
Altitud (msnm):	3,496.16	Fin	198,900.07	8,498,145.16

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):		m
Longitud (L+):		m
Base inferior (b):		m
Base superior (b):		m
Altura Derecha h(d):		m
Altura Izquierda h(i):		m
Talud Derecha Z(d):		m/m
Talud Izquierda Z(i):		m/m
Tirante Y:		m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 14/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

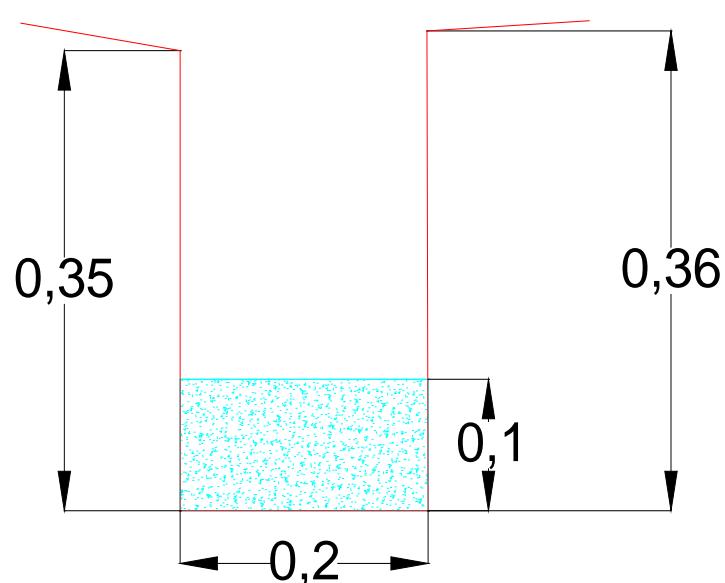
Nº:	25	UBICACIÓN		
Código:	C-D02	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	10	Inicio	198,923.19	8,498,167.74
Altitud (msnm):	3,497.64	Fin	198,918.77	8,498,149.74

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+)	(P+): 14.000	m
Longitud (L+)	(L+): 18.530	m
Base inferior (b)	(b): 0.200	m
Base superior (b)	(b): 0.210	m
Altura Derecha h(d)	h(d): 0.365	m
Altura Izquierda h(i)	h(i): 0.350	m
Talud Derecha Z(d)	Z(d): 0.050	m/m
Talud Izquierda Z(i)	Z(i): 0.050	m/m
Tirante Y	Y: 0.100	m





UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 14/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

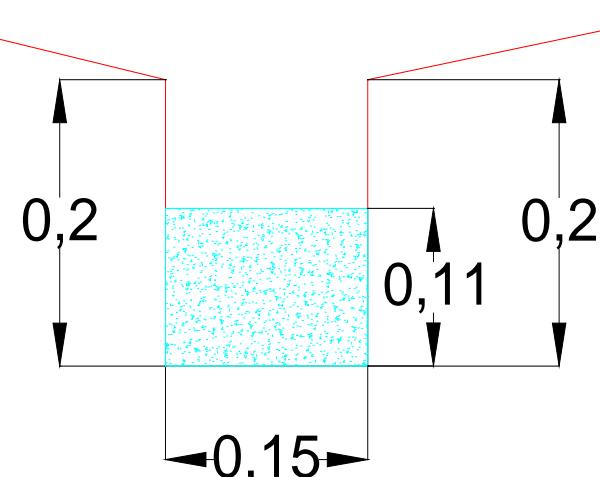
N°:	26	UBICACIÓN		
Código:	C-D01	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	10	Inicio	198,916.13	8,498,173.82
Altitud (msnm):	3,497.48	Fin	198,908.57	8,498,139.70

Descripción:



Medición de secciones

Medición		
Prog-Canal (P+):	15.000	m
Longitud (L+):	34.950	m
Base inferior (b):	0.150	m
Base superior (b):	0.150	m
Altura Derecha h(d):	0.200	m
Altura Izquierda h(i):	0.200	m
Talud Derecha Z(d):	0.000	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.000	m/m
Tirante Y:	0.110	m



MEDICIONES DE CANALES

Responsables: Ernest Mik Meza Torres - Gabriel Rodrigo Huaman Quispe

Fecha: 14/11/2024

Lugar: Complejo Arqueológico de Tipón, Cusco

Temperatura: 14°C

Observaciones: Entrada a Tipón

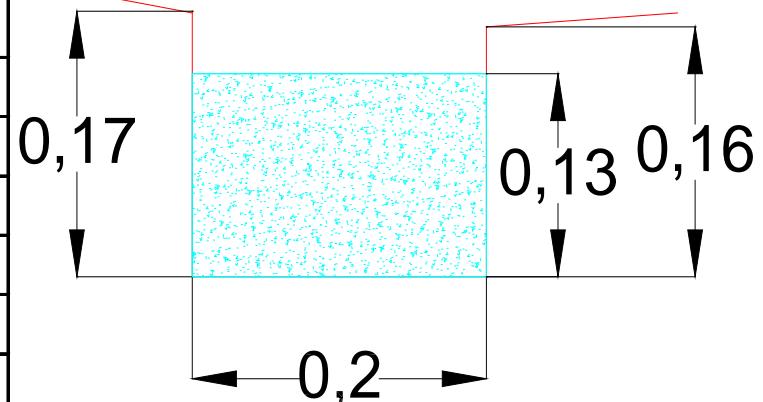
Nº:	27	UBICACIÓN		
Código:	C-H03-I	Coordenadas	X (Este)	Y (Norte)
Terraza:	10	Inicio	198,927.11	8,498,164.99
Altitud (msnm):	3,497.84	Fin	198,900.75	8,498,190.21

Descripción:



Medición de secciones

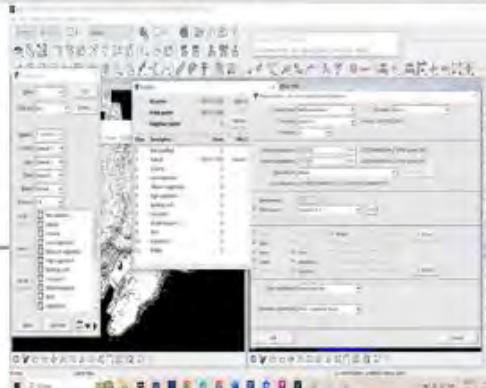
Medición		
Prog-Canal (P+):	15.000	m
Longitud (L+):	36.482	m
Base inferior (b):	0.200	m
Base superior (b):	0.210	m
Altura Derecha h(d):	0.160	m
Altura Izquierda h(i):	0.175	m
Talud Derecha Z(d):	0.050	m/m
Talud Izquierda Z(i):	0.060	m/m
Tirante Y:	0.130	m



8.3. Proceso De Elaboración Del Modelo De Elevación Digital (DEM) Del Parque Arqueológico En Terrasolid-Spatix.

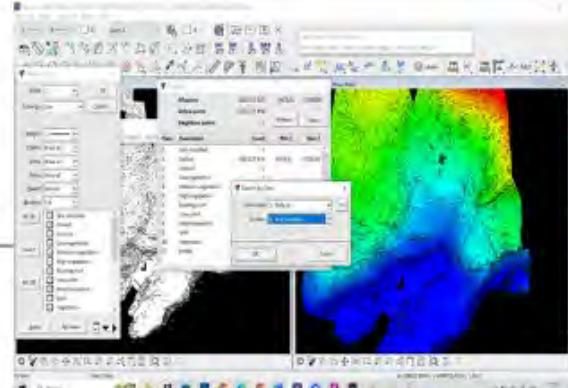
MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE TIPON

Proceso De Elaboración Del Modelo De Elevación Digital (DEM) Del Parque Arqueológico De Tipón En Terrasolid-Spatix.



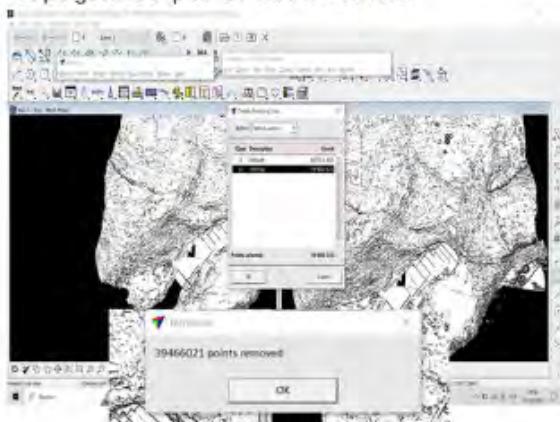
1

Cargamos los puntos y la trayectoria recopilados en el levantamiento topográfico por el Dron LiDAR.



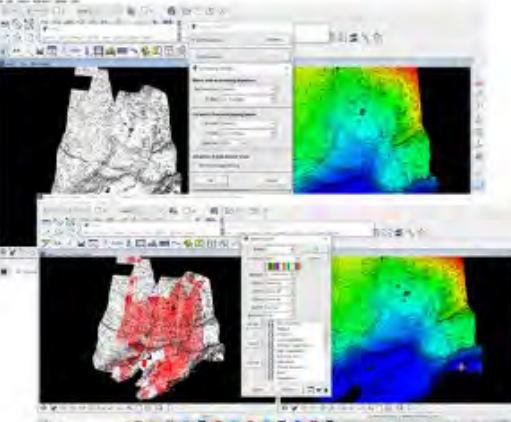
2

Observamos que los puntos están clasificados por defecto(default), lo pasamos a puntos no clasificados.



4

Eliminamos los puntos de ruido

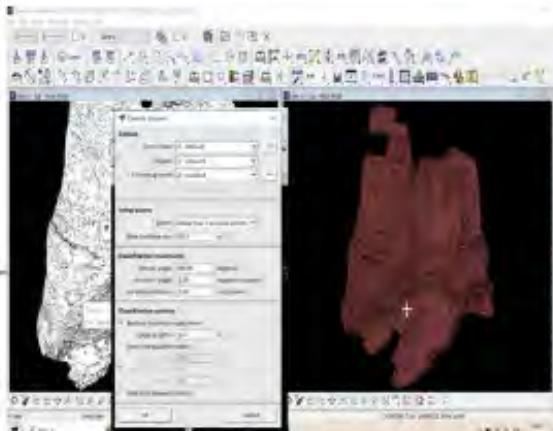


3

Clasificamos los puntos de sobrevuelo o ruido para después eliminarlo, por que son puntos superpuestos en otros.

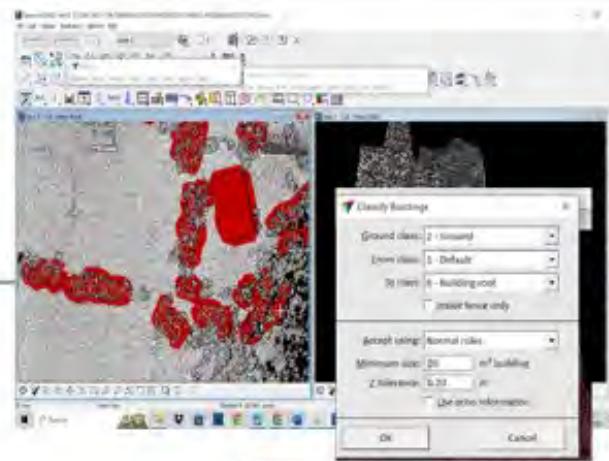
MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE TIPON

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



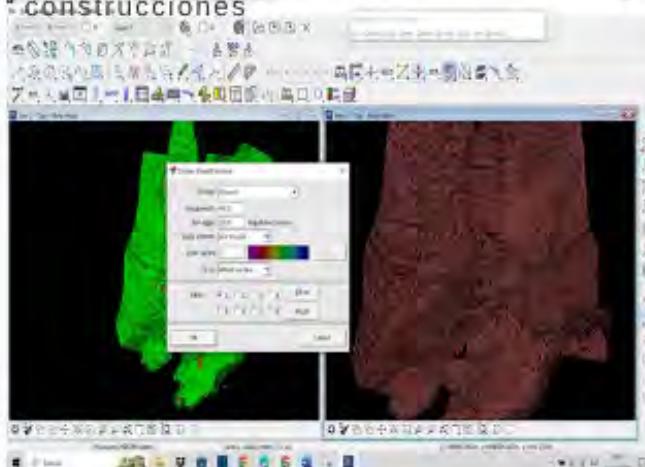
5

Realizamos la capa terreno o la clasificación de puntos del terreno. Teniendo en cuenta los angulos de terreno y el tamaño maximo de las construcciones



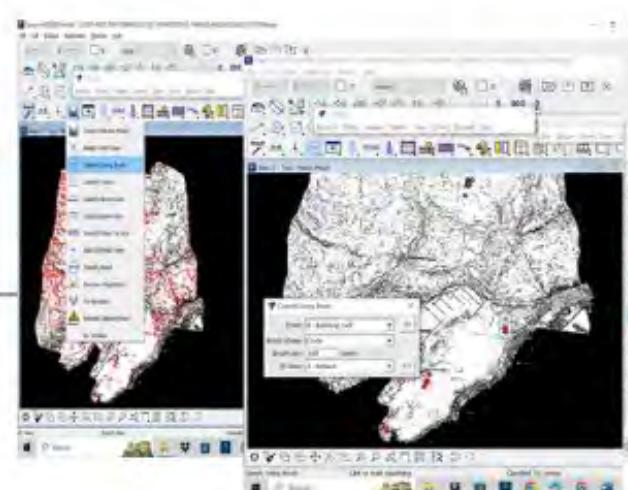
6

Realizamos la clasificación de los puntos pertenecientes a construcciones, se observa que considera construccion a algunos arboles.



8

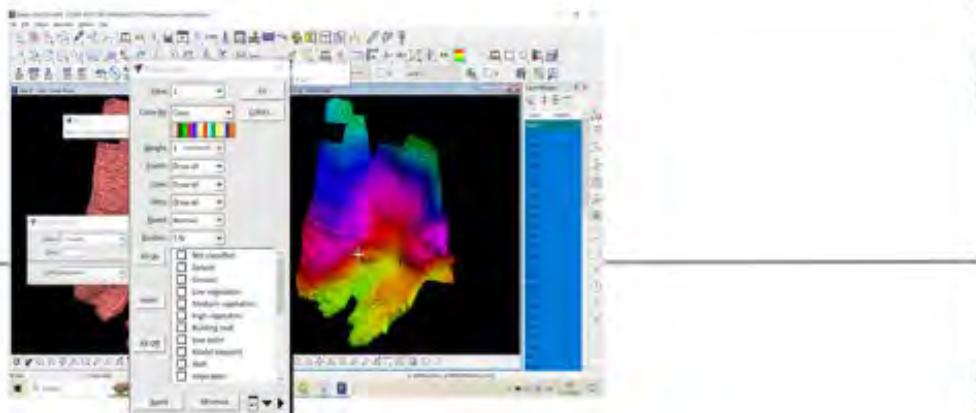
Realizamos la clasificación de la vegetación con TerraScann. Y ya se tienen los puntos clasificados



7

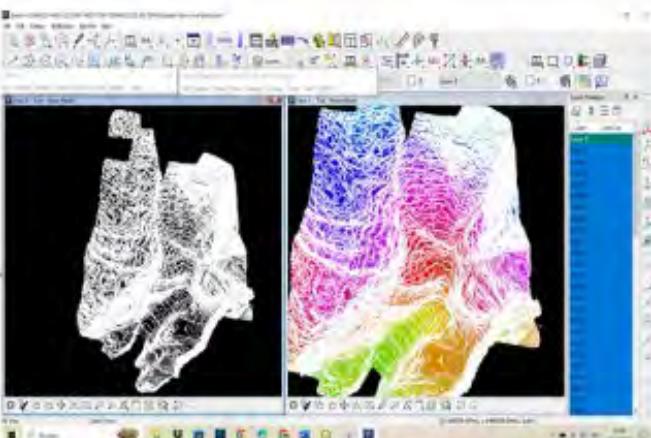
Corregimos la clasificación con la herramienta Clasify Using Brush. No se clasificaron las personas porque el levantamiento se hizo en la madrugada.

MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE TIPON



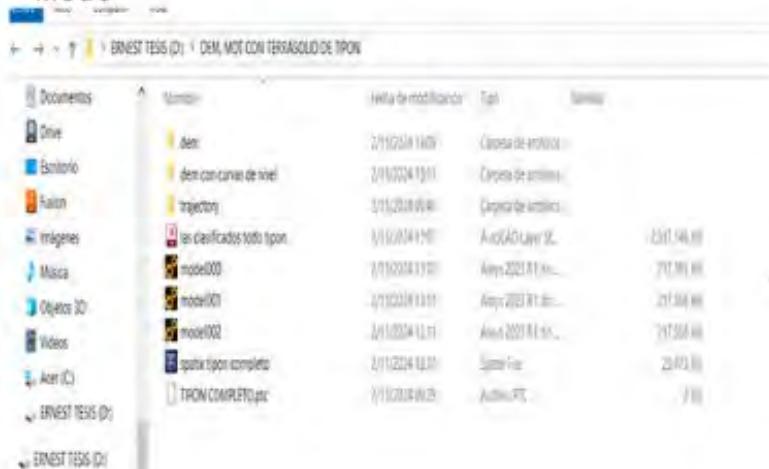
9

Con los puntos clasificados, hagarramos los puntos del terreno y realizamos el Modelo de Elevación Digital con la herramienta Display Mode



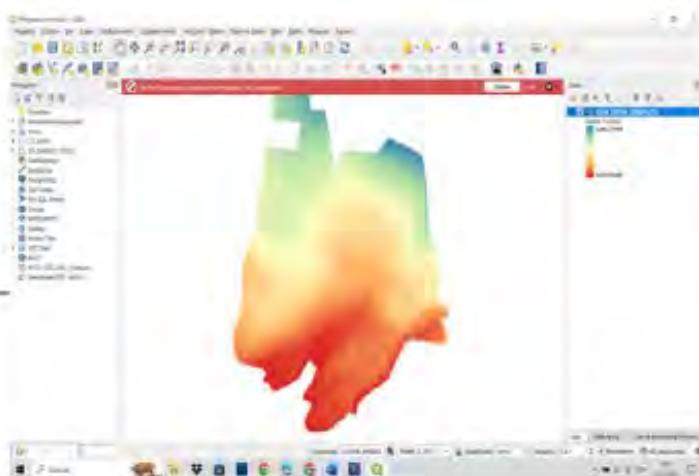
10

Con la misma herramienta realizamos las curvas de nivel a 1 metro



12

Se guarda los archivos en una carpeta para su posterior uso.

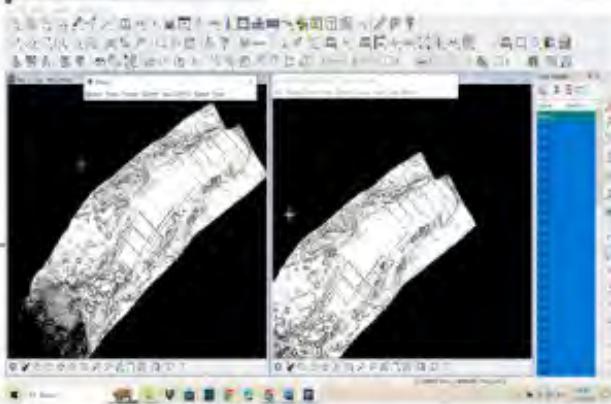


10

Exportamos el archivo en formato TIF,
capa raster

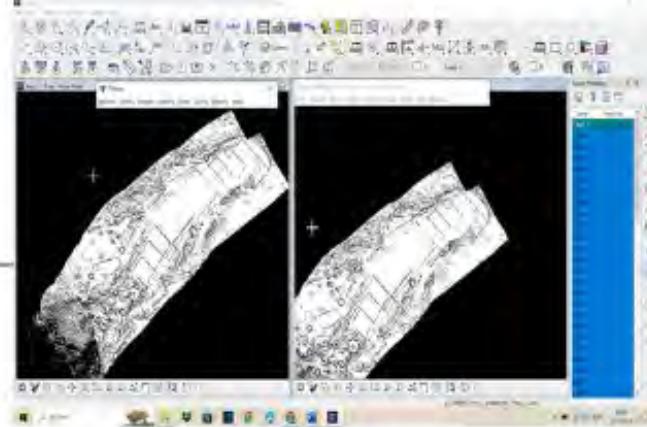
MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE TIPON TERRAZAS

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



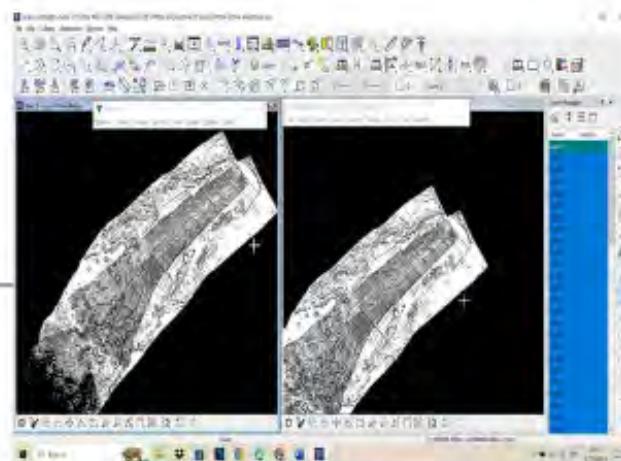
1

Cargamos los puntos y la trayectoria recopilados en el levantamiento topografico por el Dron LiDAR.



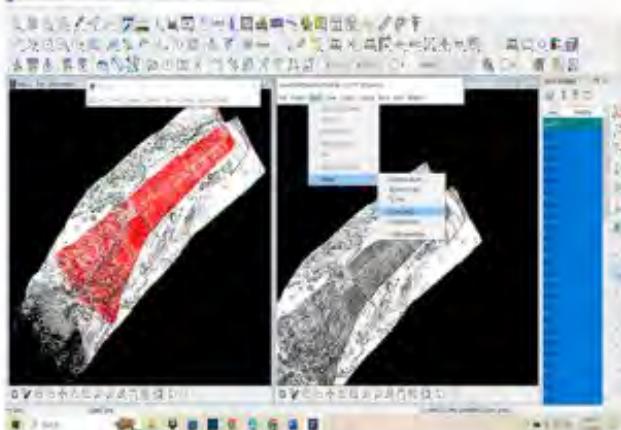
2

Observamos que los puntos estan clasificados por defecto(default), lo pasamos a puntos no clasificados.



3

Clasificamos los puntos de sobrevuelo o ruido para despues eliminarlo, por que son puntos superpuestos en otros.

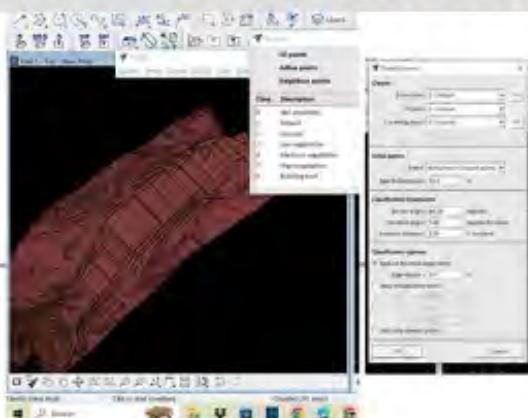


4

Elimanos los puntos de ruido

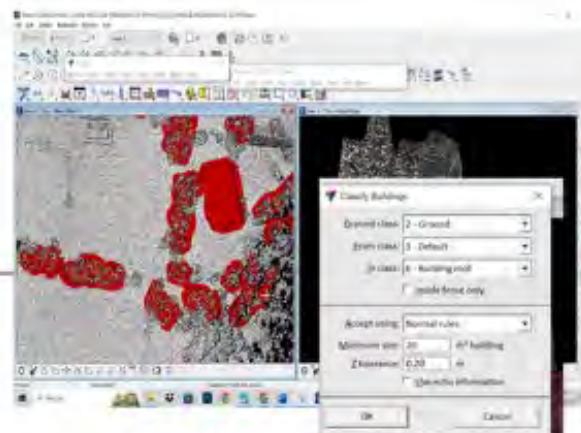
MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE TIPON TERRAZAS

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



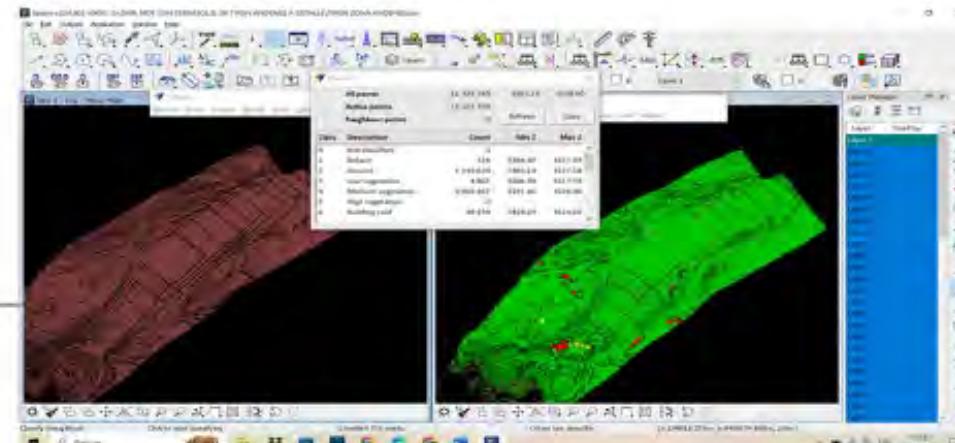
5

Realizamos la capa terreno o la clasificación de puntos del terreno. Teniendo en cuenta los angulos de terreno y el tamaño maximo de las construcciones



6

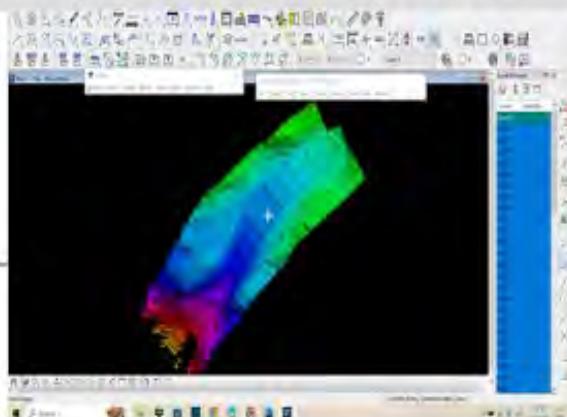
Realizamos la clasificación de los puntos pertenecientes a construcciones, se observa que considera construccion a algunos arboles.



7

Corregimos la clasificación con la herramienta Clasify Using Brush. No se clasificaron las personas porque el levantamiento se hizo en la madrugada y realizamos la clasificación de la vegetación con TerraScann. Y ya se tienen los puntos clasificados

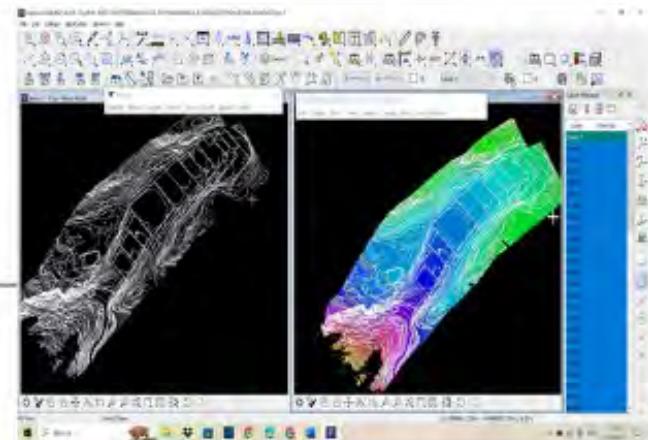
MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE TIPON TERRAZAS



8

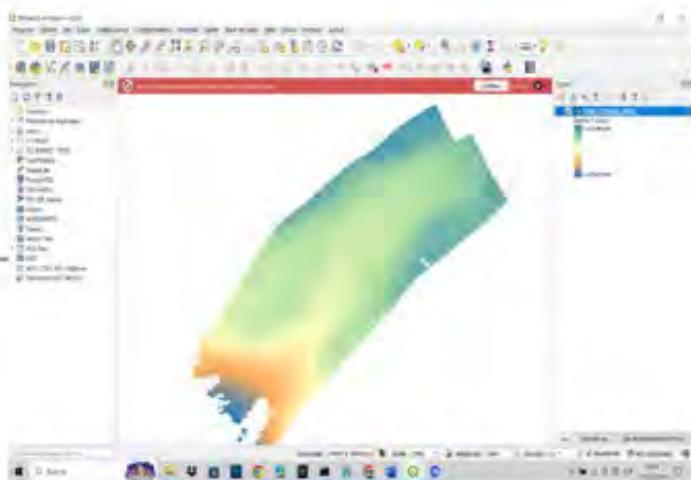
Con los puntos clasificados, hagarramos los puntos del terreno y realizamos el Modelo de Elevación Digital con la herramienta Display Mode

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



9

Con la misma herramienta realizamos las curvas de nivel a 1 metro



10

Exportamos el archivo en formato TIF, capa raster

ERNEST TESIS (D) > DEM, MDT CON TERRASO DE TIPO ANDENES A DETALLE		
	Nombre	Fecha de modificación
	trajectory	2/11/2024 16:51
	DEM_CURVAS_NIVEL.tifw	2/11/2024 17:17
	DEM_CURVAS_NIVEL	2/11/2024 17:17
	DEM_CURVAS_NIVEL.tif	11/12/2024 16:28
	model000	5/11/2024 21:18
	puntos_clasificados	2/11/2024 17:16
D	TIPON ZONA ANDENES.ptc	2/11/2024 17:18
	TIPON ZONA ANDENES	2/11/2024 17:18

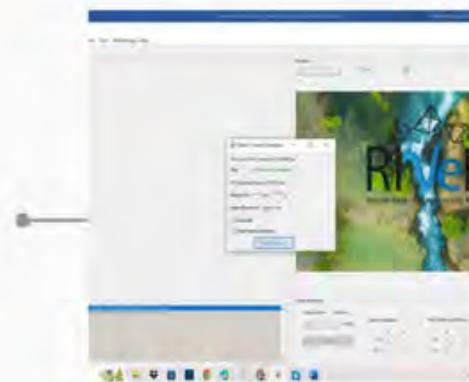
11

Se guarda los archivos en una carpeta para su posterior uso.

8.4. Proceso del cálculo de velocidades y caudales de los canales con la metodología LSPIV En RIVER-Matlab.

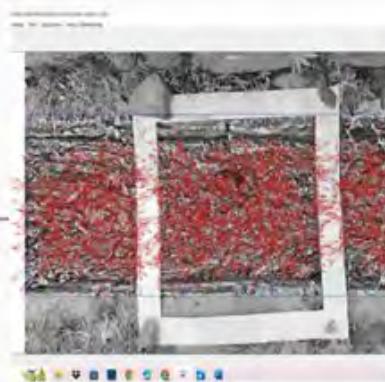
LSPIV CANAL C-L18

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L18 y Cargamos las imagenes al programa



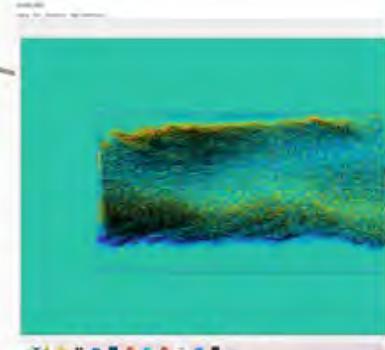
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



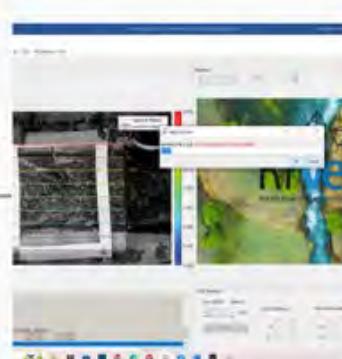
8

Cargamos la batimetria obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



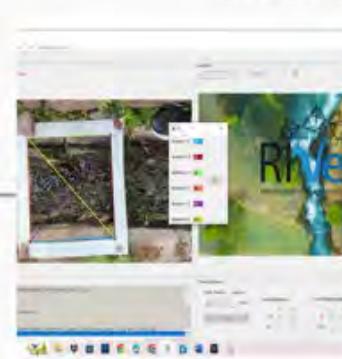
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



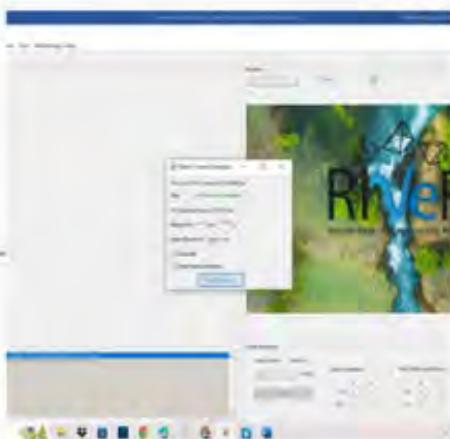
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



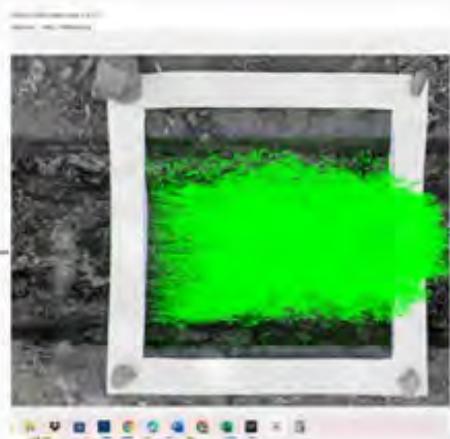
5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



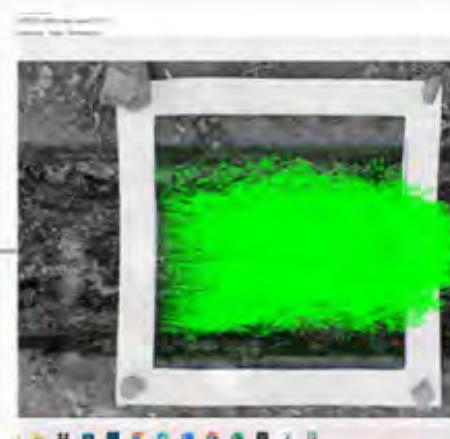
1

Extraccion de Imagenes del canal C-L17 y Cargamos las imágenes al programa



2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



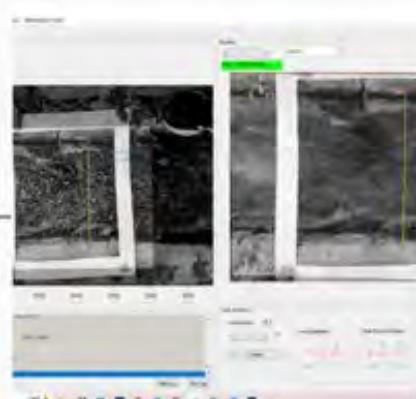
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



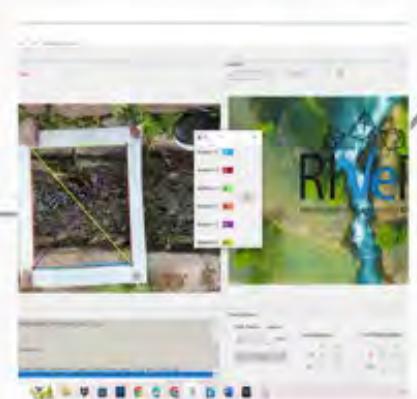
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



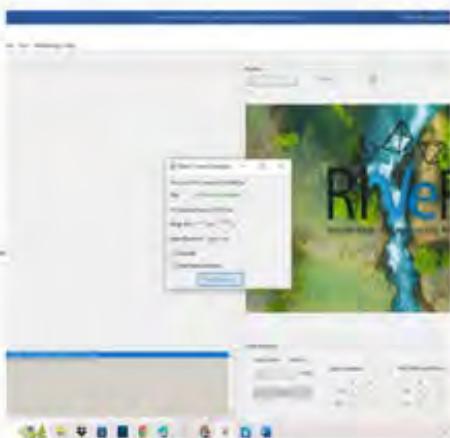
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



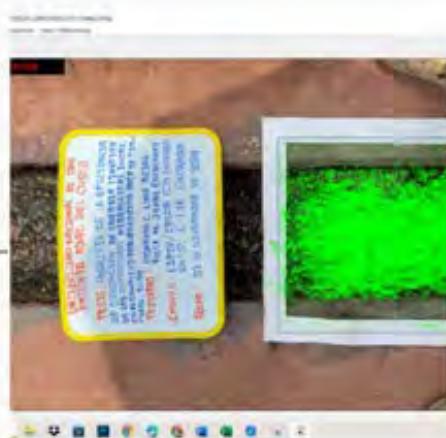
5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L16 y Cargamos las imágenes al programa



2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



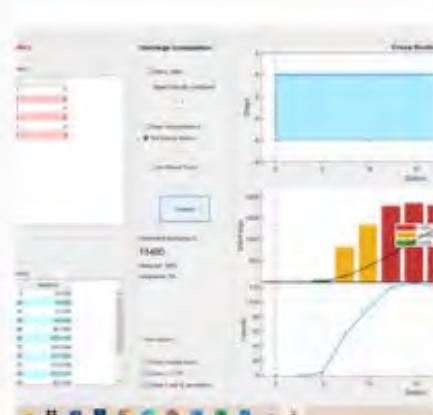
3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



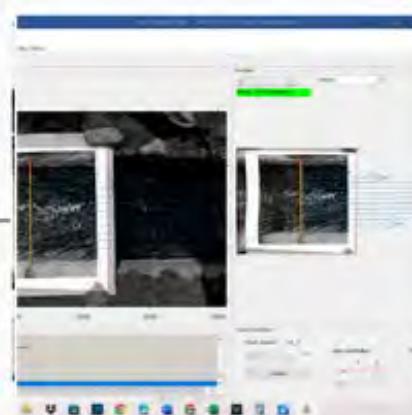
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



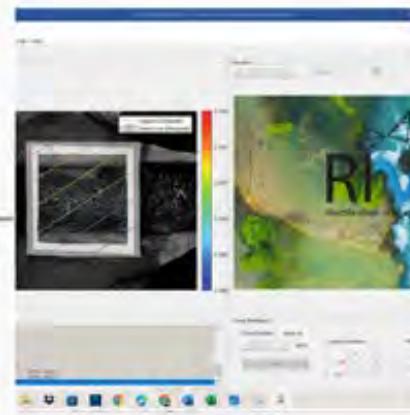
8

Cargamos la batimetria obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



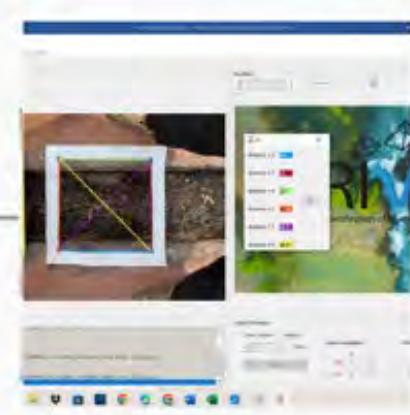
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



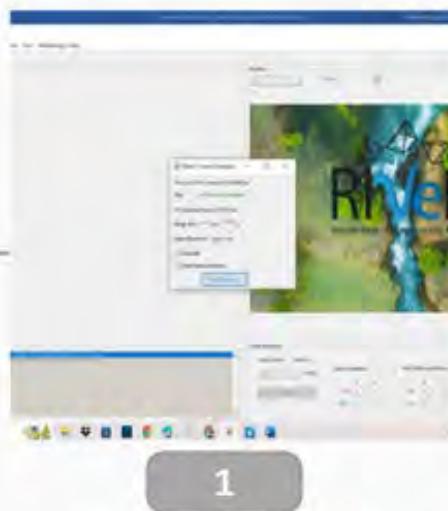
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



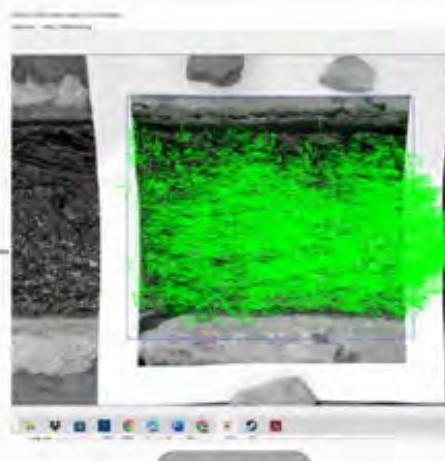
5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extracción de Imágenes del canal C-L14 y Cargamos las imágenes al programa



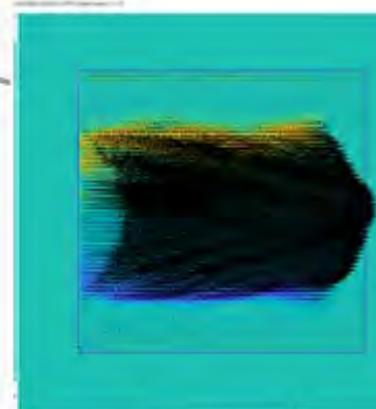
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el cálculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



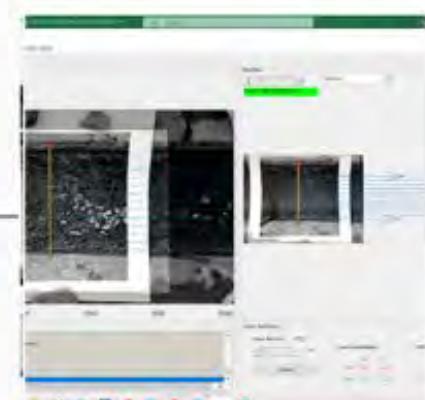
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



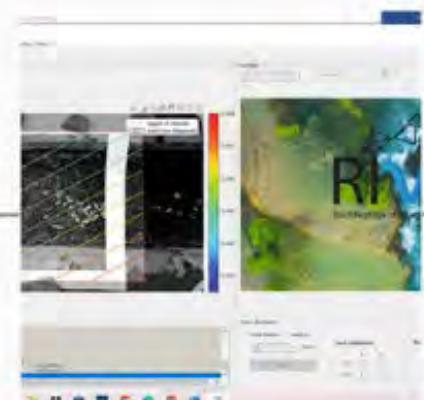
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivlabsession y la rectificación de la imagen



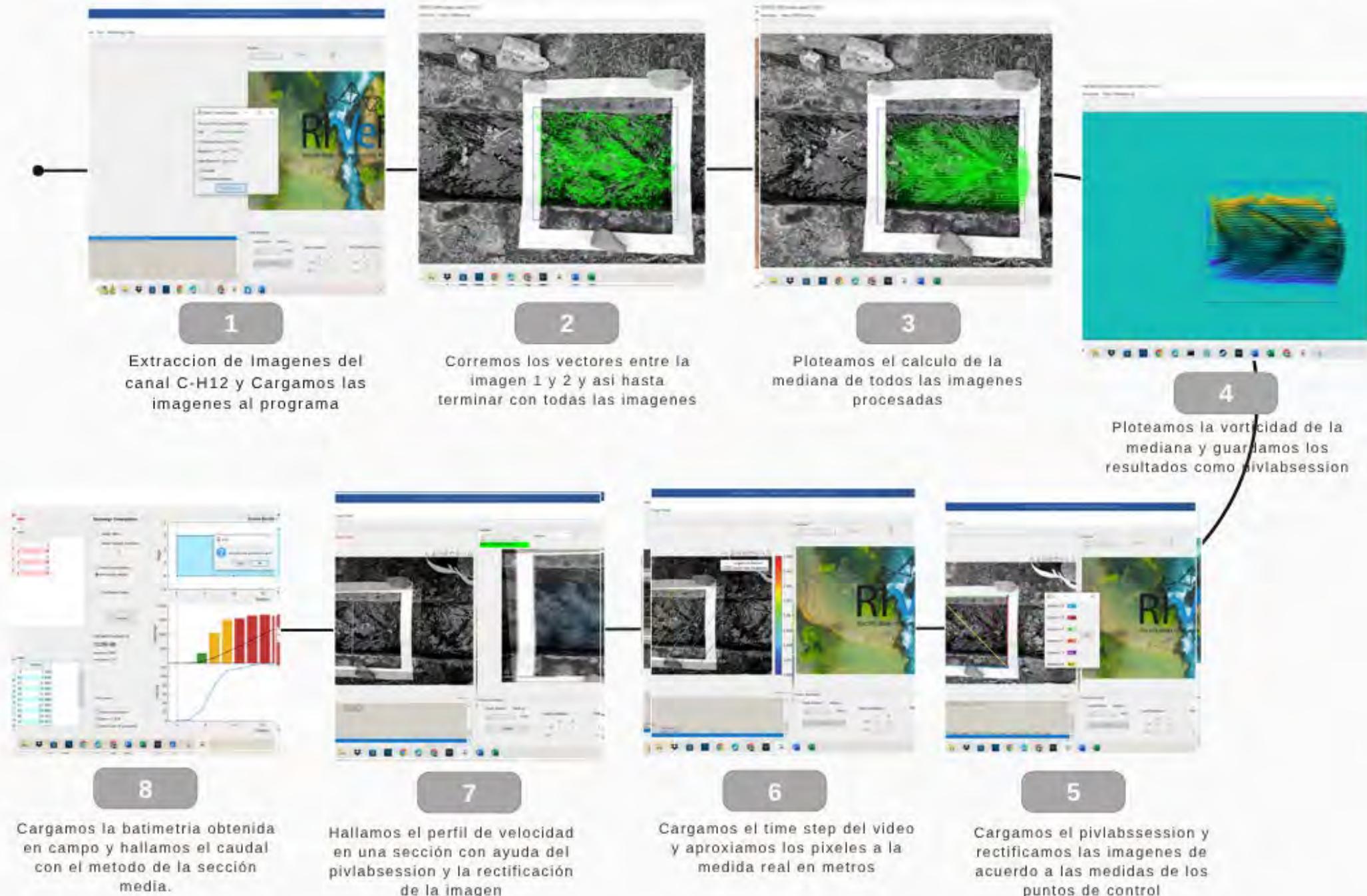
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



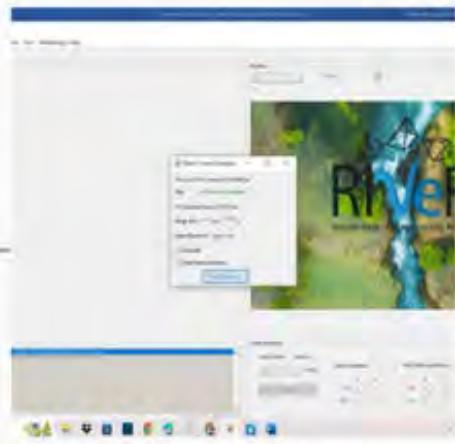
5

Cargamos el pivlabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



LSPIV CANAL C-H11

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extracción de Imágenes del canal C-H11 y Cargamos las imágenes al programa



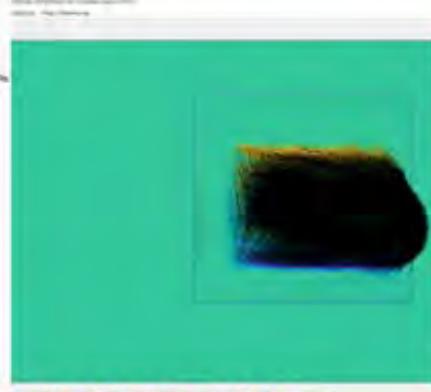
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el cálculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



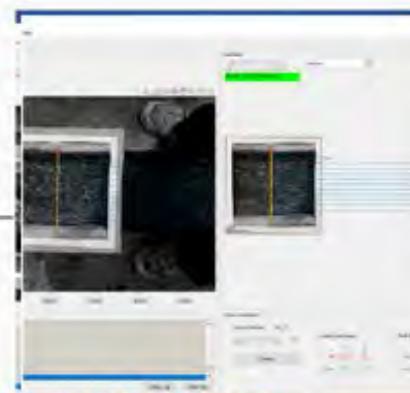
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



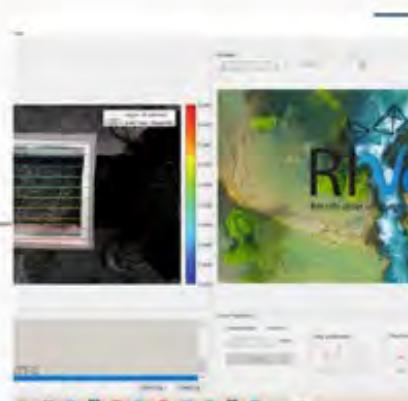
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el método de la sección media.



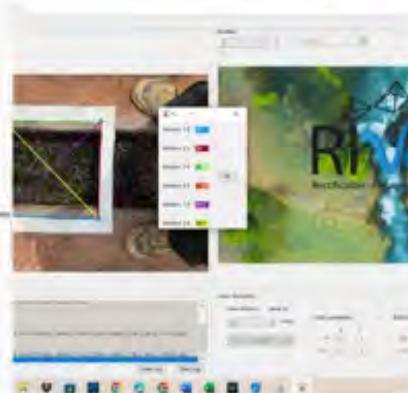
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



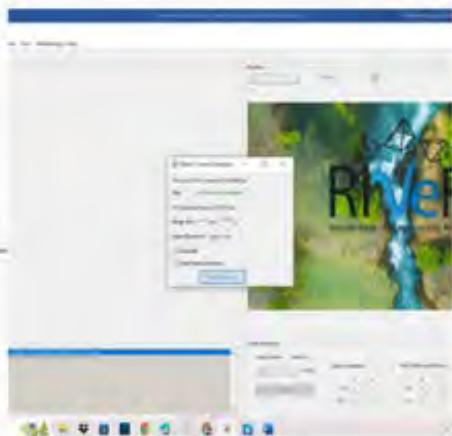
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L15 y Cargamos las imágenes al programa



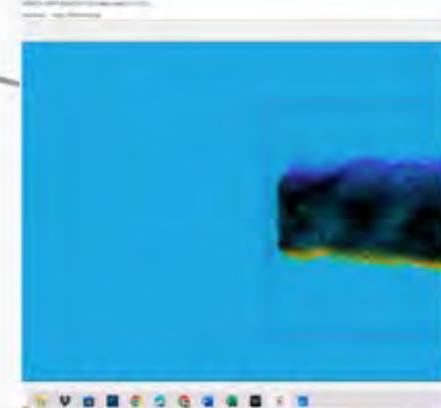
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



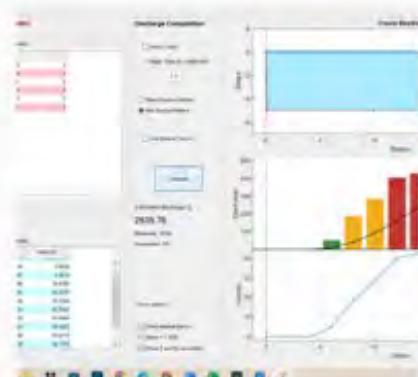
3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



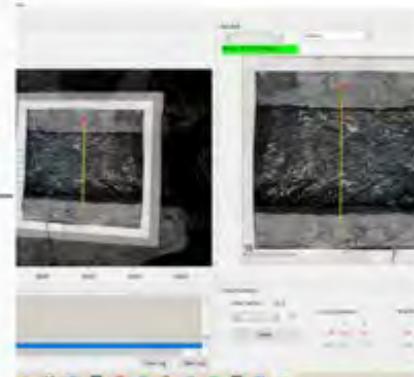
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



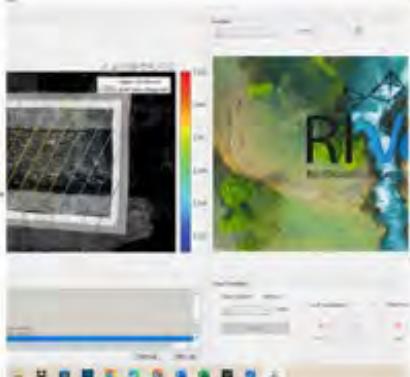
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media



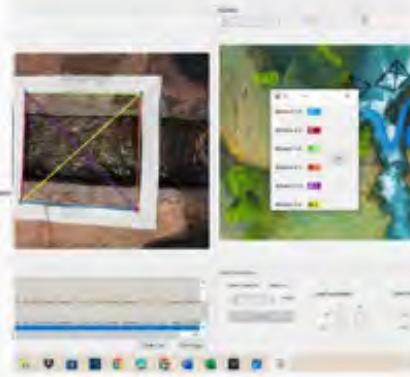
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

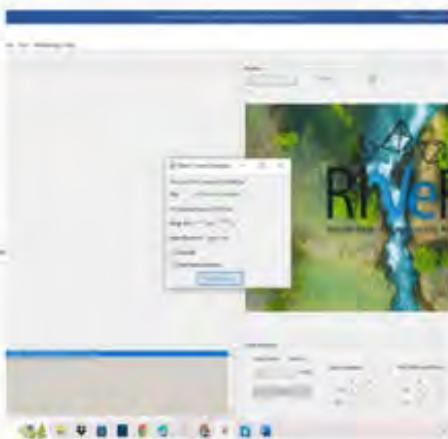


5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

LSPIV CANAL C-L13

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L13 y Cargamos las imágenes al programa



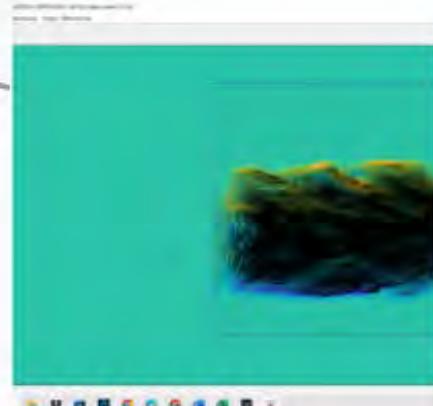
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



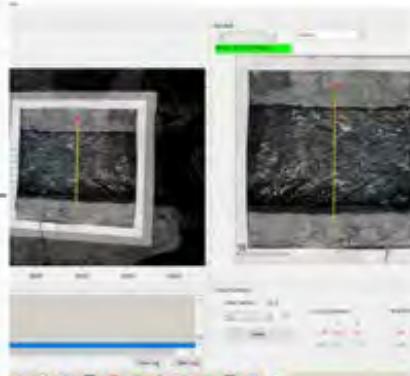
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



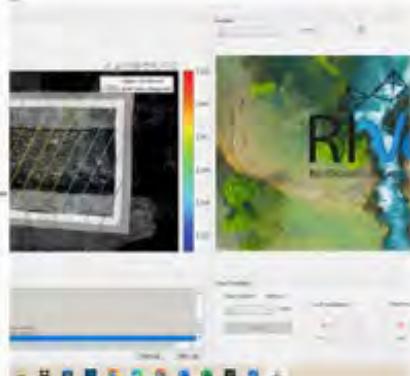
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



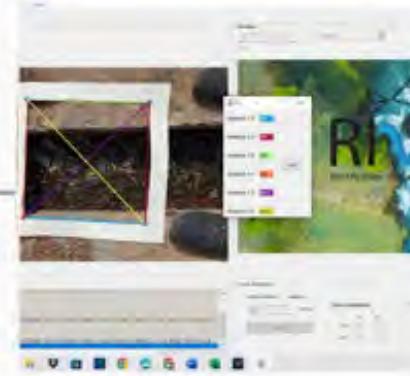
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

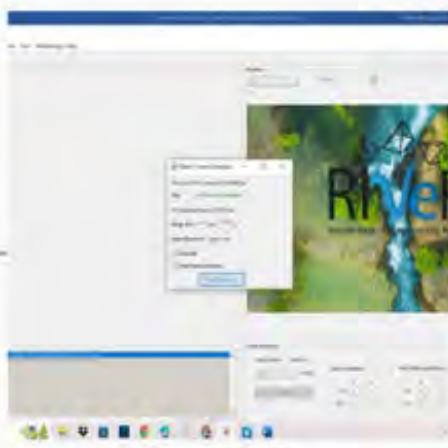
Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

LSPIV CANAL C-L12



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L12 y Cargamos las imagenes al programa



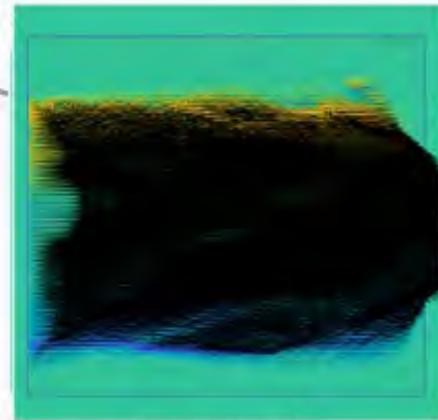
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imagenes procesadas



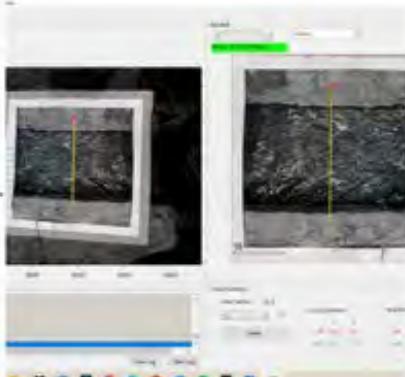
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como piv/absession



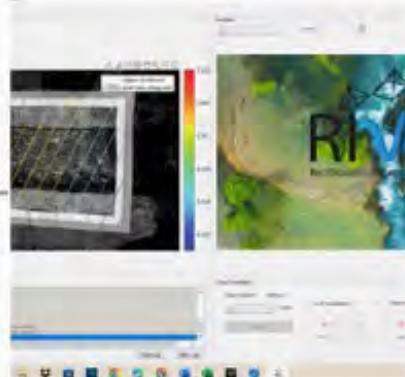
88

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el método de la sección media.



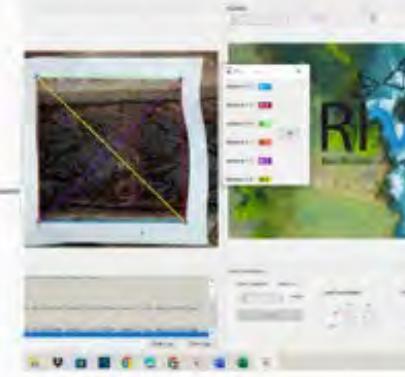
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivlabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video
y aproximamos los pixeles a la
medida real en metros



5

Cargamos el pivlabssession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

LSPIV CANAL C-L11

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L11 y Cargamos las imágenes al programa

2

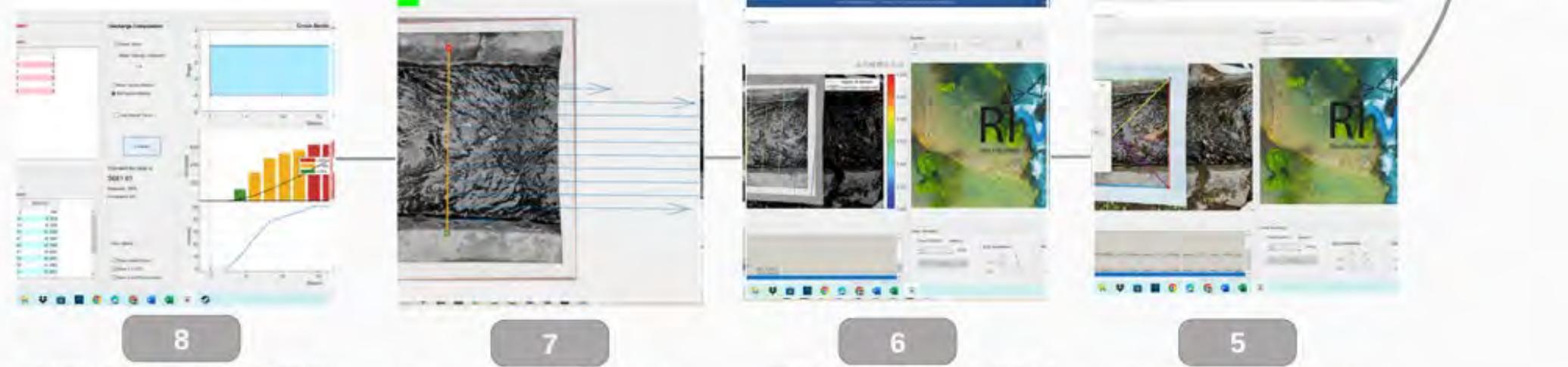
Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes

3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas

4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.

7

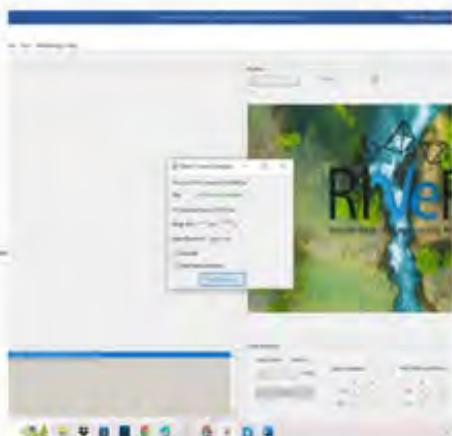
Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen

6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

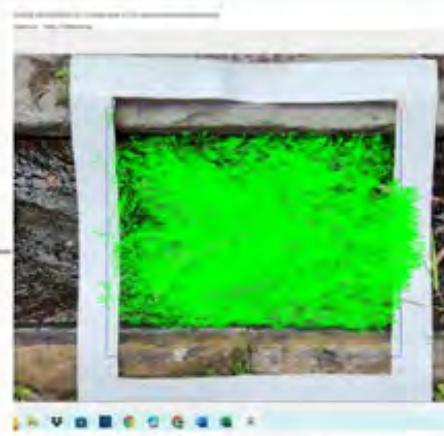
5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



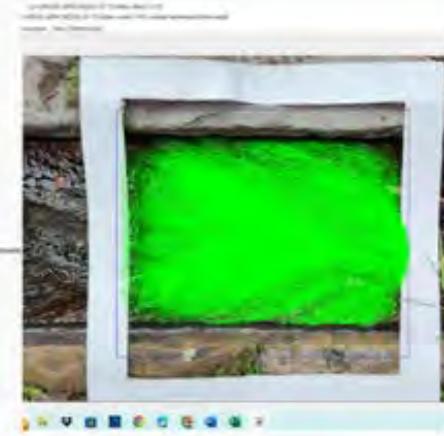
1

Extraccion de Imagenes del canal C-L10 y Cargamos las imágenes al programa



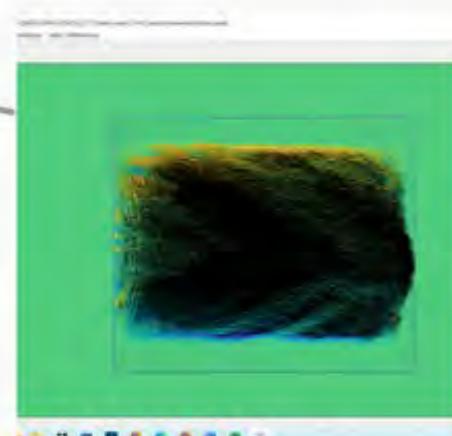
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



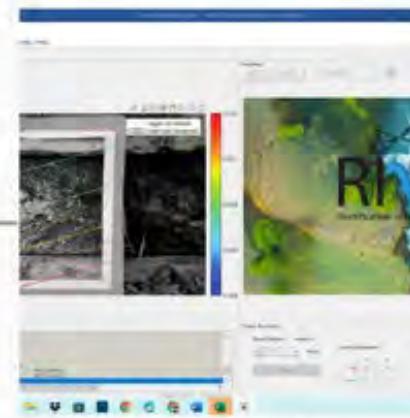
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



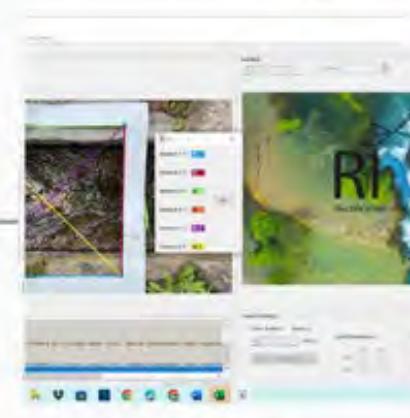
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

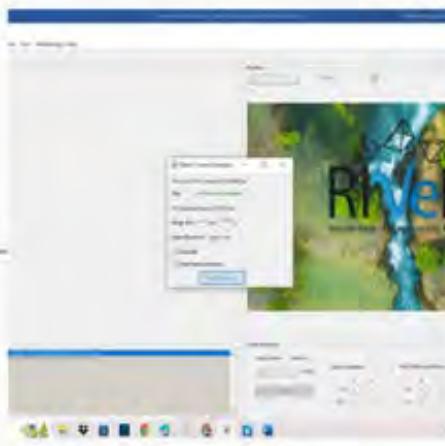


5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

LSPIV CANAL C-L10

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extracción de Imágenes del canal C-L10 y Cargamos las imágenes al programa



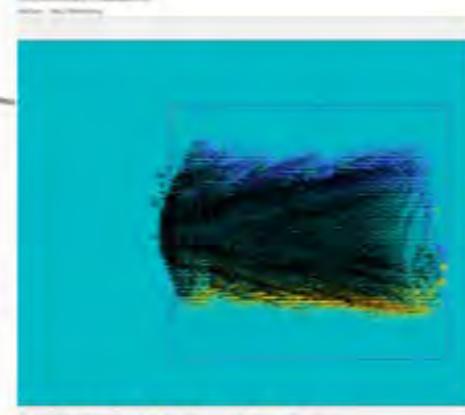
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el cálculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



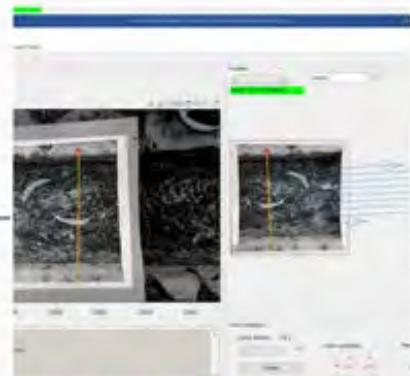
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



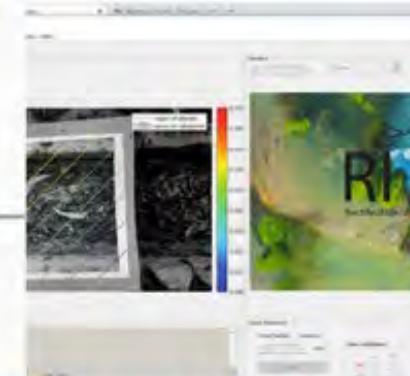
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el método de la sección media.



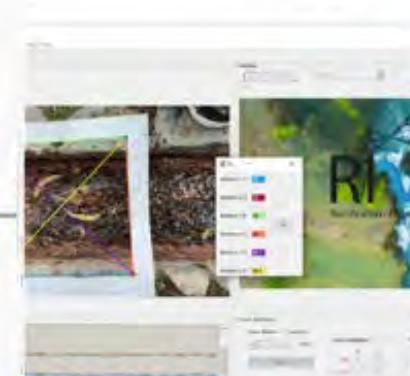
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



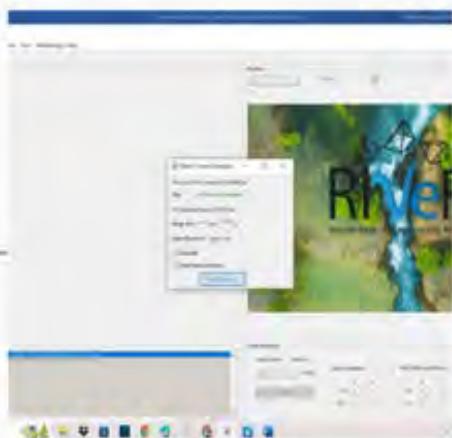
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los píxeles a la medida real en metros



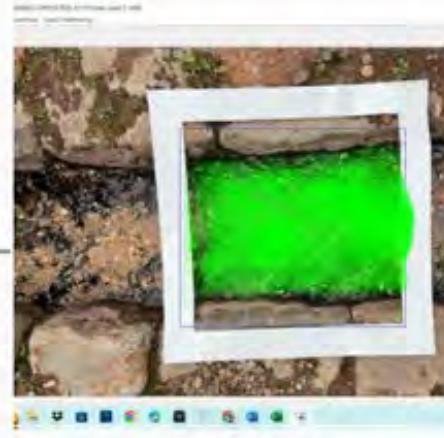
5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



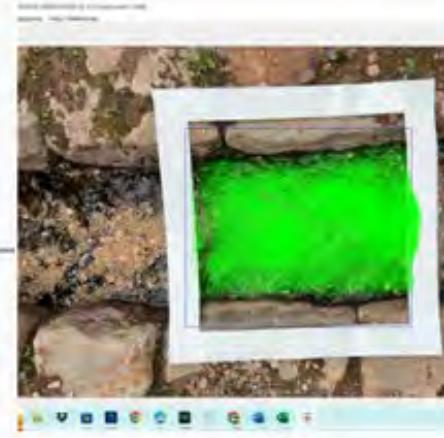
1

Extraccion de Imagenes del canal C-H09 y Cargamos las imágenes al programa



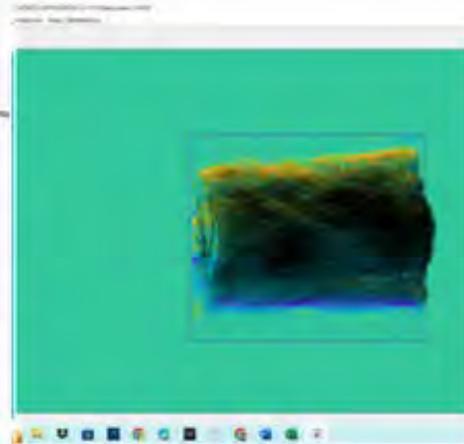
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



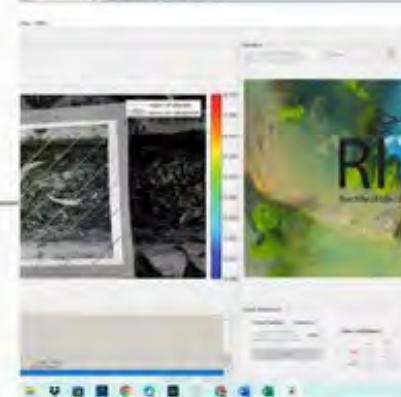
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



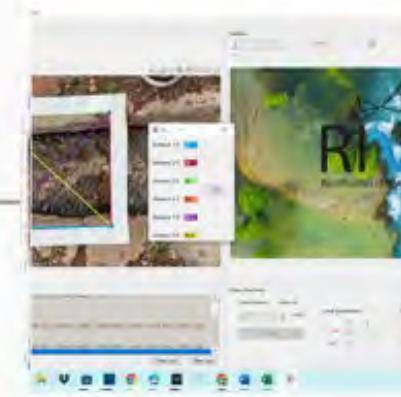
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



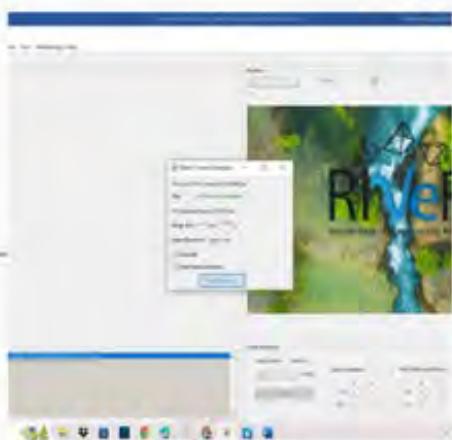
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



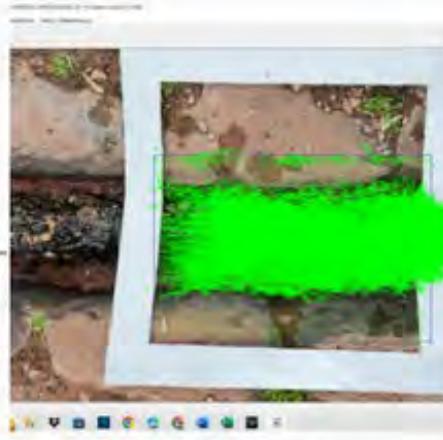
5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extraccion de Imagenes del canal C-H08 y Cargamos las imágenes al programa



2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



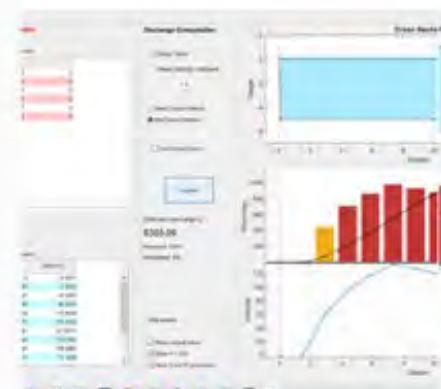
3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



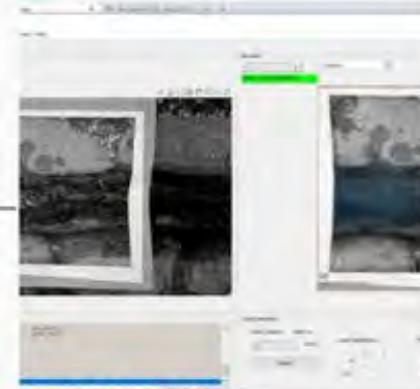
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



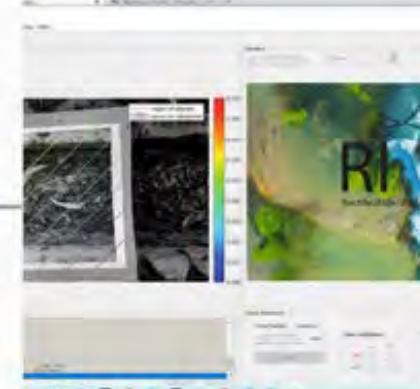
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media



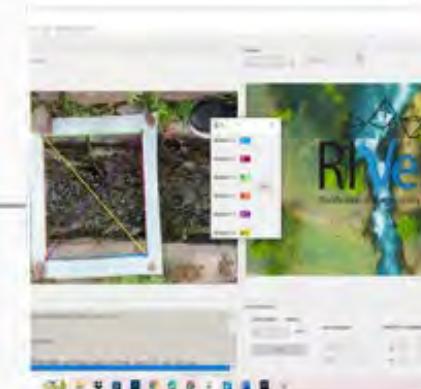
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

LSPIV CANAL C-H07

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extraccion de Imagenes del canal C-H07 y Cargamos las imágenes al programa

2

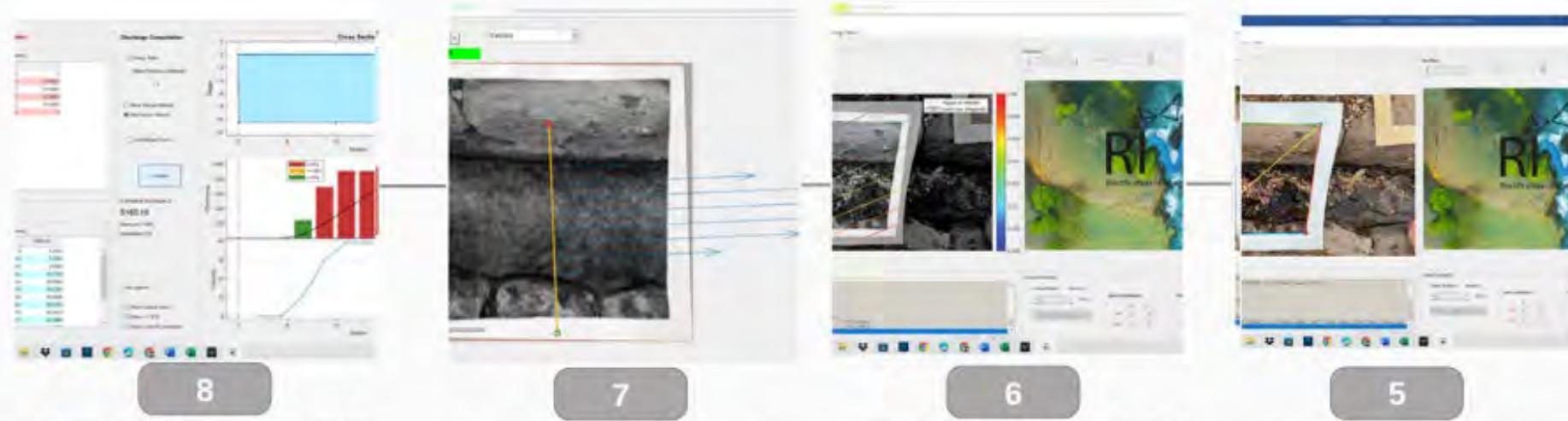
Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes

3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas

4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.

7

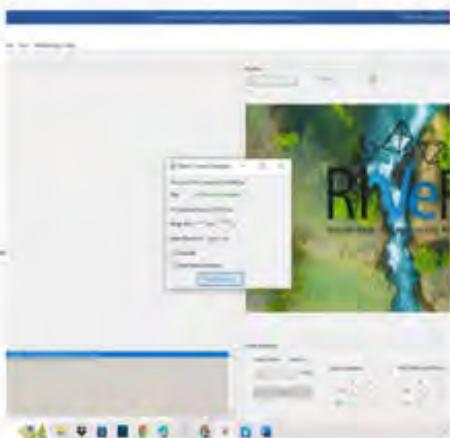
Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen

6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extraccion de Imagenes del canal C-H06 y Cargamos las imágenes al programa



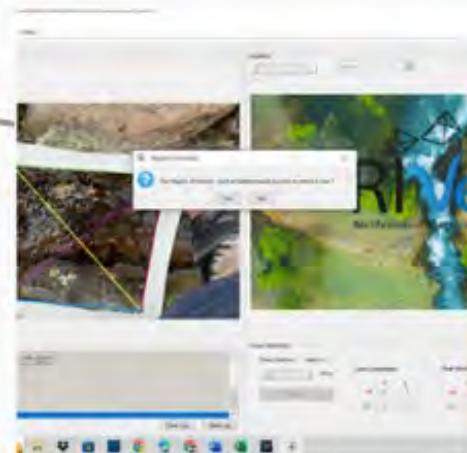
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



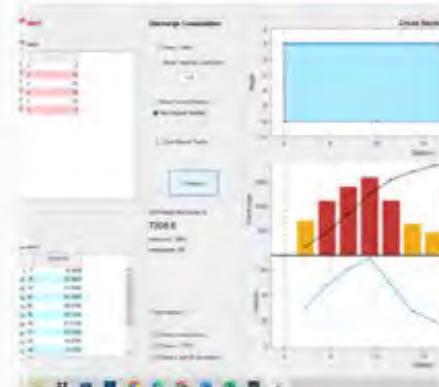
3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



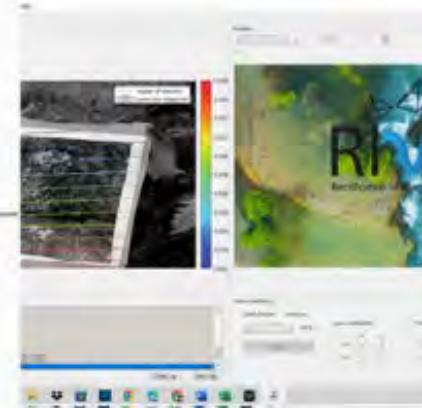
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media



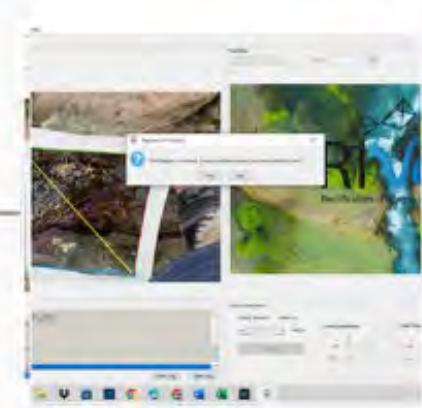
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

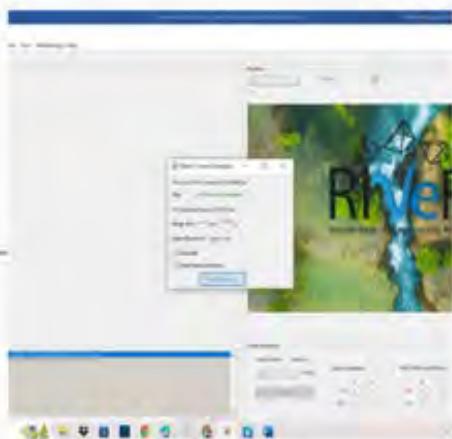


5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

LSPIV CANAL C-L08

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L08 y Cargamos las imágenes al programa



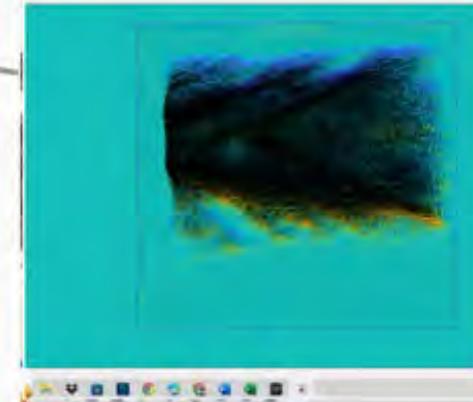
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



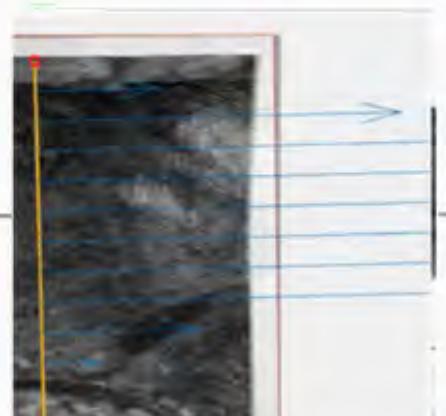
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivlabssession



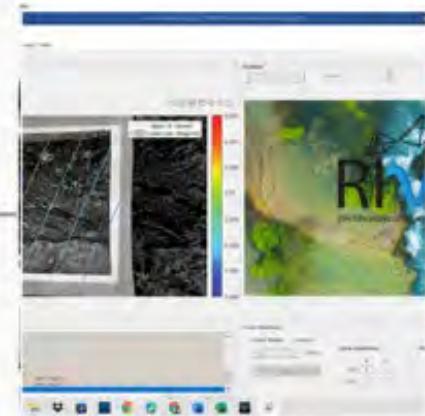
8

Cargamos la batimetria obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



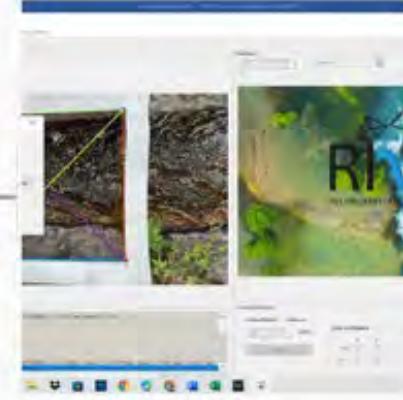
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivlabssession y la rectificación de la imagen



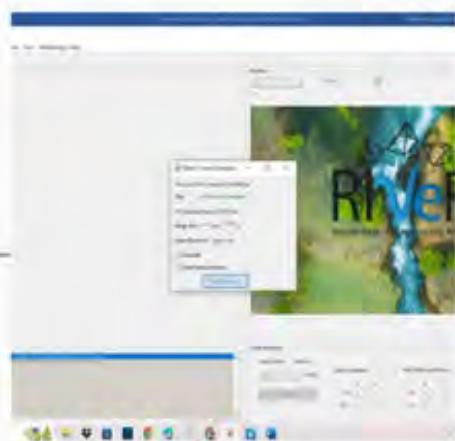
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



5

Cargamos el pivlabssession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extraccion de Imagenes del canal C-L07 y Cargamos las imágenes al programa



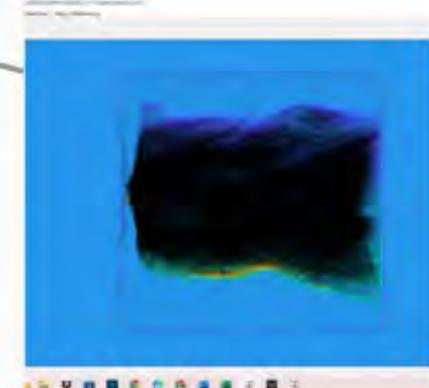
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



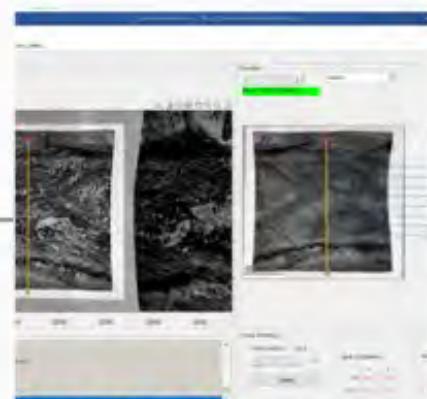
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivlabssession



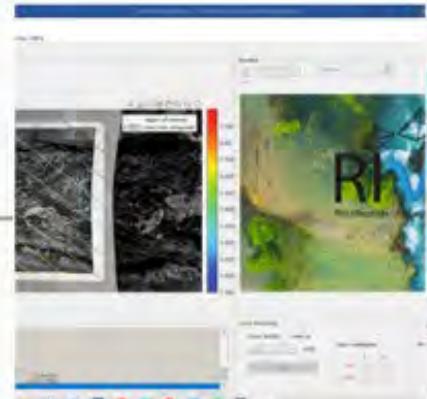
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



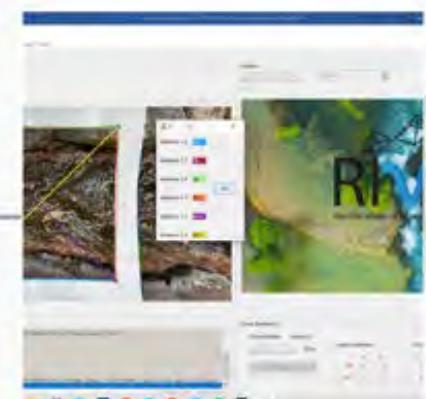
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivlabssession y la rectificación de la imagen



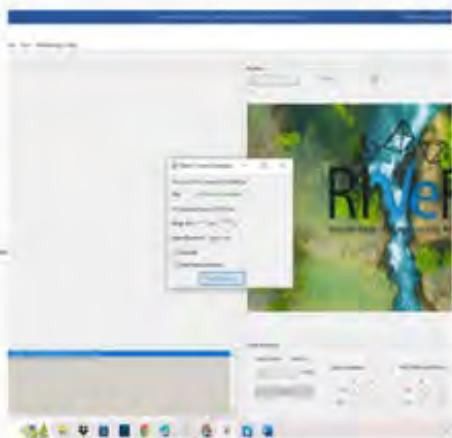
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



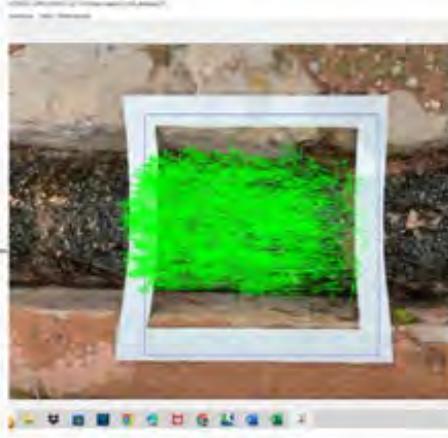
5

Cargamos el pivlabssession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



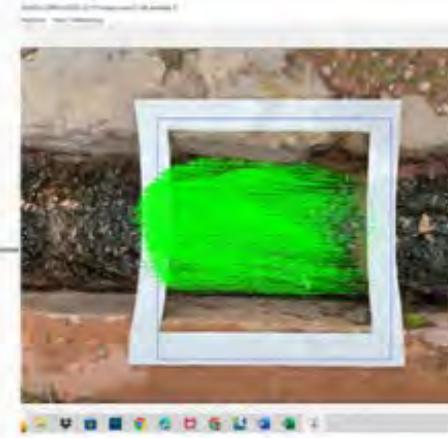
1

Extracción de Imágenes del canal C-L06 y Cargamos las imágenes al programa



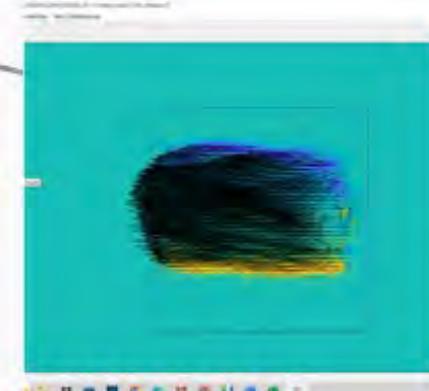
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el cálculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



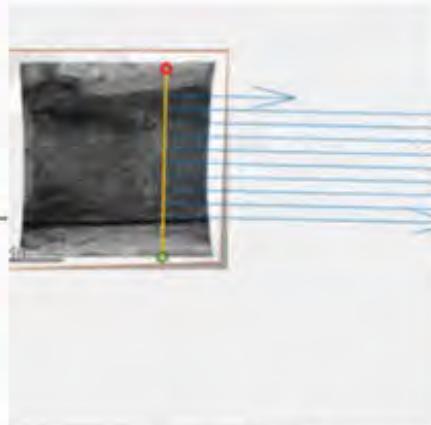
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



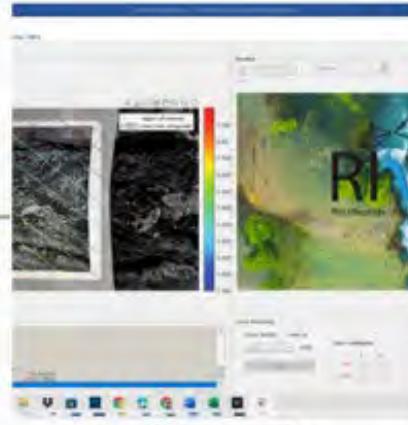
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



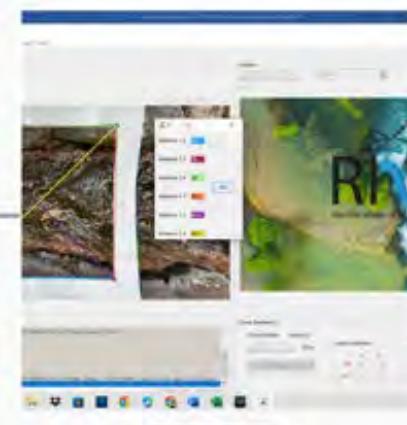
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

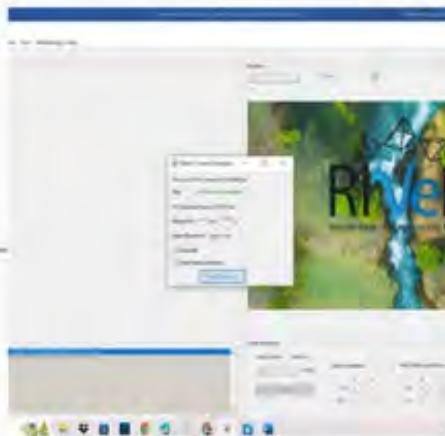


5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

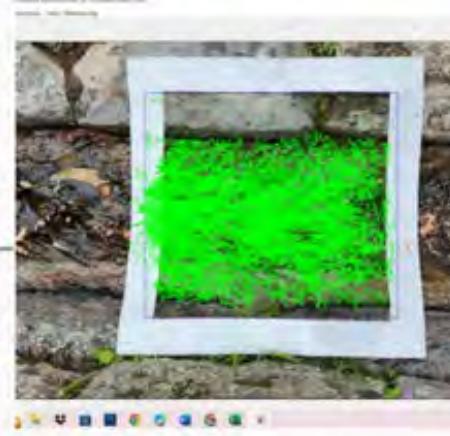
LSPIV CANAL C-L05

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



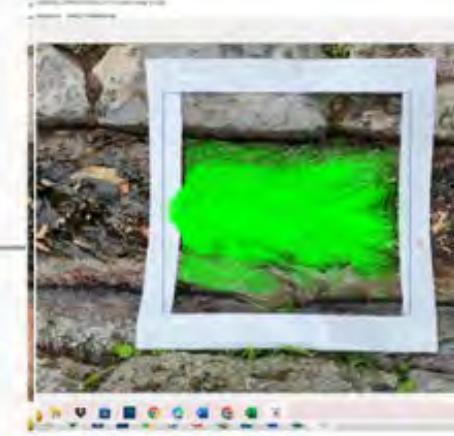
1

Extracción de Imágenes del canal C-L05 y Cargamos las imágenes al programa



2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el cálculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



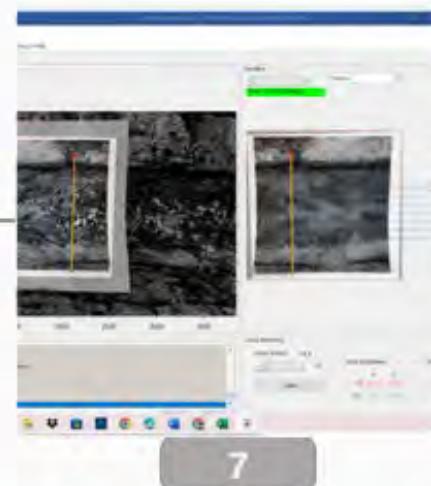
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



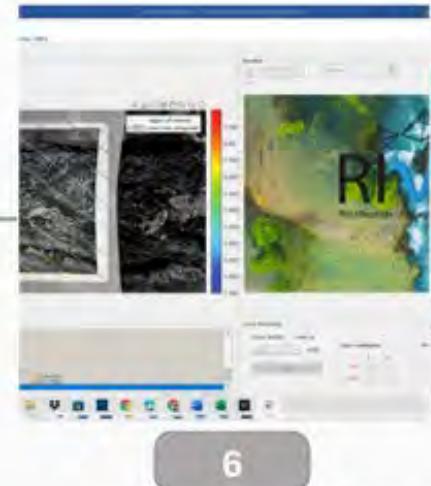
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



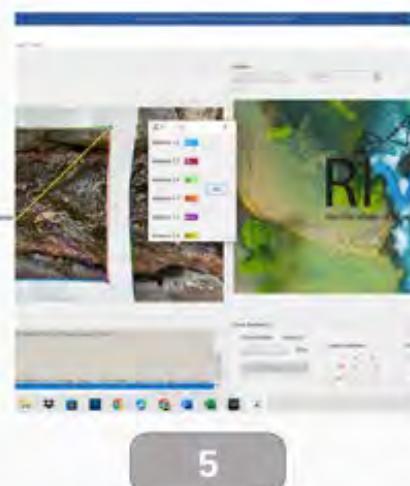
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



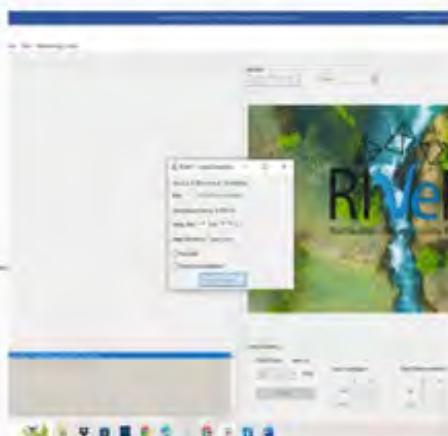
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extracción de Imágenes del canal C-L04 y Cargamos las imágenes al programa



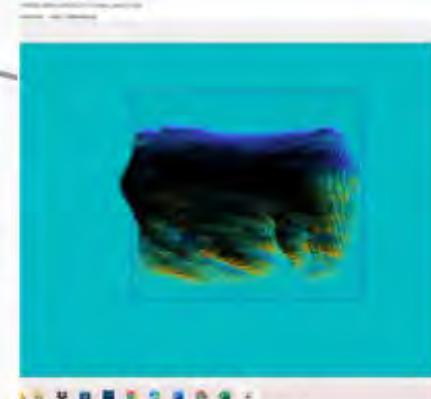
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



3

Ploteamos el cálculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



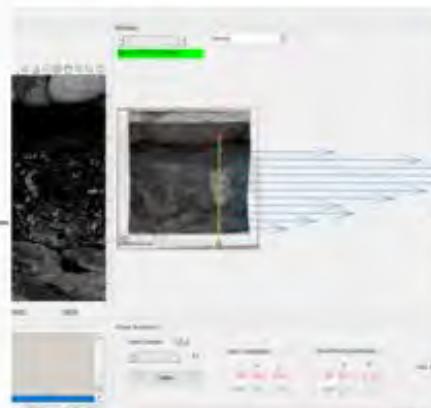
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



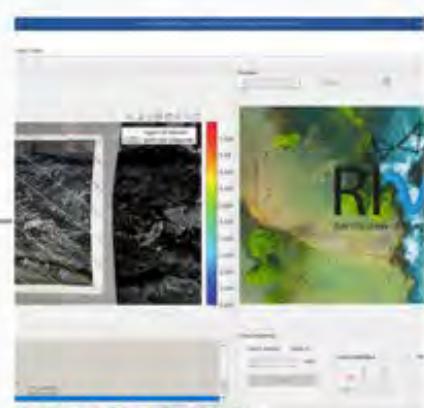
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el método de la sección media.



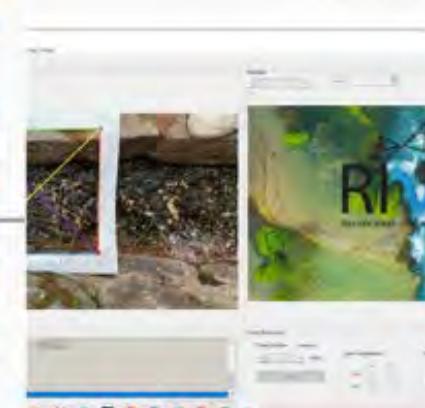
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

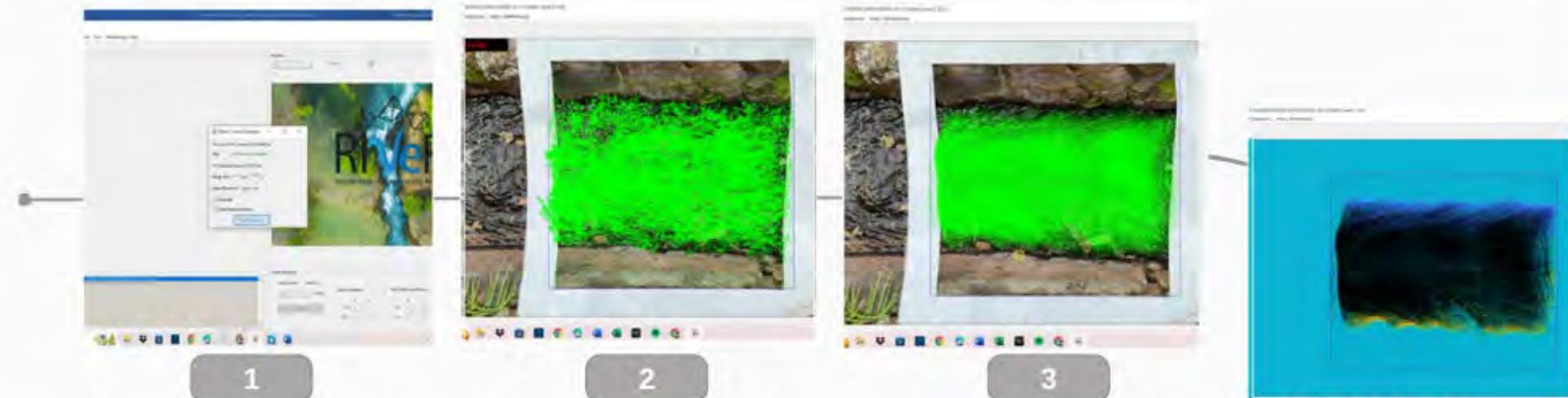


5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

LSPIV CANAL C-L03

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



Extraccion de Imagenes del canal C-L03 y Cargamos las imágenes al programa

1

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes

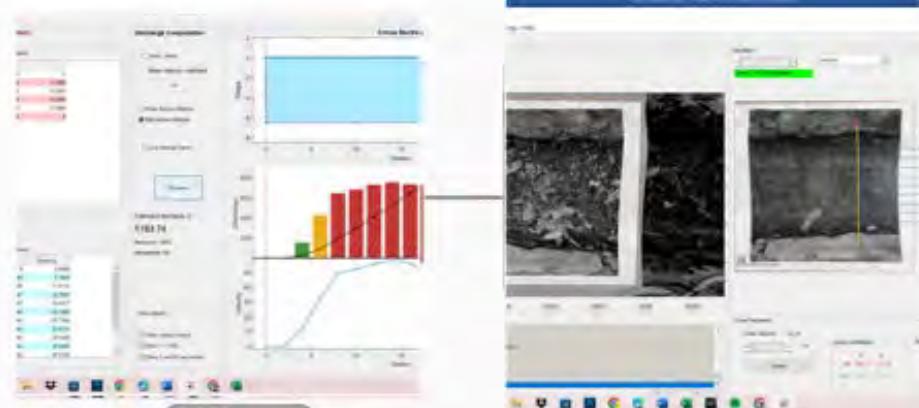
2

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas

3

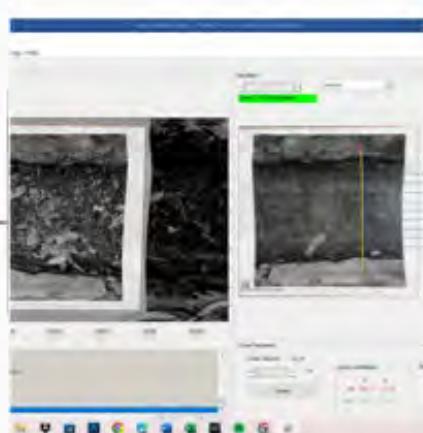
Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession

4



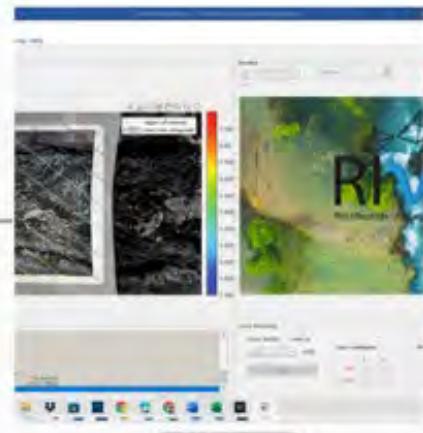
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



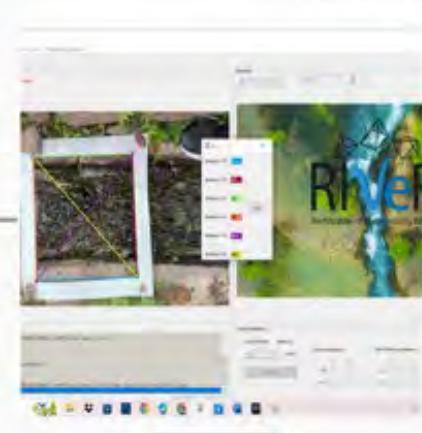
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



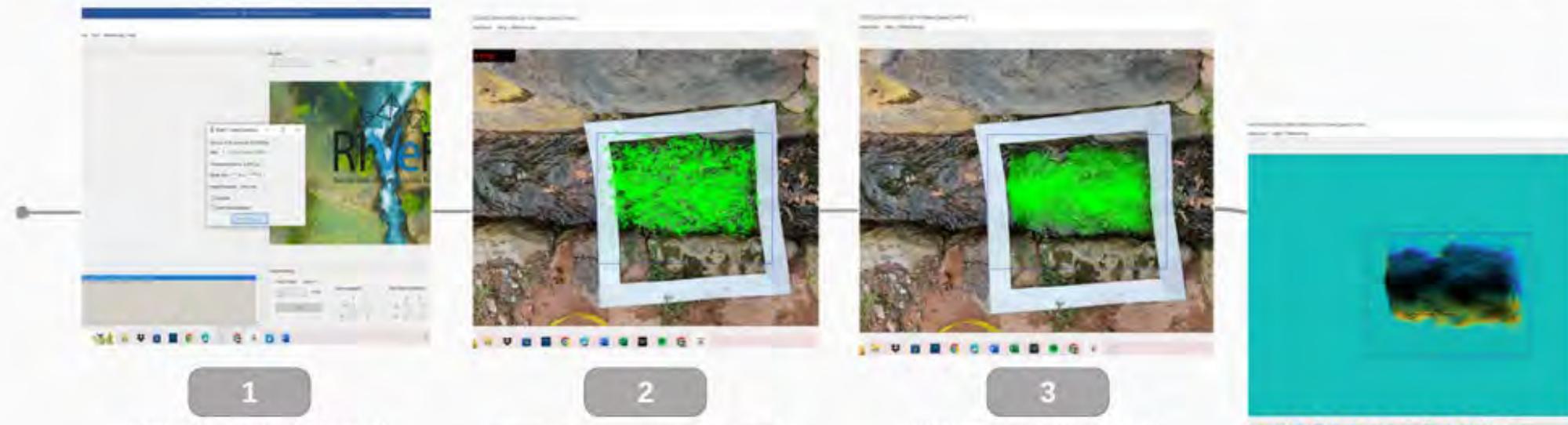
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extraccion de Imagenes del canal C-H04 y Cargamos las imágenes al programa

2

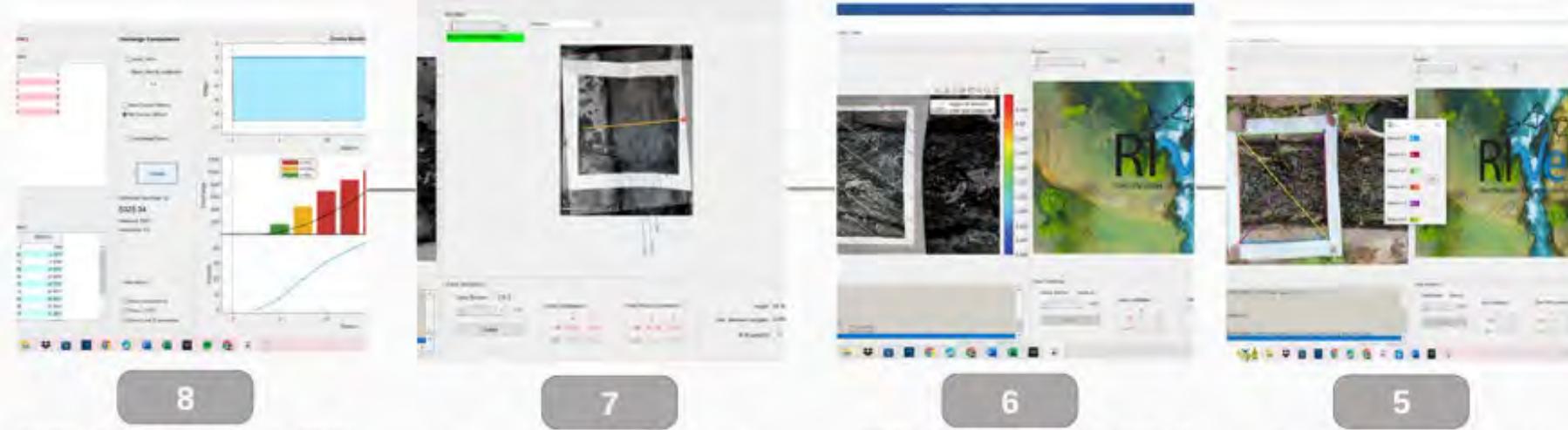
Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes

3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas

4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivlabssession



8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.

7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivlabssession y la rectificación de la imagen

6

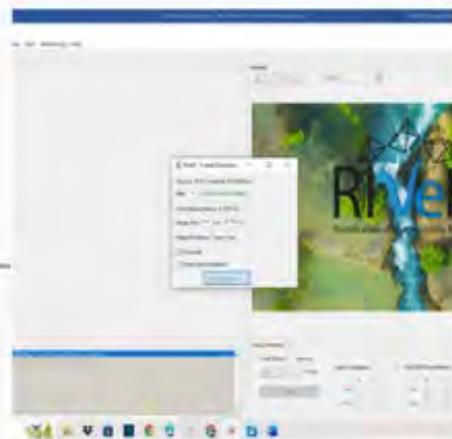
Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

5

Cargamos el pivlabssession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

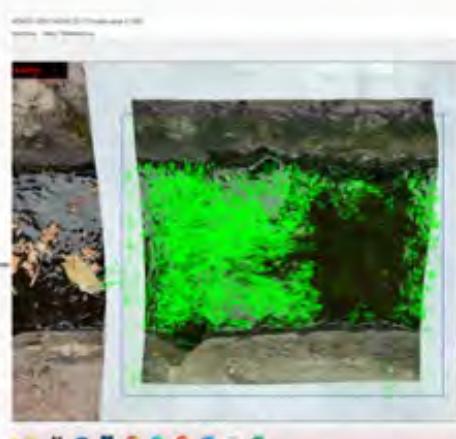
LSPIV CANAL C-D02

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



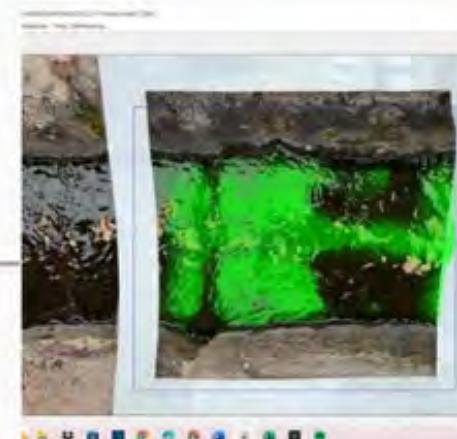
1

Extraccion de Imagenes del canal C-D02 y Cargamos las imágenes al programa



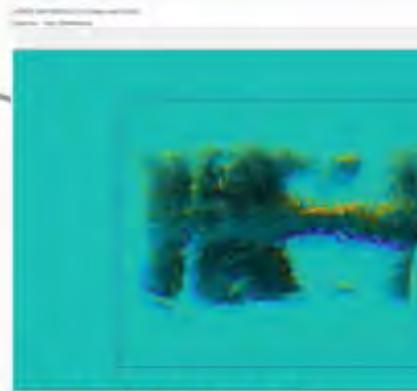
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



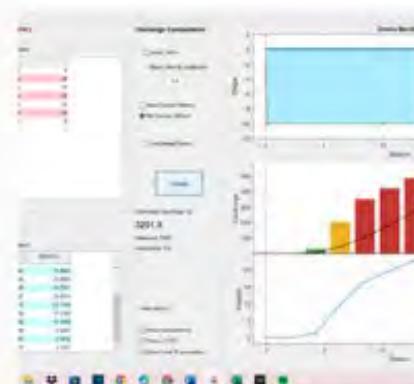
3

Plotteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



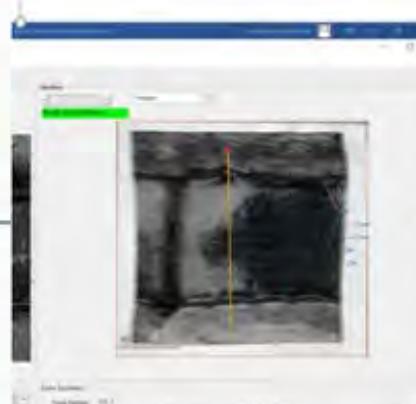
4

Plotteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



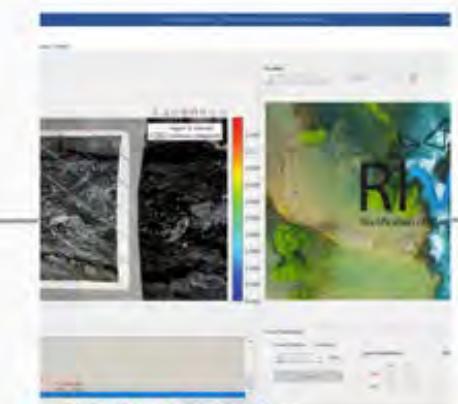
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



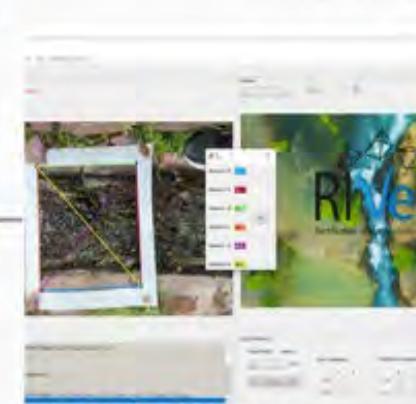
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivlabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros

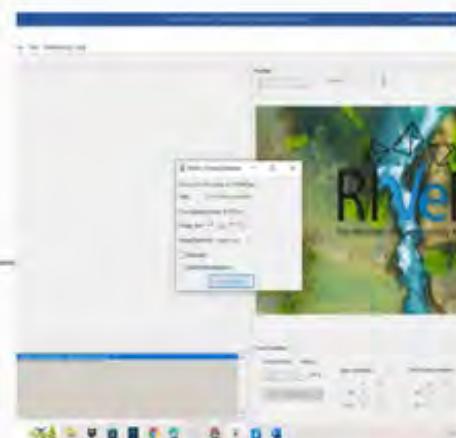


5

Cargamos el pivlabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

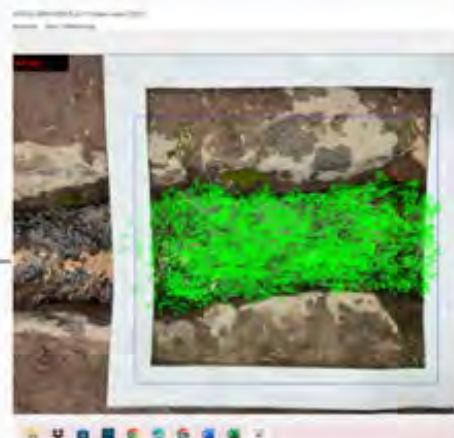
LSPIV CANAL C-D01

Proceso Del Cálculo De Velocidades Y Caudales De Los Canales De Tipón Con La Metodología LSPIV En RIVER-Matlab



1

Extraccion de Imagenes del canal C-D01 y Cargamos las imágenes al programa



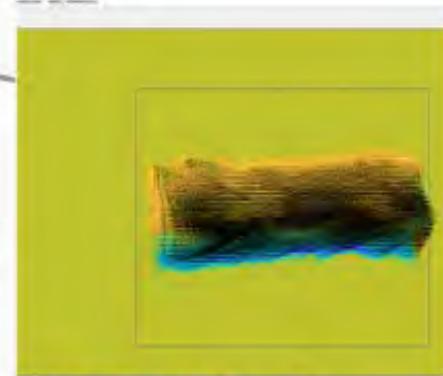
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



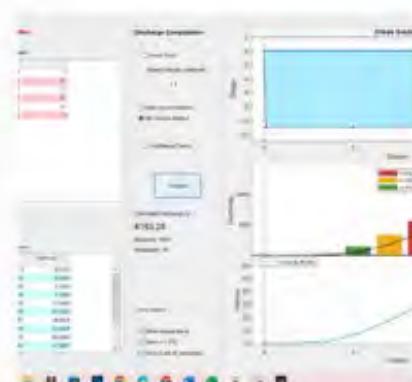
3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



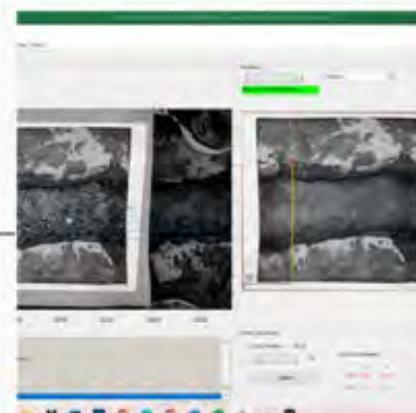
4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



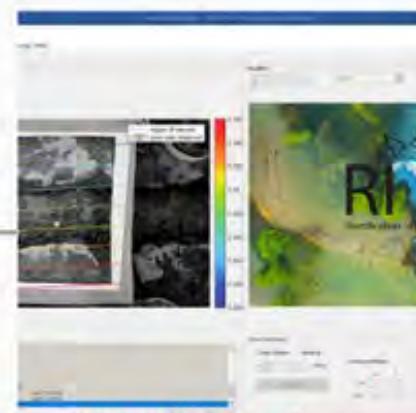
8

Cargamos la batimetria obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



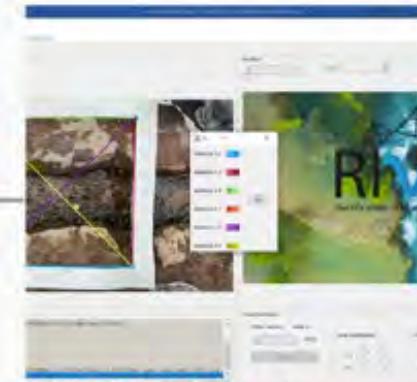
7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



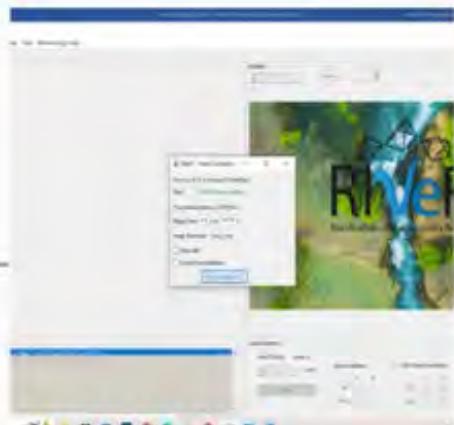
6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control



1

Extraccion de Imagenes del canal C-H03 y Cargamos las imágenes al programa



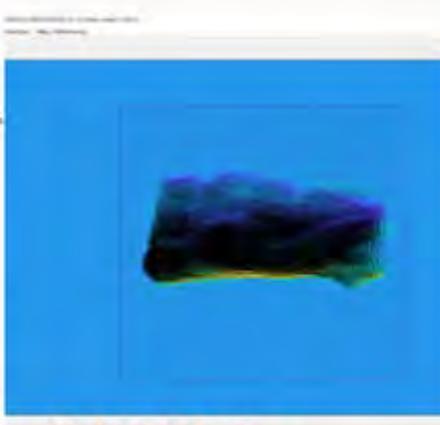
2

Corremos los vectores entre la imagen 1 y 2 y así hasta terminar con todas las imágenes



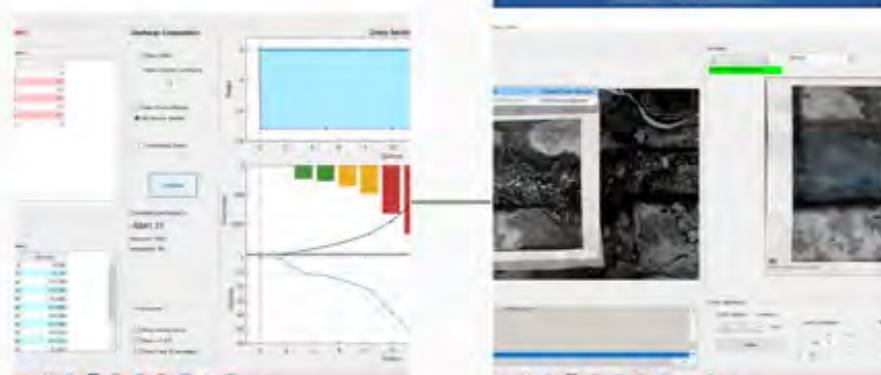
3

Ploteamos el calculo de la mediana de todos las imágenes procesadas



4

Ploteamos la vorticidad de la mediana y guardamos los resultados como pivabsession



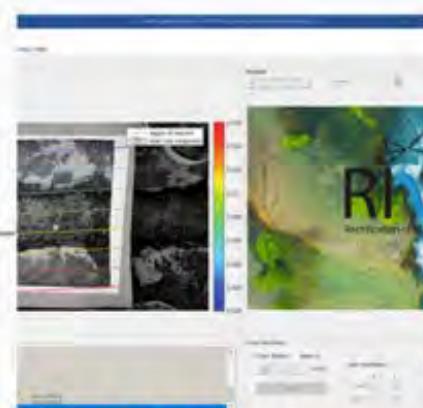
8

Cargamos la batimetría obtenida en campo y hallamos el caudal con el metodo de la sección media.



7

Hallamos el perfil de velocidad en una sección con ayuda del pivabsession y la rectificación de la imagen



6

Cargamos el time step del video y aproximamos los pixeles a la medida real en metros



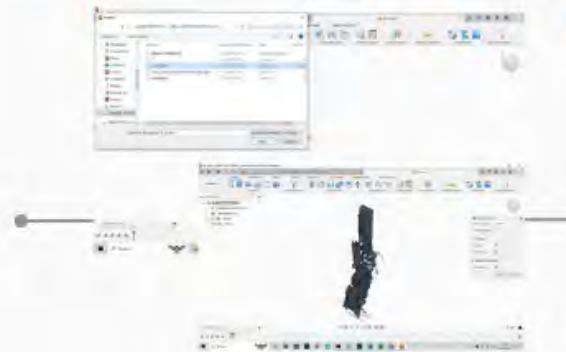
5

Cargamos el pivabsession y rectificamos las imágenes de acuerdo a las medidas de los puntos de control

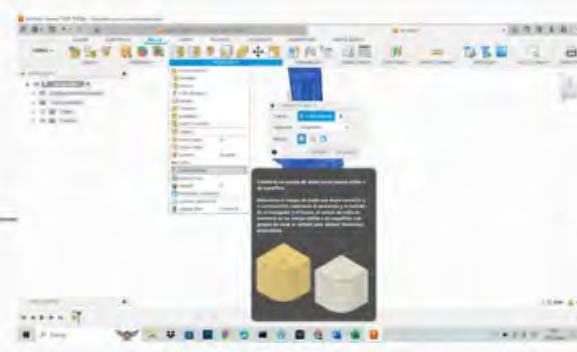
8.5. Proceso de creación de malla de sólido en formato STL con el programa Fusión 360 De Autodesk.

CREACION DE MALLA

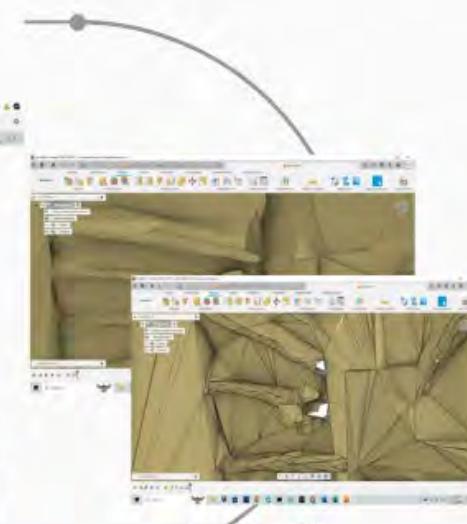
1.1. Proceso De Creación De Malla De Sólido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



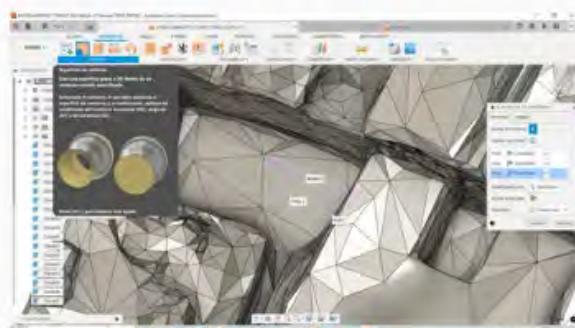
Insertamos la malla escaneada y darle una dirección y sentido a la figura



Convertir la malla en una superficie para poder editar y trabajar en este.



Existen algunas partes que no se escanearon en su totalidad y están cerradas por lo que debemos borrar elementos que impiden el flujo del agua.



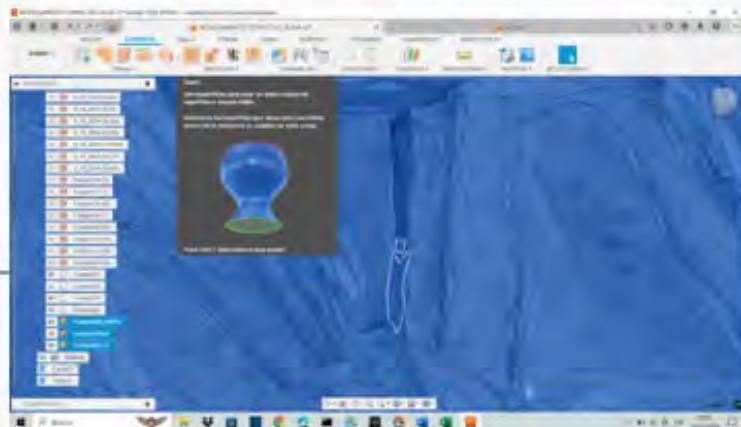
Realizado la solevación en todo los lugares donde haya ese problema, se empieza a parchar algunas partes con hueco con la herramienta "contorno"



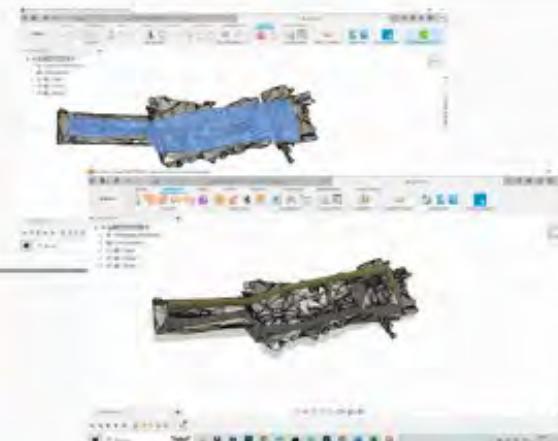
Con la herramienta de solevación realizamos la reconexión de la parte vacía y de la otra parte escaneada para que el haga fluja con normalidad

CREACION DE MALLA

1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



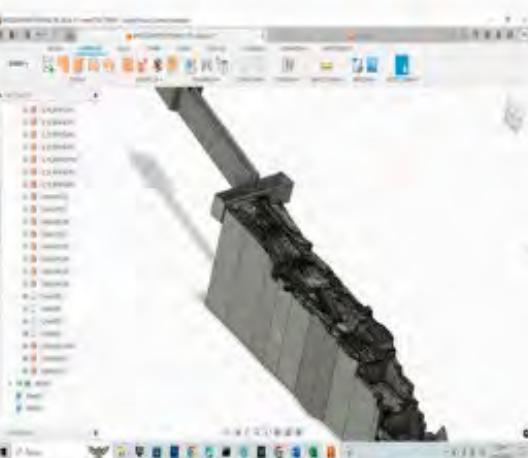
6
Arreglamos todas las partes mal escaneadas con ambas herramientas soleación y contorno y con la herramienta coser unimos todos los cuerpos.



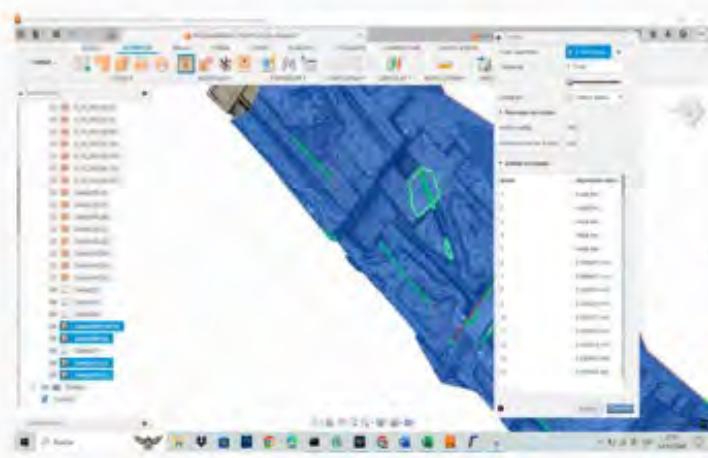
7
Creamos una base con la herramienta boceto a nuestra superficie y lo extruimos.



8
Recortamos las partes sobresalientes de ambos cuerpos con la herramienta recortar.



9
Con la herramienta de bocetos armamos el cuerpo que no se pudo escanear bien y lo conectamos al cuerpo total del templo del agua



10
Con la herramienta coser, unimos todos lo cuerpos para que se conviertan de superficie a sólido.

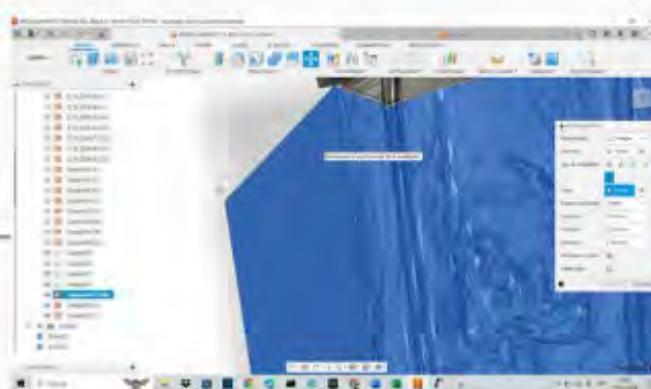
CREACION DE MALLA

1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



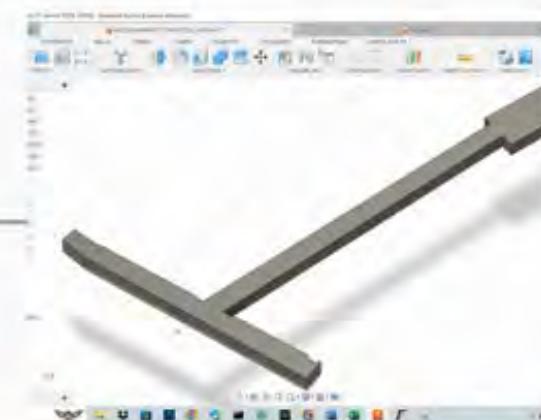
11

Realizamos las conexiones que falta con ayuda de la herramienta solevación.



12

Con la herramienta mover, movemos el cuerpo a una posición conocida en coordenadas x,y,z para poder hacer la simulación de manera mas facil.



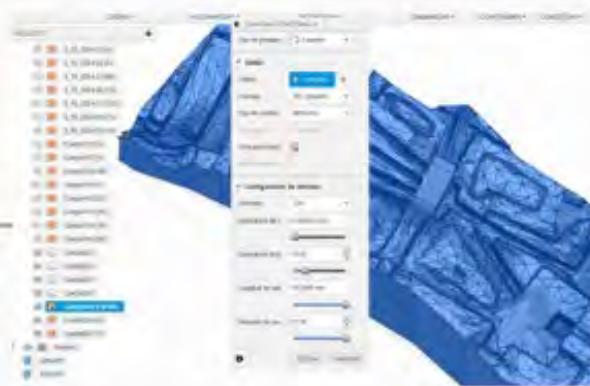
13

Creamo tambien un sólido que sera la condición inicial de agua con la herramienta boceto y extruir.



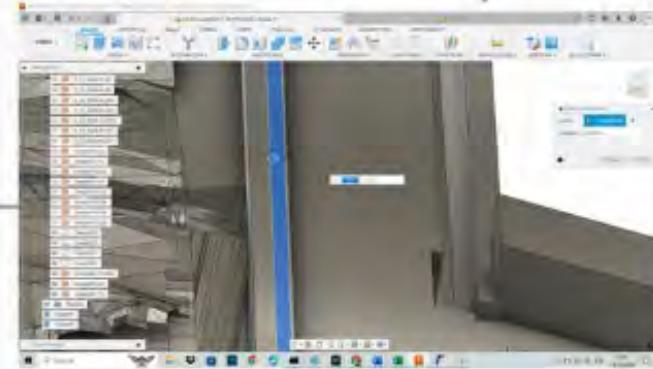
14

Con la herramienta pulsar, rellenamos los huecos que aun quedaron.



15

Finalmente exportamos el cuerpo en formato STL y con un refinado alto, para no tener problemas con la simulación

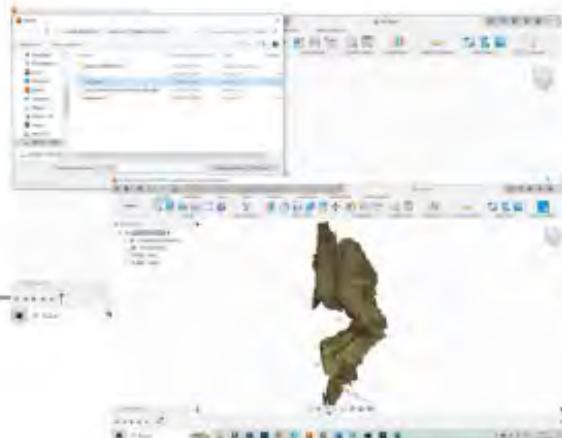


14

Con la herramienta pulsar, rellenamos los huecos que aun quedaron.

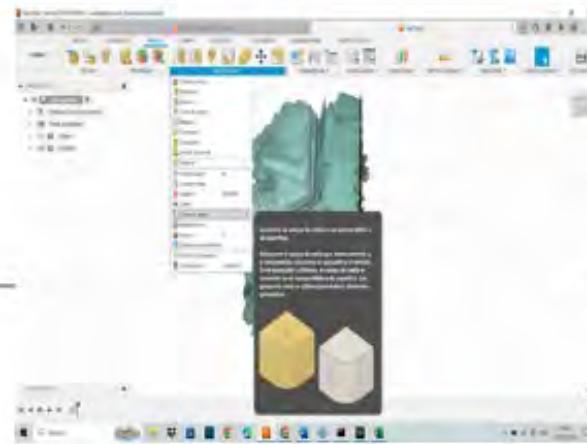
CREACION DE MALLA

1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



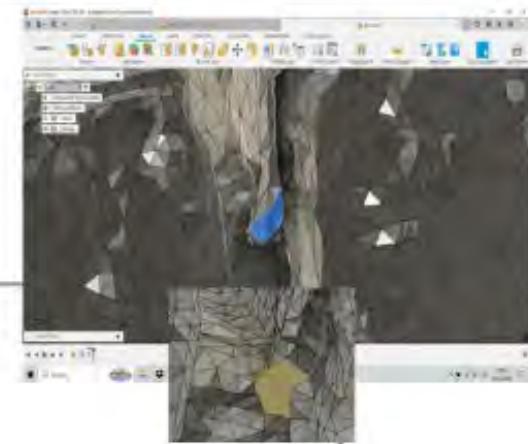
1

Insertamos la malla escaneada y darle una dirección y sentido a la figura



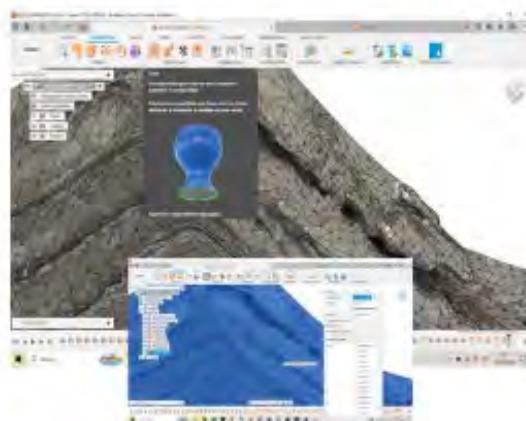
2

Convertir la malla en una superficie para poder editar y trabajar en este.



3

Existen algunas partes que no se escanearon bien por lo que sobresale mucho, esto debemos eliminarlo para que no interfiera con el flujo



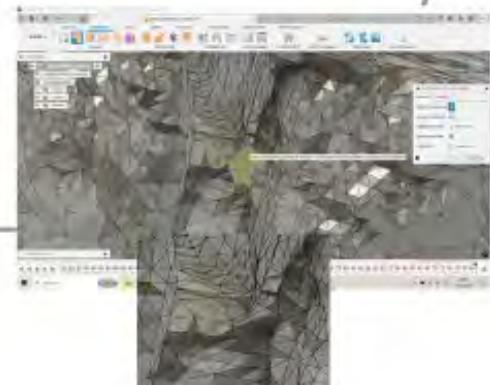
6

Una ves corregido todo usamos la herramienta coser para unir todos los cuerpos.



5

De la misma manera trabajamos todos los huecos, hasta arreglar toda la superficie de malla



4

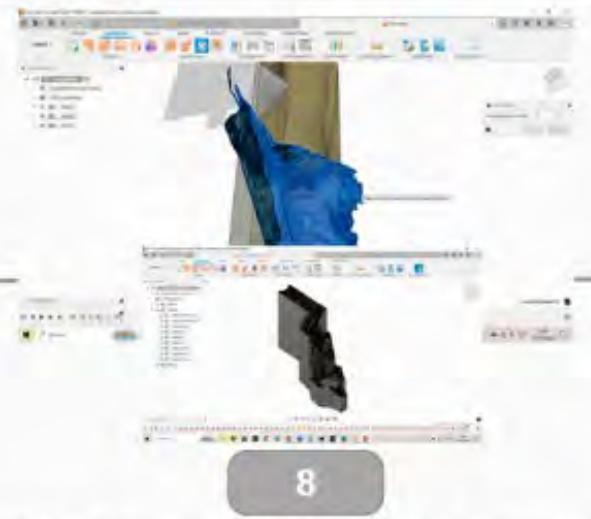
Con la herramienta superficie de contorno rellenamos los hueco que dejamos, y hace que se acople mejor a la superficie.

CREACION DE MALLA

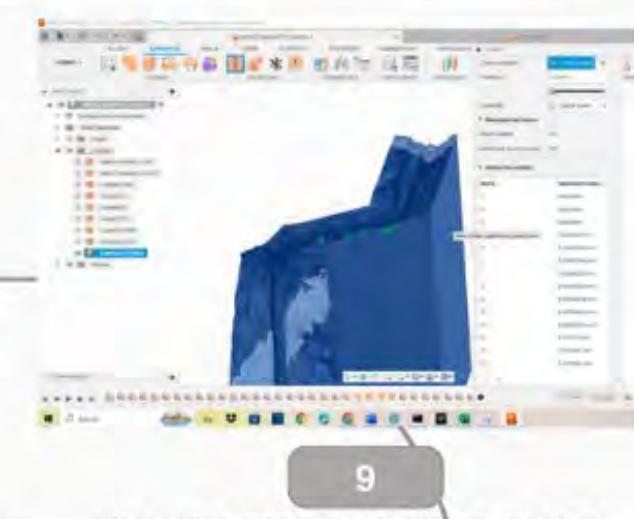
1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



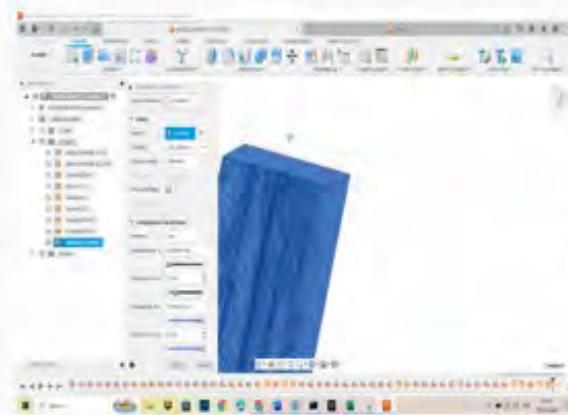
7
Creamos una base con la herramienta boceto a nuestra superficie y lo extruimos.



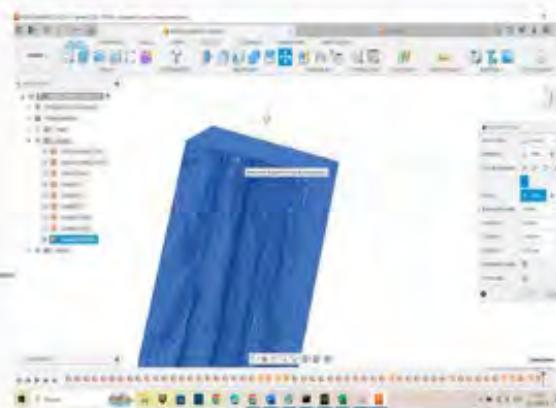
8
Recortamos las partes sobresalientes de ambos cuerpos con la herramienta recortar. Quedando de esta forma.



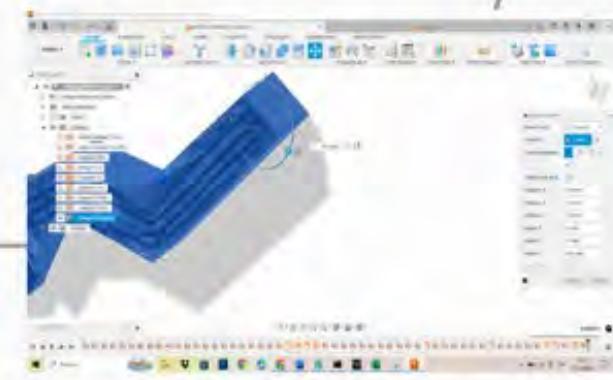
9
Con la herramienta coser, unimos todos los cuerpos para que se conviertan de superficie a sólido.



12
Finalmente exportamos el cuerpo en formato STL y con un refinado alto, para no tener problemas con la simulación.



11
Con la misma herramienta mover, movemos el cuerpo a una posición conocida en coordenadas x,y,z para poder hacer la simulación de manera más fácil.



10
Con la herramienta mover le damos dirección y sentido al sólido que aun quedaron.

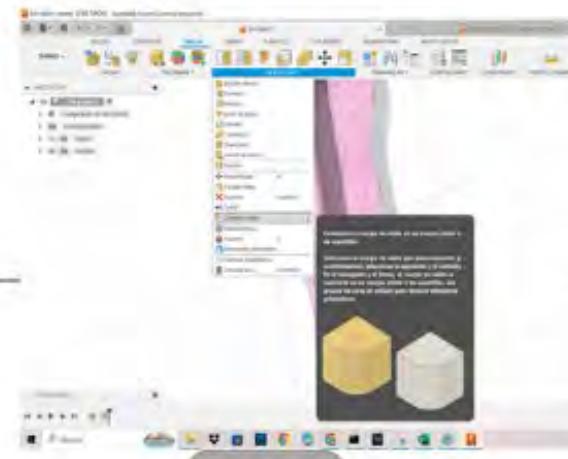
CREACION DE MALLA CANAL C-L03

1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



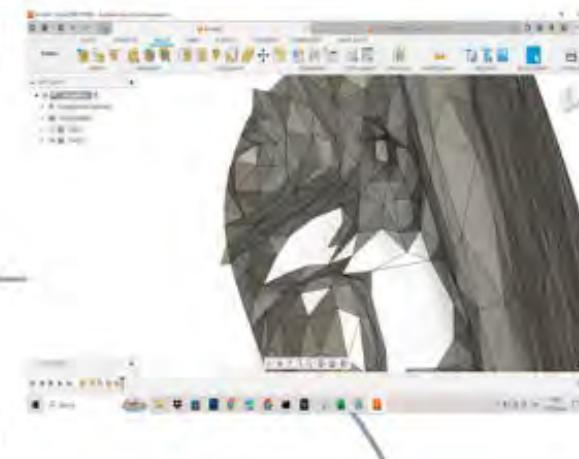
1

Insertamos la malla escaneada y darle una dirección y sentido a la figura



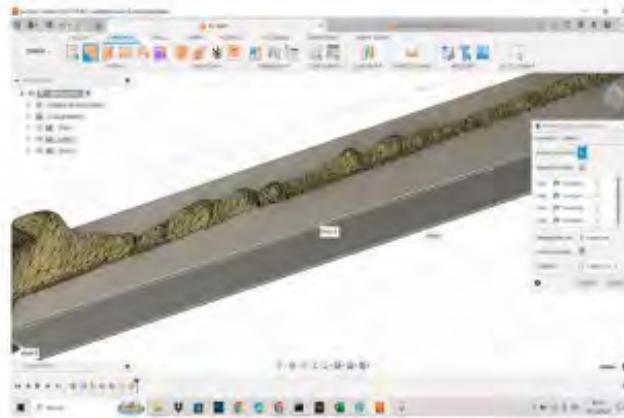
2

Convertir la malla en una superficie para poder editar y trabajar en este.



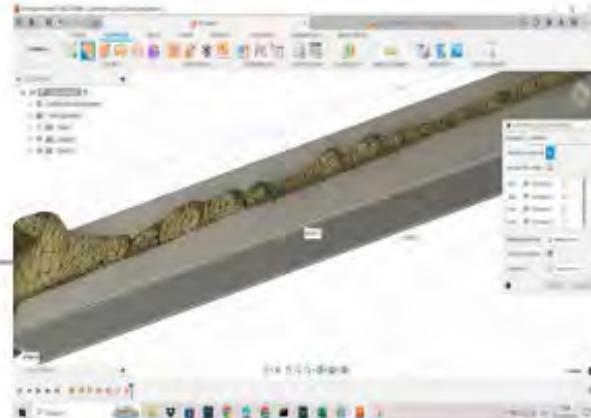
3

En caso del canal existen partes que se escanearon por demas como las paredes de los andenes y otras canales transversales por lo que debemos eliminarlo.



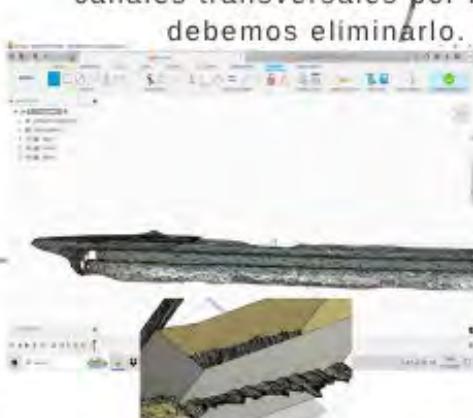
6

Empesamos a recortar los sobresalientes del canal y de la superficie extruida con la herramienta recortar



5

Una ves extruido hacemos la base de la extrucción con la herramienta superficie



4

Creamos una base con la herramienta boceto a nuestra superficie y lo extruimos.

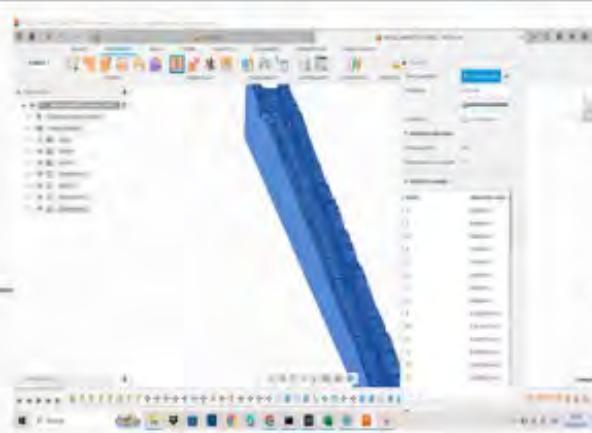
CREACION DE MALLA CANAL C-L03

1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



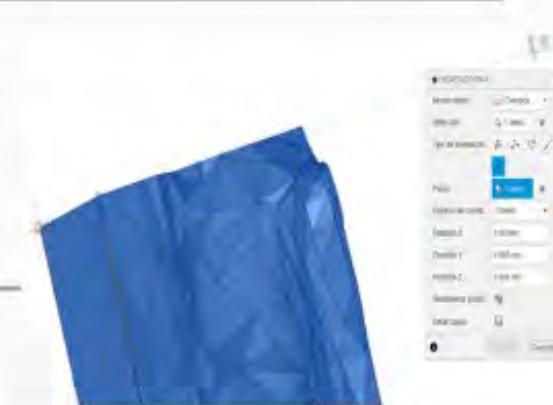
7

Con la herramienta coser, unimos todos los cuerpos para que se conviertan de superficie a sólido.



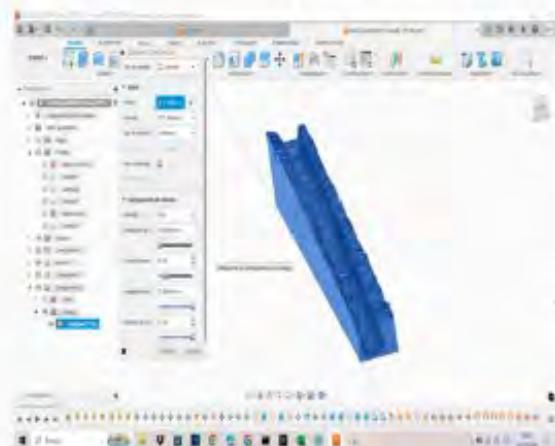
8

Con la herramienta mover le damos dirección y sentido al sólido.



9

Con la misma herramienta mover, movemos el cuerpo a una posición conocida en coordenadas x,y,z para hacer la simulación de manera mas fácil.



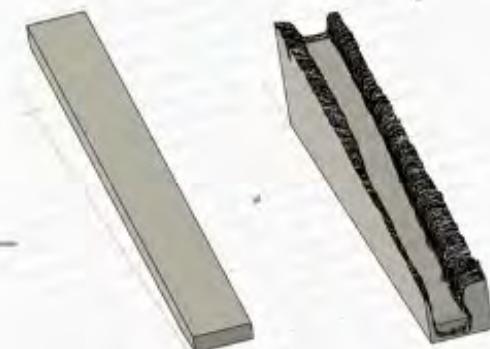
12

Exportamos en STL la malla de sólido del canal.



11

Exportamos la malla del sólido que será la condición inicial en la simulación en STL.

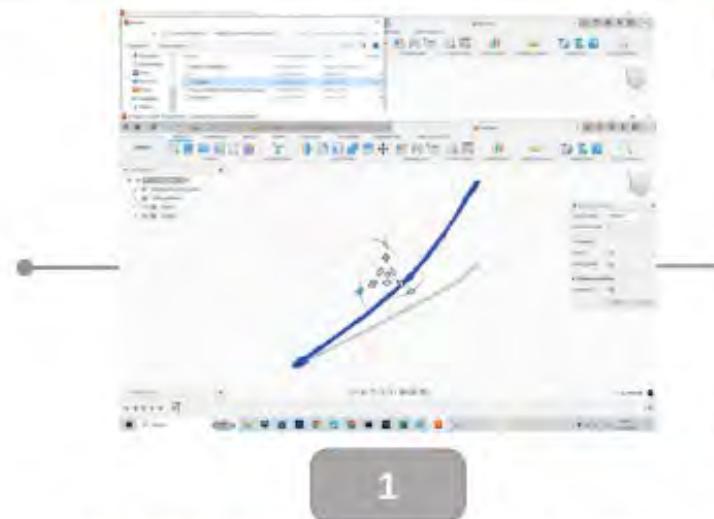


10

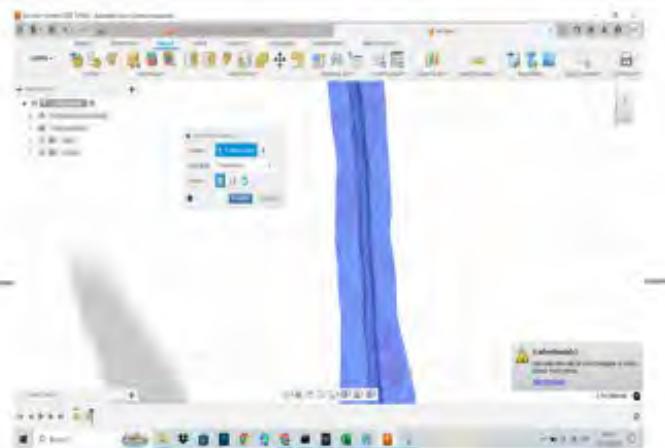
Realizamos la malla para la condición inicial de agua con la herramienta boceto creando este cuerpo.

CREACION DE MALLA ACUEDUCTO DE TIPÓN

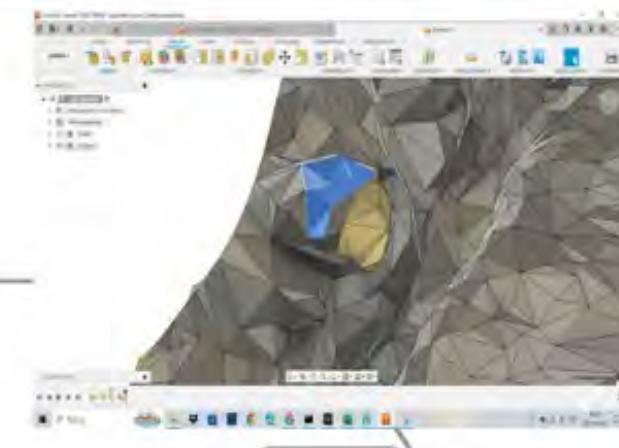
1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



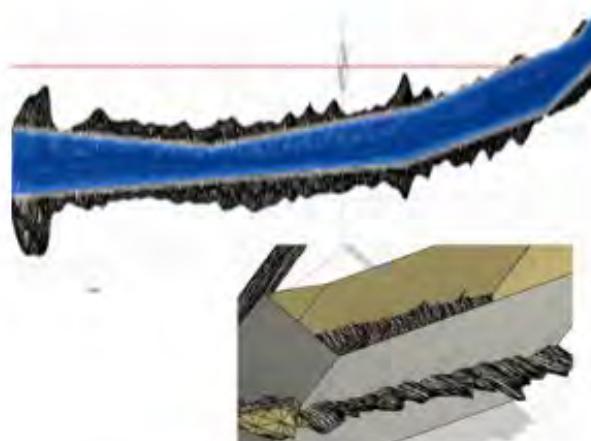
Insertamos la malla escaneada y darle una dirección y sentido a la figura



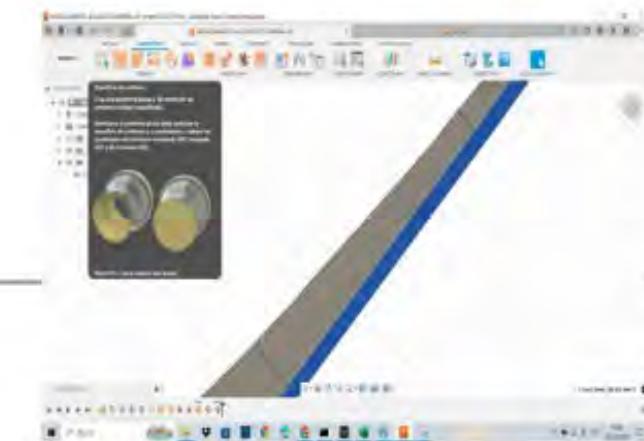
Convertir la malla en una superficie para poder editar y trabajar en este.



Existen algunas partes que no se escanearon bien por lo que sobresale mucho, esto debemos eliminarlo para que no interfiera con el flujo



Una ves extruido hacemos la base de la extrucción con la herramienta superficie



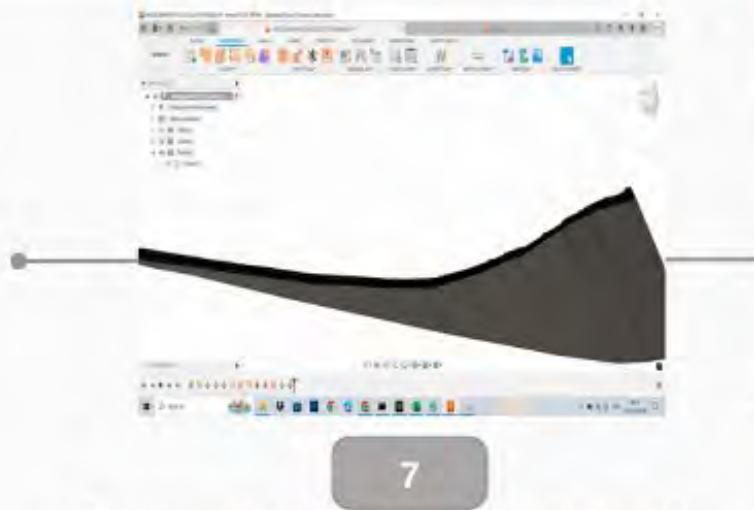
Creamos una base con la herramienta boceto a nuestra superficie y lo extruimos.



Con la herramienta superficie de contorno rellenamos los hueco que dejamos, y hace que se acople mejor a la superficie.

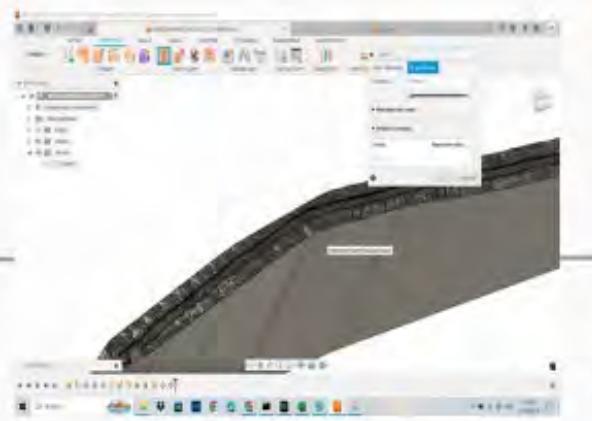
CREACION DE MALLA CANAL C-L03

1.1. Proceso De Creación De Malla De Solido En Formato STL Con El Programa Fusión 360 De Autodesk.



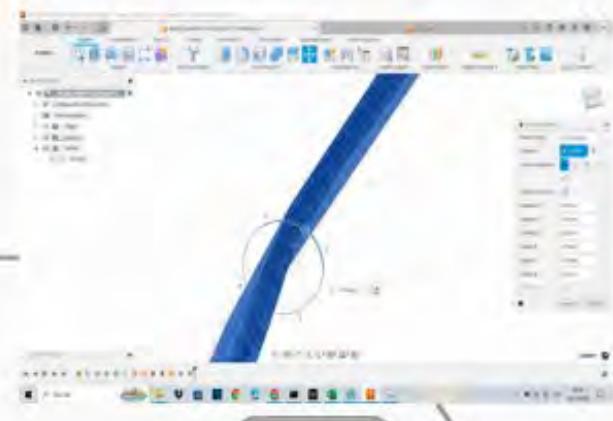
7

Recortamos las partes sobresalientes de ambos cuerpos con la herramienta recortar. Quedando de esta forma.



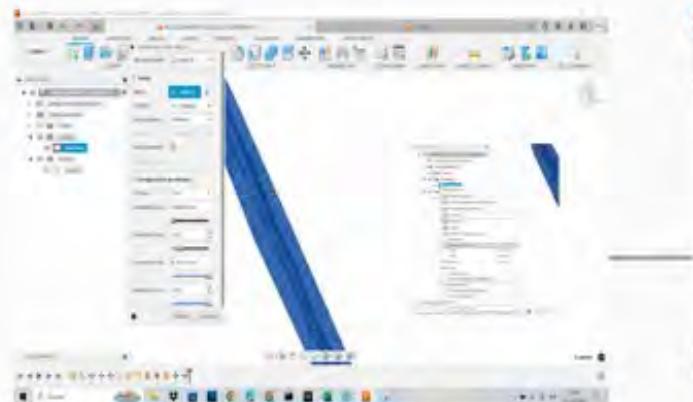
8

Con la herramienta coser, unimos todos los cuerpos para que se conviertan de superficie a sólido.



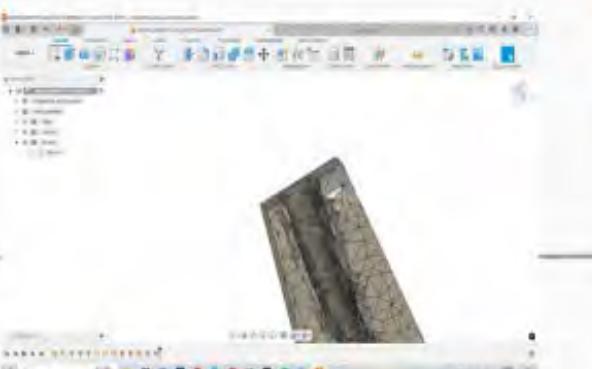
9

Con la herramienta mover le damos dirección y sentido al sólido.



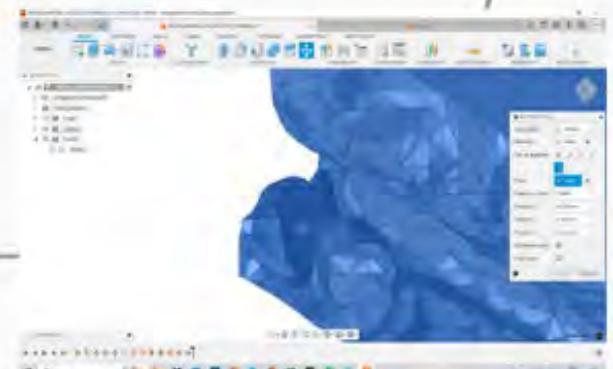
12

Finalmente exportamos el cuerpo en formato STL y con un refinado alto, para no tener problemas con la simulación



11

El punto final esta en 0,0,0, un punto conocido



10

Con la misma herramienta mover, movemos el cuerpo a una posición conocida en coordenadas x,y,z para poder hacer la simulación de manera más fácil.

8.6. Proceso de simulación cfd de las principales obras hidráulicas de tipón En FLOW - 3D

**SIMULACIÓN FLOW 3D
TEMPLO DEL AGUA TIPÓN**

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D

1

Agregamos una nueva simulación con el nombre simulación templo del agua

2

Elegimos el tiempo de simulación que en este caso será de 150 segundos, las unidades de medida SI.

3

Simulation Manager

Model Setup

General

Physics

Fluids

Gravity and Non-Inertial Reference Frame

Activate gravity

Gravity components:

X component: 0 m/s²

Y component: 0 m/s²

Z component: -9.81 m/s²

Activate non-inertial reference frame

Non-inertial reference frame model:

Motion type:

Object path constraints:

Position, orientation

Rotation constraints:

X-rotation, Y-rotation, Z-rotation

4

Velocity and Turbulence

Velocity options:

- Viscosity
- Turbulence viscosity (for stress ratio dependent viscosity)

Turbulence options:

- None
- Turbulence model:
 - Prandtl mixing length
 - One-equation, turbulent energy model
 - Turbulent mixing length
 - Monin-Obukhov
 - Five-equation (K-E) model
 - Reynolds stress (RANS) model
 - Two-equation (k-ε) model
 - Maximum length scale length
 - Dynamically computed
 - Constant
 - Large eddy simulation model

Wall shear boundary conditions:

- None or zero slip
- Friction coefficient

Friction coefficient: 0.0012

Surface roughness:

Flow

En la parte de physics cargamos el valor de la gravedad -9.81m/s²

Tambien cargamos el modelo de turbulencia y viscosidad que es el K-W para obtener mejores resultados.

SIMULACIÓN FLOW 3D TEMPLO DEL AGUA TIPÓN

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



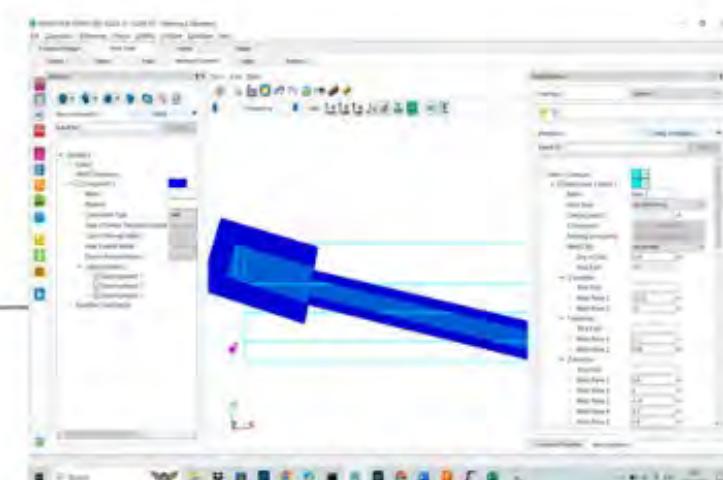
5

Cargamos las propiedades del fluido, en nuestro caso es agua a 20°C en la parte de Fluids



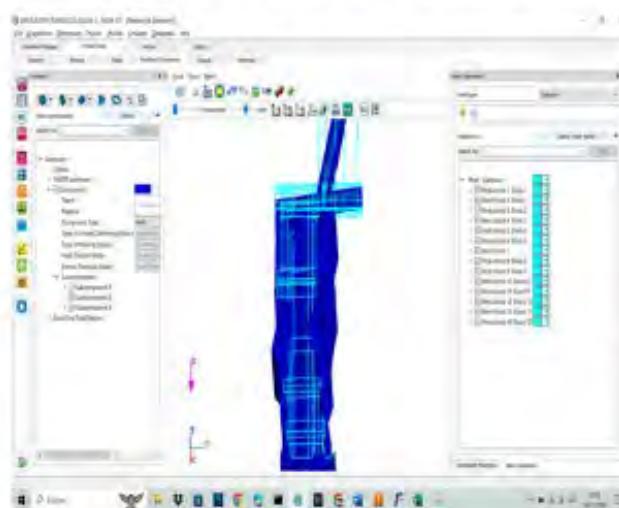
6

Luego en meshing and geometry importamos la malla en STL exportada de FUSION 360



7

Empesamos a realizar los bloques de malla que son los que capturaran el paso del agua y la geometria de la simulación con ayuda del metodo FOV

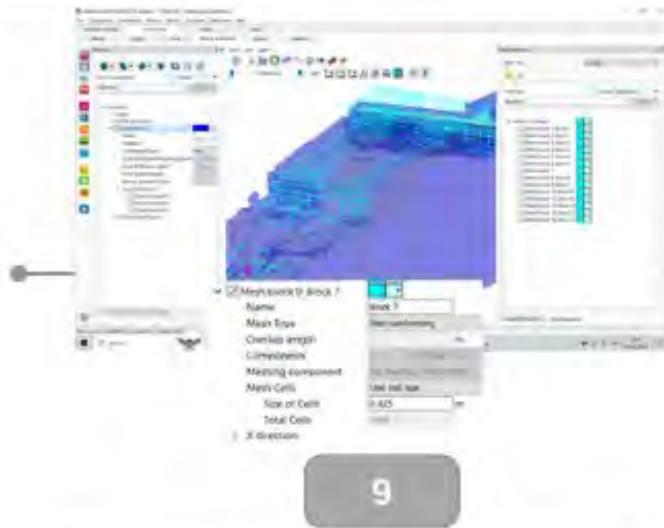


8

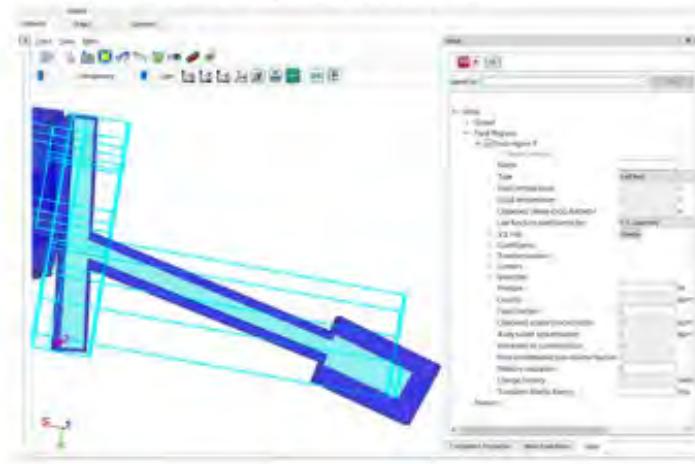
Para este caso realice 12 bloques de malla, hacer los bloques de malla solo en la parte donde habla flujo para evitar desgaste computacional.

SIMULACIÓN FLOW 3D TEMPLO DEL AGUA TIPÓN

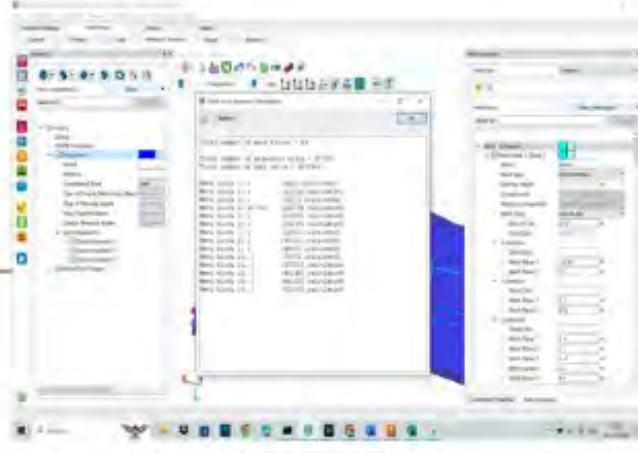
Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



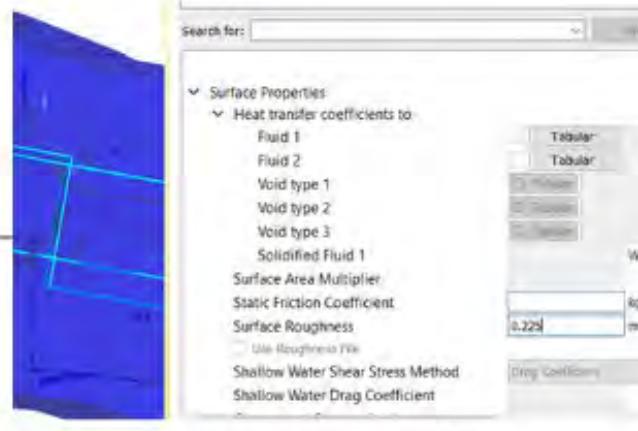
Los bloques deben estar conectados por planos de malla, para que haya una mejor circulación de información. Además el tamaño de celda debe ser el más pequeño posible para captar el fluido y la geometría,



Luego se coloca una condición de agua inicial, importando el STL de flujo de agua que creaste en FUSION



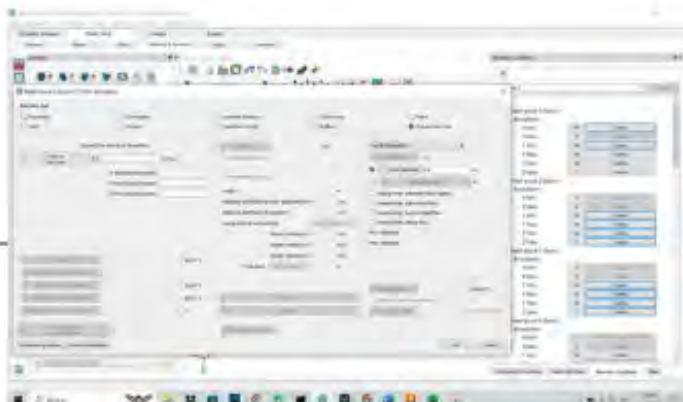
De acuerdo al ordenador se recomienda tener en cuenta el número de celdas, en mi caso se puede trabajar hasta con 3 millones de celdas, tardando en procesar 12 horas la simulación.



En surface properties agregamos el valor de la rugosidad que en este caso es de 0.225 valor en ks que en maning sería 0.030

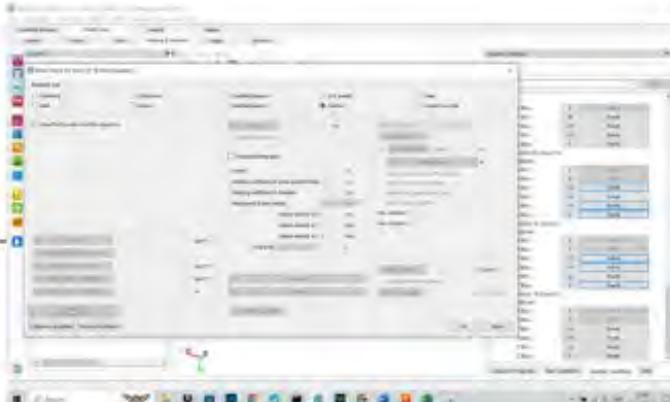
SIMULACIÓN FLOW 3D TEMPLO DEL AGUA TIPÓN

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En
FLOW - 3D



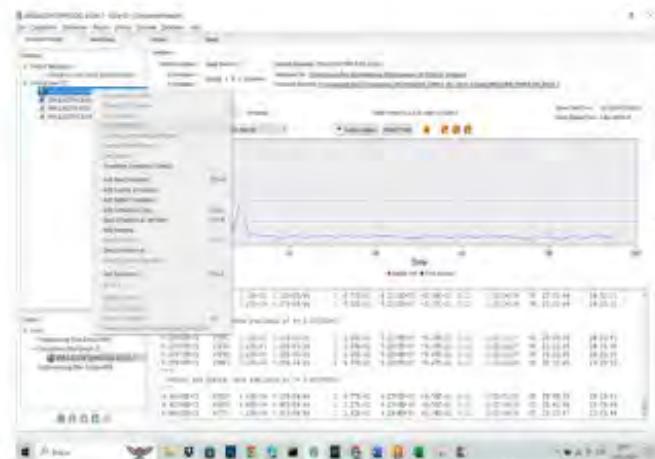
13

Luego empesamos con las condiciones de borde en los mesh blocks, para empesar colocamos la condicion del caudal y el tirante al inicio de la simulación



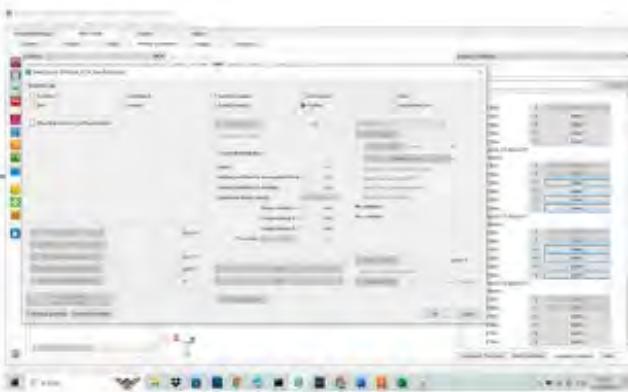
14

Se van colocando las condiciones de borde de acuerdo a la mediciones en campo y el contacto entre mesh blocks, al final se la condicion de outflow



16

Finalmente hacemos correr la simulacion dandole click derecho y luego run simulation.



15

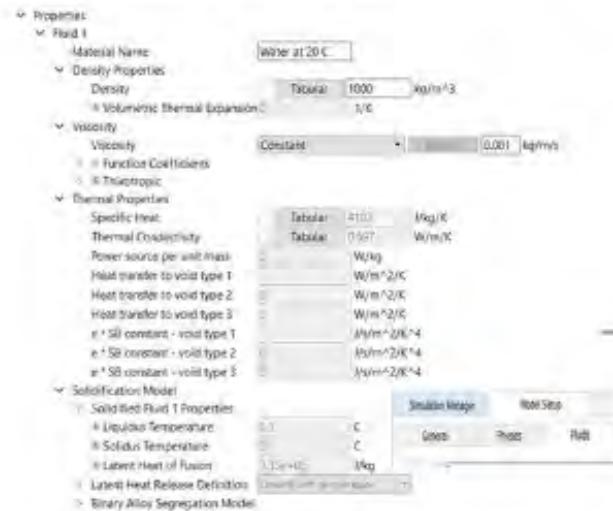
Seleccionamos los datos que quieren que se guarden en la simulación y cada cuanto tiempo se guarden.

SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



Agregamos una nueva simulación con el nombre simulación CAIDA.



Cargamos las propiedades del fluido, en nuestro caso es agua a 20°C en la parte de Fluids



Elegimos el tiempo de simulación que en este caso será de 90 segundos, las unidades de medida SI.



En la parte de physics cargamos el valor de la gravedad -9.81m/s² y el modelo de turbulencia K-W, para tener mejores resultados

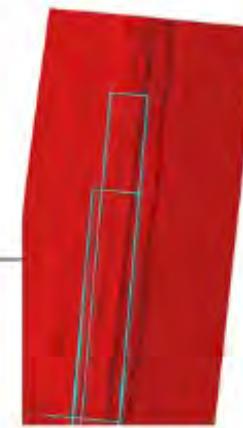
SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En
FLOW - 3D



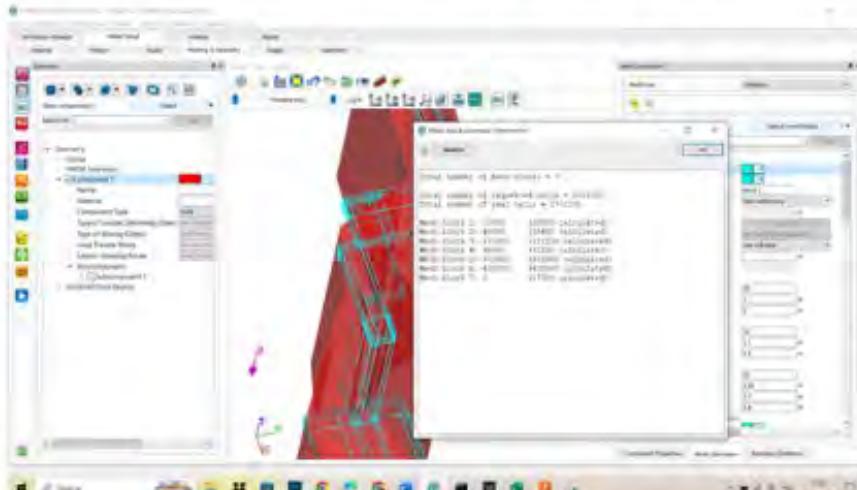
5

Luego en meshing and geometry importamos la malla en STL exportada de FUSION 360



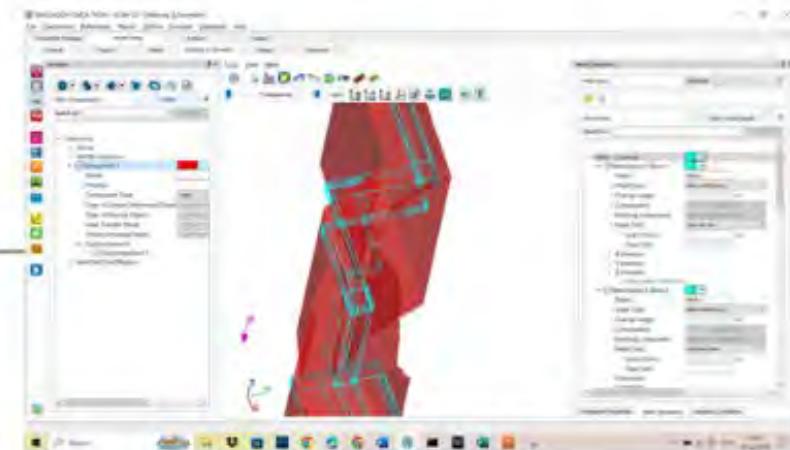
6

Empesamos a realizar los bloques de malla que son los que capturaran el flujo y la geometria de la simulación con ayuda del metodo FOV, usamos 7 bloques.



8

Se recomienda tener en cuenta el numero de celdas, en mi caso se puede trabajar hasta con 1.7 millones de celdas con un tamaño de celda de 0.02, tardando en procesar 8 horas la simulación.

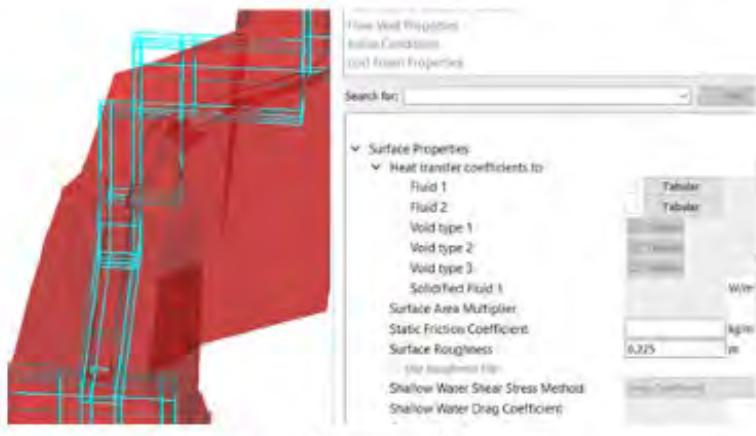


7

Hacer los bloques de malla solo en la parte donde habla flujo para evitar desgaste computacional. Los bloques deben estar conectados por planos de malla

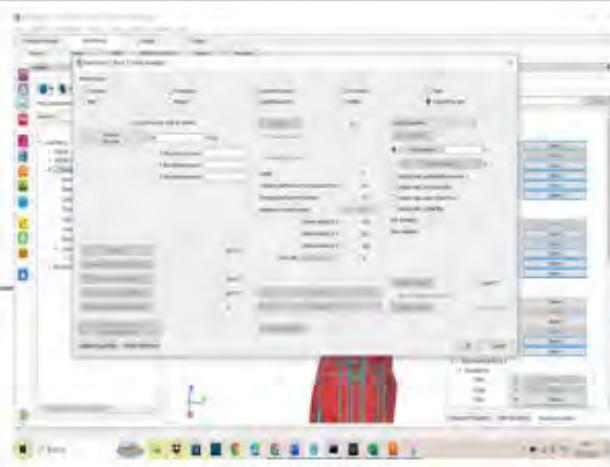
SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En
FLOW - 3D



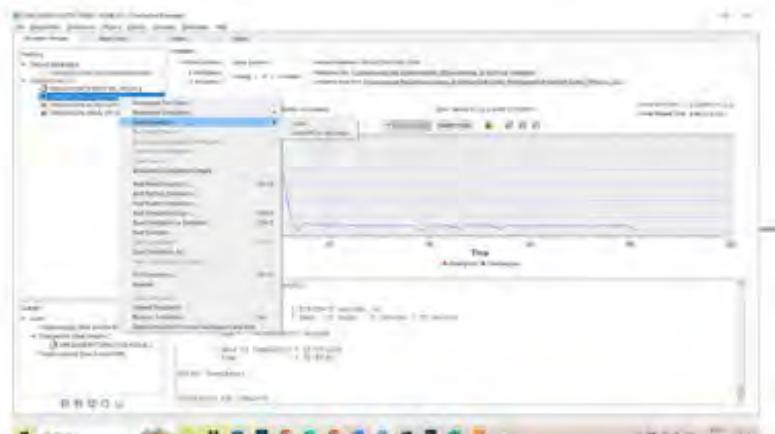
9

En surface properties agregamos el valor de la rugosidad que en este caso es de 0.225 valor en ks que en maning seria 0.030



10

Luego empesamos con las condiciones de borde en los mesh blocks, para empesar colocamos la condicion del caudal y el tirante al inicio de la simulación



12

Finalmente hacemos correr la simulacion dandole click derecho y luego run simulation.

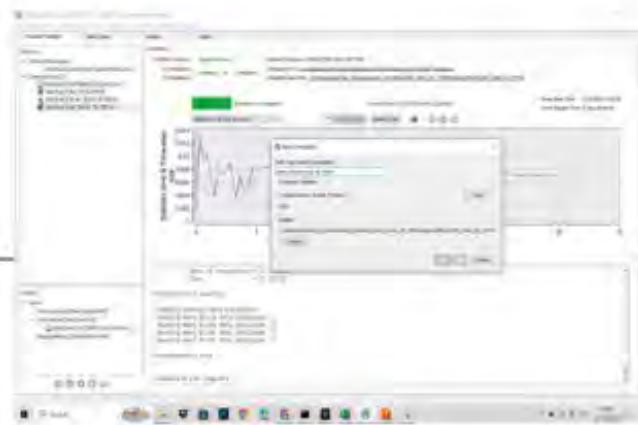


11

Seleccionamos los datos que quieren que se guarden en la simulación y cada cuanto tiempo se guarden.

SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



1

Agregamos una nueva simulación con el nombre simulación Canal Tipón.



2

Elegimos el tiempo de simulación que en este caso será de 60 segundos, las unidades de medida SI.



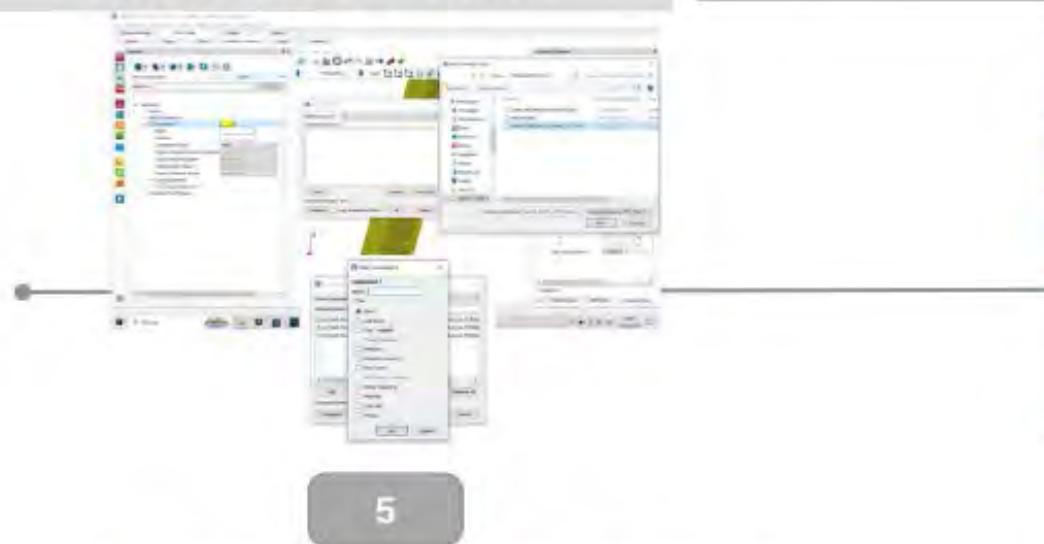
3

En la parte de physics cargamos el valor de la gravedad -9.81m/s² y el modelo de turbulencia K-W, para tener mejores resultados

Cargamos las propiedades del fluido, en nuestro caso es agua a 20°C en la parte de Fluids

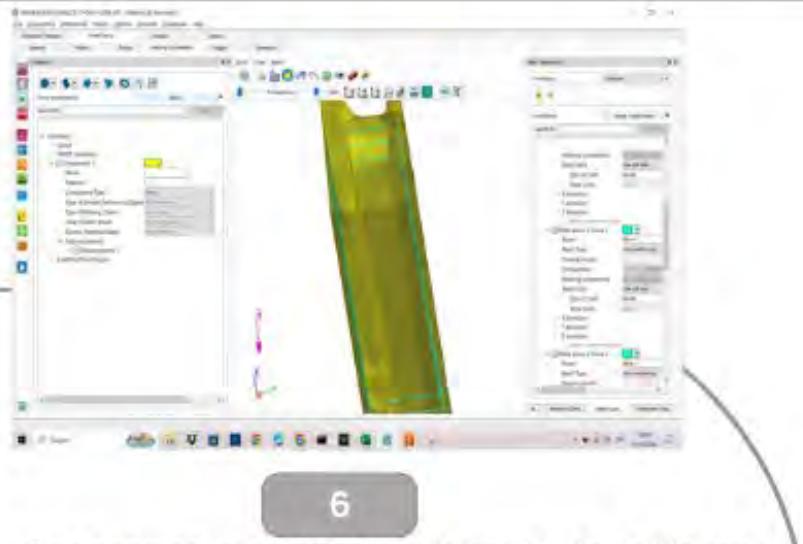
SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



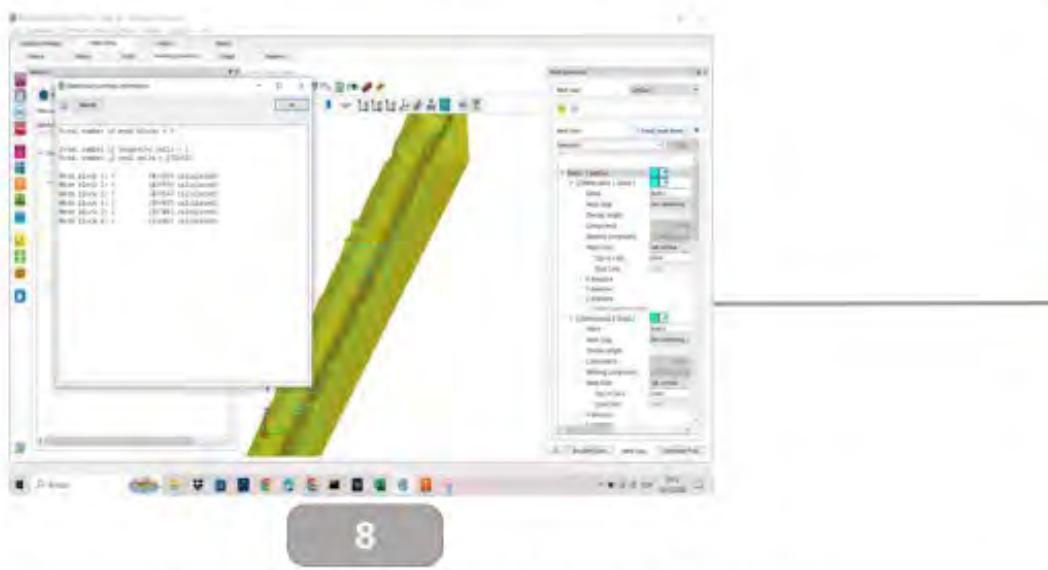
5

Luego en meshing and geometry importamos la malla en STL exportada de FUSION 360



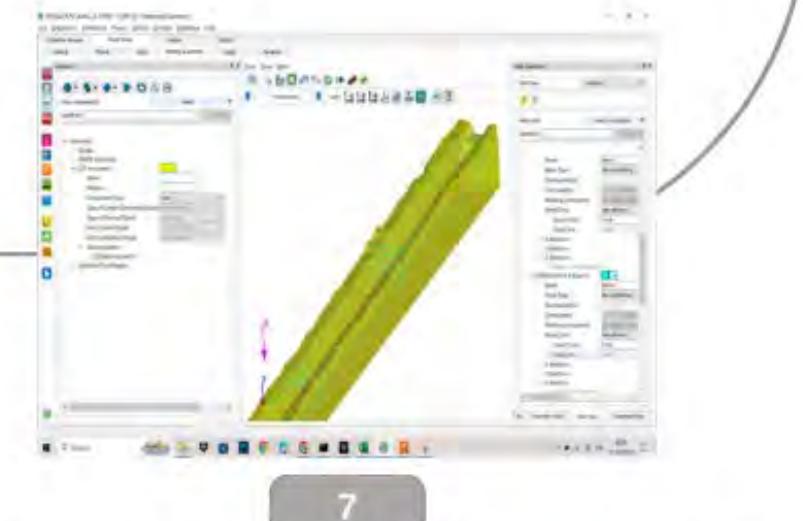
6

Empesamos a realizar los bloques de malla que son los que capturaran el flujo y la geometria de la simulación con ayuda del metodo FOV, usamos 6 bloques.



8

Se recomienda tener en cuenta el numero de celdas, en mi caso se puede trabajar hasta con 2 millones de celdas con un tamaño de celda de 0.018, tardando en procesar 6 horas la simulación.



7

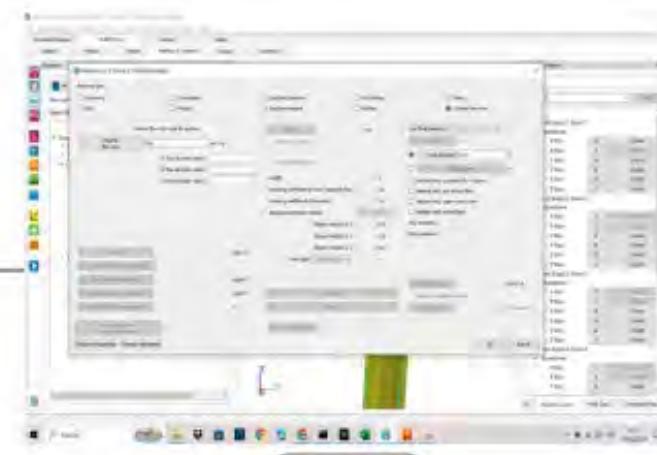
Hacer los bloques de malla solo en la parte donde habla flujo para evitar desgaste computacional. Los bloques deben estar conectados por planos de malla

SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



9



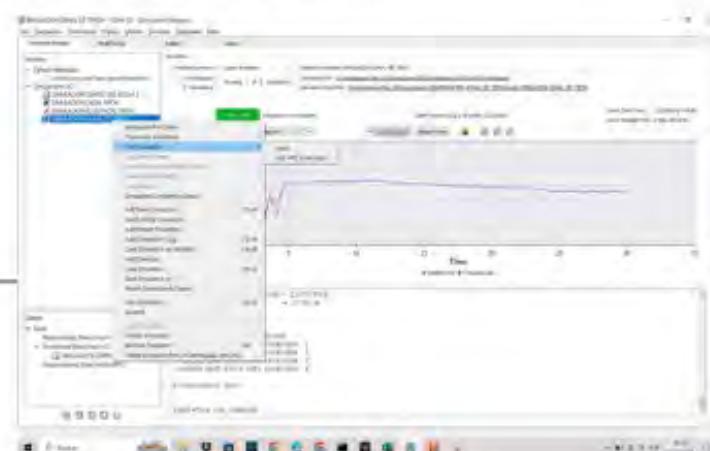
10

Luego empesamos con las condiciones de borde en los mesh blocks, para empesar colocamos la condicion del caudal y el tirante al inicio de la simulación



12

Finalmente hacemos correr la simulacion dandole click derecho y luego run simulation.



11

Seleccionamos los datos que quieren que se guarden en la simulación y cada cuanto tiempo se guarden.

SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



1

Agregamos una nueva simulación con el nombre simulación Canal Tipón.



4

Cargamos las propiedades del fluido, en nuestro caso es agua a 20°C en la parte de Fluids



2

Elegimos el tiempo de simulación que en este caso será de 90 segundos, las unidades de medida SI.



3

En la parte de physics cargamos el valor de la gravedad -9.81m/s² y el modelo de turbulencia K-W, para tener mejores resultados

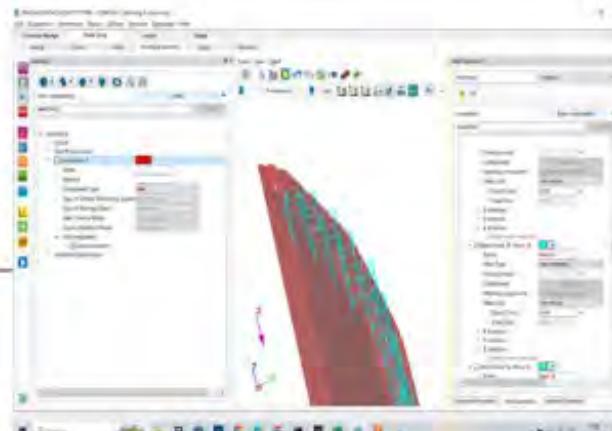
SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En
FLOW - 3D



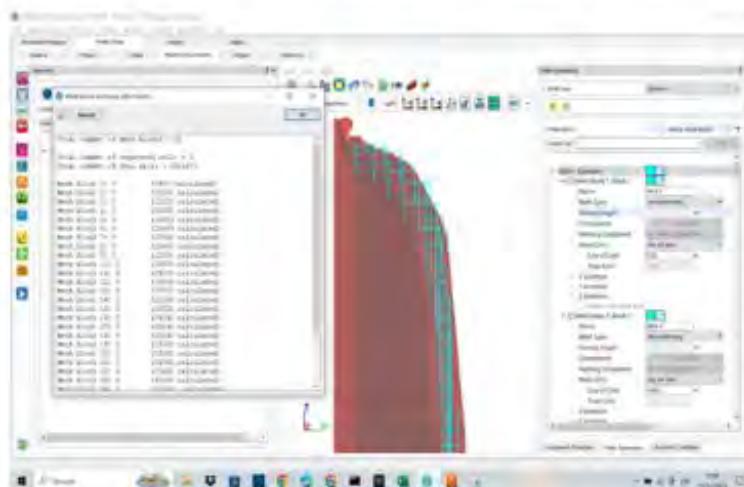
5

Luego en meshing and geometry importamos la malla en STL exportada de FUSION 360



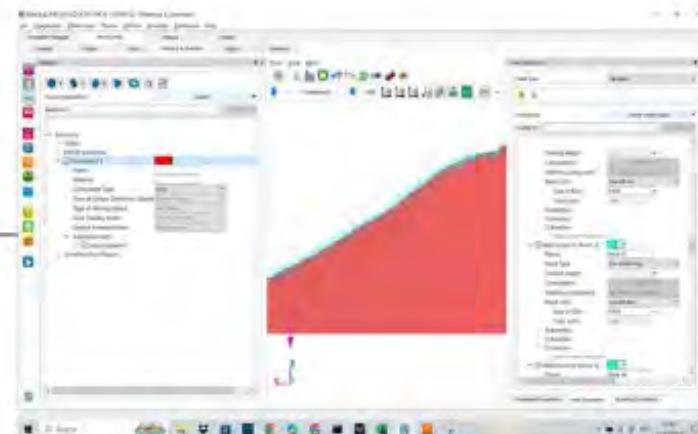
6

Empesamos a realizar los bloques de malla que son los que capturaran el flujo y la geometria de la simulación con ayuda del metodo FOV, usamos 31 bloques.



8

Se recomienda tener en cuenta el numero de celdas, en mi caso se puede trabajar hasta con 1.61 millones de celdas con un tamaño de celda de 0.02, tardando en procesar 16 horas la simulación.

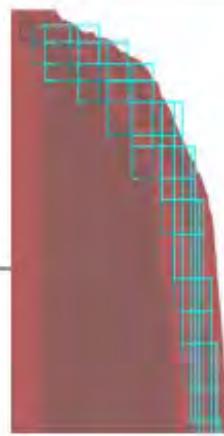


7

Hacer los bloques de malla solo en la parte donde habla flujo para evitar desgaste computacional.Los bloques deben estar conectados por planos de malla

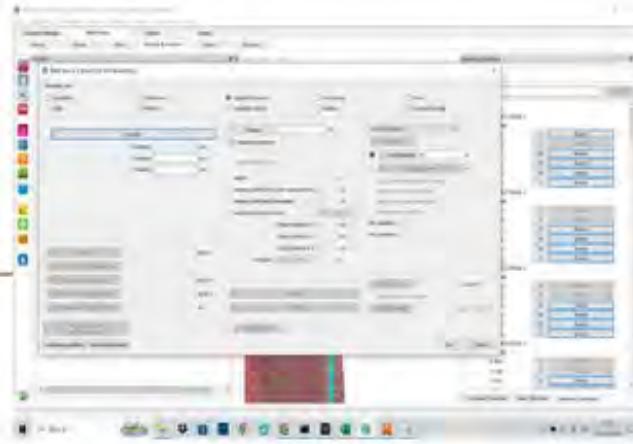
SIMULACIÓN FLOW 3D CAIDA TERRAZA 2

Proceso De Simulación CFD De Las Principales Obras Hidráulicas De Tipón En FLOW - 3D



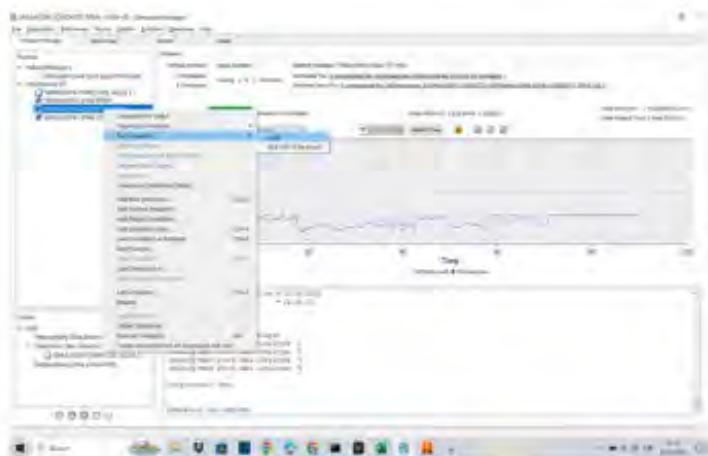
9

En surface properties agregamos el valor de la rugosidad que en este caso es de 0.225 valor en ks que en maning seria 0.030.



10

Luego empesamos con las condiciones de borde en los mesh blocks, para empesar colocamos la condicion de la presion como tirante.



12

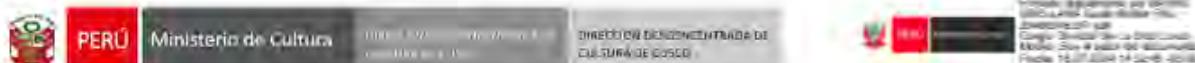
Finalmente hacemos correr la simulacion dandole click derecho y luego run simulation.



11

Seleccionamos los datos que quieren que se guarden en la simulación y cada cuanto tiempo se guarden.

8.7. Permiso



Decreto Supremo N° 000068-2024-CPAT/MC
Año del bicentenario de la consolidación de las Fuerzas Armadas y de la Constitución Política del Perú

Cusco, 16 de Julio del 2024

OFICIO N° 001789-2024-DDC-CUS/MC

Señores:

**GABRIEL RODRIGO HUAMÁN QUISPE Y ERNEST MIK MEZA TORRES,
BACHILLERES DE LA CARRERA PROFESIONAL FACULTAD INGENIERÍA CIVIL
DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO**

Correo electrónico: 192223@unsaac.edu.pe, 192838@unsaac.edu.pe

Celular: 962255343 -

Presente. -

Asunto : REMITE RESPUESTA A SOLICITUD

Ref. : Expediente N° 2024- 92878

De mi consideración:

Tengo el agrado de dirigirme a usted, en merito al documento de la referencia, el cual, el Gerente de la Municipalidad Distrital de Livilaca, solicitan autorización para la toma de fotos y sobrevuelo de DRÓN con sensor lidar, en Parque Arqueológico de Tipon para recopilar datos para proyecto de Tesis titulado "Evaluación del Sistema Hidráulico Inca empleado la dinámica de fluidos computacional en P.A. de Tipon- Cusco", para los meses de julio y agosto del 2024.

Al respecto, mediante Informe N° 003481-2024-SDDPCDPC/MC, emitido por la Sub Dirección Desconcentrada de Patrimonio Cultural y Defensa del Patrimonio Cultural, informa que, a través del Informe N° 000068-2024-CPAT/MC la Coordinación del P.A. de Tipon, señala que la petición del administrado obedece a un objetivo académico, y que el manejo de RPAS se realizará cumpliendo con las normativas de seguridad, además de respetar y preservar la integridad del Parque Arqueológico de Tipon, opinándose viable la solicitud presentada por administrado, precisando el cumplimiento de las siguientes recomendaciones:

1. El uso del Dron se deberá de dar en horas de poca afluencia de Turismo la misma que se recomienda en el horario de 7.30 a 9.00 horas de la mañana.
2. El registro fotográfico recopilado con equipo Dron, deba ser compartido con la DDC-Cusco, que permitirá tener un registro actualizado del P.A. de Tipon.
3. Los administrados deberán efectuar coordinación con la jefatura del P.A. de Tipon, con la finalidad de evitar alguna afectación al patrimonio cultural.



PERÚ

Ministerio de Cultura

MINISTERIO DE CULTURA
DIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE
CULTURA DE CUSCODIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE
CULTURA DE CUSCO

"Dirigir en la igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres
Año del Encuentro, de la consolidación de nuestra Independencia y de la continuidad de las luchas solidarias
de Justicia y Paz".

Finalmente, se considera de importancia que el administrado deba presentar los documentos y/o licencia que acredite el manejo de equipo de DRON.

Hago propicia la oportunidad para expresarle los sentimientos de mi consideración y deferente estima.

Atentamente,

Documento firmado digitalmente

GUIDO WALTER BAYRO ORELLANA
DIRECCIÓN DESCONCENTRADA DE CULTURA DE CUSCO

8.8. Panel fotográfico

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

PANEL FOTOGRÁFICO



FOTO N° 01 Primera visita de inspección al parque arqueológico de Tipón

AGOSTO-DICIEMBRE



FOTO N° 02 Foto junto a nuestro coasesor: Ing Jorge Abad en el parque de tipon



FOTO N° 03

Fotografia del Canal N° C-L05 modelado



FOTO N° 04

Observación de canales de Tipón que estan fuera de funcionamiento



FOTO N° 05 Observación de las obras hidráulicas de Tipón con nuestro asesor



FOTO N° 06 Evaluacion de las obras de arte en Tipón



FOTO N° 07 Explicación del sistema hidráulico inca por parte del Dr. Ing. Abad



FOTO N° 08 Foto de inspección de canales en Tipón en conjunto con nuestro asesor



FOTO N° 09 Fotografia del Templo del Agua de Tipón



FOTO N° 10 Foto de la parte superior del parque arqueológico de Tipón



FOTO N° 11

Foto grupal con nuestro asesor en Tipón



FOTO N° 12

Observación y recolección de datos de caídas pequeñas en Tipón



FOTO N° 13

Caida en deshuso en Tipón



FOTO N° 14

mini dron DJI para toma de videos



FOTO N° 15

Foto del parque arqueológico desde el lado izquierdo superior



FOTO N° 16

Foto del acueducto de Tipón



FOTO N° 17 toma de apuntes de las secciones y características del canal



FOTO N° 18 Foto de acueducto de Tipón



FOTO N° 19



FOTO N° 20 Acueducto desde la parte superior.



FOTO N° 21 Acueducto con una vista superior de este



FOTO N° 22 Acueducto con una vista superior de este



FOTO N° 23 Gabriel en la parte superior del acueducto



FOTO N° 24 Dr. Abad en la parte superior del acueducto



FOTO N° 25 Dr. Abad e Ing. Shafino en la parte superior del acueducto



FOTO N° 26 Ing. Sandro en la parte superior del acueducto



FOTO N° 27 foto del acueducto desde una perspectiva inferior



FOTO N° 28 Ing. Shafino e Ing. Sandro en el acueducto

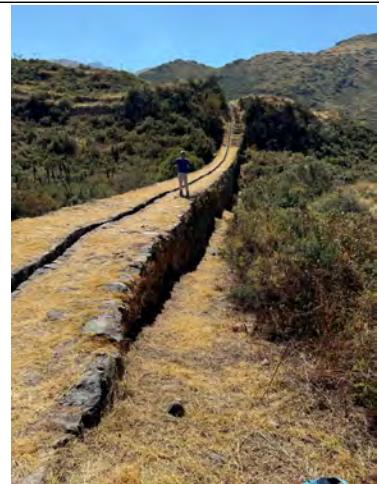


FOTO N° 29 Ing. Astete en el parque arqueológico de tipon

FOTO N° 30 Gabriel en el acueducto de tipon

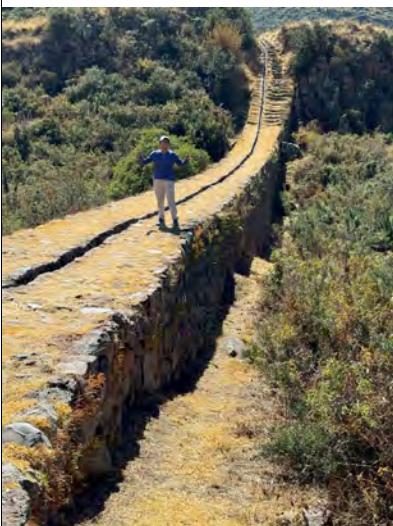


FOTO N° 31

Gabriel en el acueducto de tipon

FOTO N° 32

Ernest evaluando un canal



FOTO N° 33 Vista del lado Izquierdo del parque arqueológico de tipon

FOTO N° 34 Ernest y Gabriel junto al Dr. Abad e Ing. Shafino llevando el equipo para el levantamiento fotogramétrico



FOTO N° 35 Ernest junto a un Diferencial para tomar nuestro punto de referencia



FOTO N° 36



Marcando nuestro punto geodesico



FOTO N° 37 Equipo de tesisas en el levantamiento fotogrametrico



FOTO N° 38 Ernest Y Gabriel apunto de iniciar el vuelo del dron



FOTO N° 39 Ernest Y Gabriel apunto de iniciar el vuelo del dron



FOTO N° 40

Dron DJI Matrice 350 RTK



FOTO N° 41 Dron DJI Matrice 350 RTK apunto de volar

FOTO N° 42 Ing. Shafino volando Dron DJI Matrice 350 RTK



FOTO N° 43 Almuerzo con los ingenieros despues del levantamiento fotogrametrico con el Dron DJI Matrice 350 RTK

FOTO N° 44 Ernest sacando videos para poder procesarlos en el programa de LSPIV



FOTO N° 45 Marcando y levantando las grabaciones para hallar las velocidades de los canales

FOTO N° 46 Marcando y levantando las grabaciones para hallar las velocidades de los canales



FOTO N° 47 Ernest y Gabriel tomando las grabaciones del flujo de los canales



FOTO N° 48 Ernest y Gabriel tomando las grabaciones del flujo de los canales



FOTO N° 49 Tomando las medidas de las secciones de la caida



FOTO N° 50 Punto de Control de la caida D-7



FOTO N° 51 Tomando las medidas de la Seccion del canal



FOTO N° 52 Anotando las medidas de la seccion del canal



FOTO N° 53 toma de medidas de las dimensiones del canal D,L-16

FOTO N° 54 toma de medidas de las dimensiones del canal D,L-16



FOTO N° 55 Toma de las medidas de la caida D,L-8

FOTO N° 56 Toma de las medidas de la canal D,L-17



FOTO N° 57 Toma de las medidas de la canal D,L-17

FOTO N° 58 Toma de las medidas de la canal D,L-17



FOTO N° 59 toma de apuntes de las dimensiones del canal



FOTO N° 60 toma de apuntes de las dimensiones del canal



FOTO N° 61 Toma de las medidas de la caida D-8



FOTO N° 62 Toma de las medidas de la caida D-8



FOTO N° 63 toma de las medidas de las dimesiones del canal D,L-18



FOTO N° 64 toma de las medidas de las dimesiones del canal D,L-18



FOTO N° 65 toma de las medidas de las dimesiones del canal D,L-18

FOTO N° 66 toma de las medidas de las dimesiones del canal D,L-18

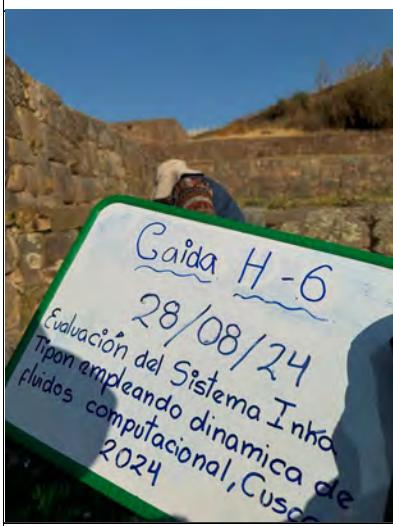


FOTO N° 67

caida H-6

FOTO N° 68 toma de las medidas de las dimesiones del caida H-6



FOTO N° 69 toma de las medidas de las dimesiones del caida H-6

FOTO N° 70

foto en la caida H-6

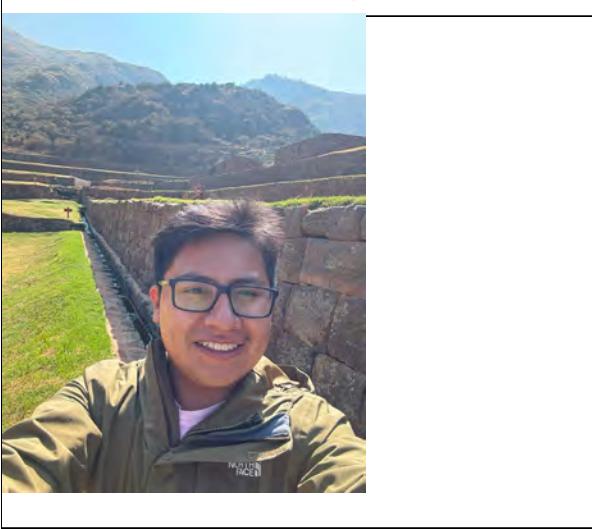
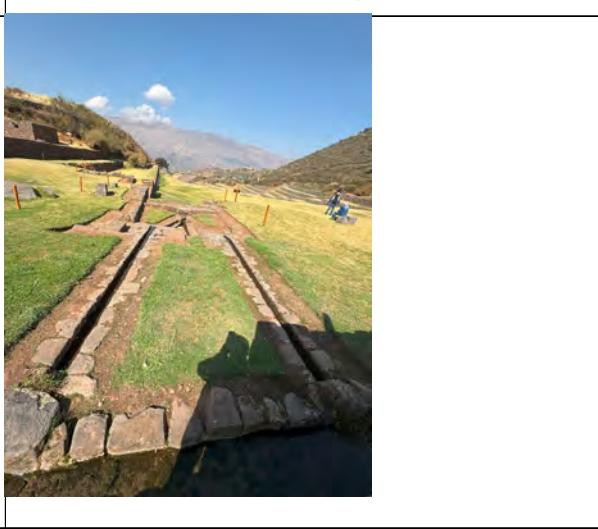
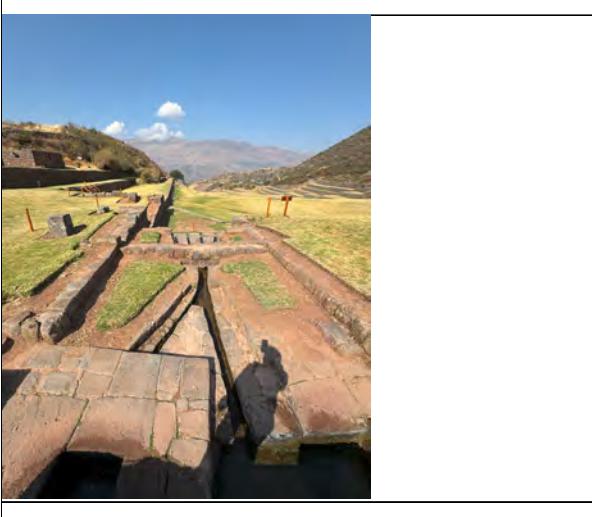
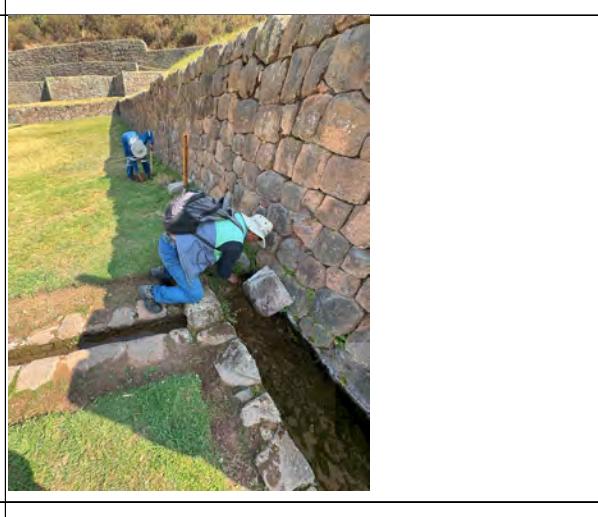
	
<p>FOTO N° 71 toma de las medidas de las dimesiones del templo del agua</p>	<p>FOTO N° 72 toma de las medidas de las dimesiones del templo del agua</p>
	
<p>FOTO N° 73 Gabriel en el canal antes del inicio del vuelo del DRON</p>	<p>FOTO N° 74 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico</p>
	
<p>FOTO N° 75 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico</p>	<p>FOTO N° 76 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico</p>



FOTO N° 77 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico



FOTO N° 78 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico

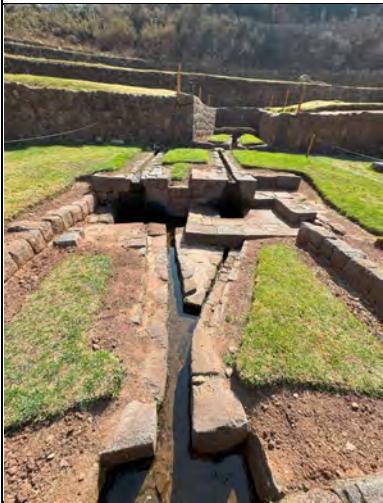


FOTO N° 79 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico



FOTO N° 80 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico



FOTO N° 81 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico



FOTO N° 82 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico



FOTO N° 83 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico



FOTO N° 84 Secando los canales del templo del agua para el levantamiento fotogrametrico

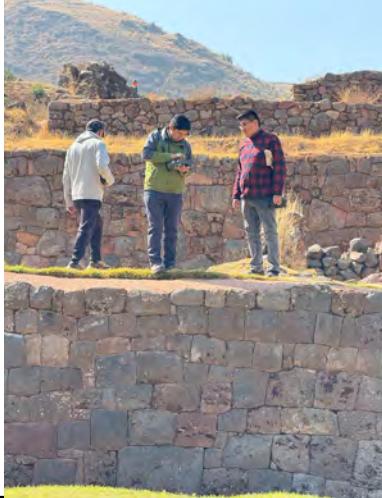


FOTO N° 85 Iniciando vuelo del Drsegundo vuelo del Dron DJI Matrice 350 RTK



FOTO N° 86 Iniciando vuelo del Drsegundo vuelo del Dron DJI Matrice 350 RTK



FOTO N° 87 Ernest en el complejo arqueologico de Tipón



FOTO N° 88

caida N°CD-L03



FOTO N° 89

Gabriel en la caida N°CD-L02



FOTO N° 90

toma de las medidas de la sección del canal C-L05 para poder grabar y optener su velocidad



FOTO N° 91

Toma de las medidas de la sección del canal para poder grabar y optener su velocidad



FOTO N° 92

Toma de las medidas de la sección del canal para poder grabar y optener su velocidad



FOTO N° 93

Gabriel en el acueducto del parque arqueologico

FOTO N° 94

Foto parque arqueologico de tipon