



UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,

INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN.

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL.

**“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE
VELOCIDAD SUPERFICIAL DE LA CONFLUENCIA DEL RIO
TARQUI Y YANUNCAY APLICANDO LA TÉCNICA LSPIV”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTORES: BRYAN STEVEN ALDANA QUIZHPI

MILTON FABIAN TSENKUSH SHAKAI

DIRECTOR: ING. SANTIAGO OCHOA

CUENCA-ECUADOR

2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA,
INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE
VELOCIDAD SUPERFICIAL DE LA CONFLUENCIA DEL RIO
TARQUI Y YANUNCAY APLICANDO LA TÉCNICA LSPIV”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

AUTORES: BRYAN STEVEN ALDANA QUIZHPI

MILTON FABIAN TSENKUSH SHAKAI

DIRECTOR: ING. SANTIAGO OCHOA

CUENCA - ECUADOR

2024

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD

Bryan Steven Aldana Quizhpi y Milton Fabian Tsenkush Shakai portadore(a)s de las cédulas de ciudadanía N° 0106653371 y 1401132558. Declaramos ser autore(a)s de la obra: **"CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE VELOCIDAD SUPERFICIAL DE LA CONFLUENCIA DEL RIO TARQUI Y YANUNCAY APLICANDO LA TÉCNICA LSPIV"**, sobre la cual nos hacemos responsables sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaramos que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaramos finalmente que nuestra obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también nos responsabilizamos y eximimos a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 4 de octubre de 2024

F: 

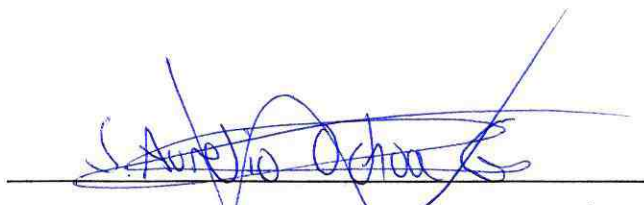
Bryan Steven Aldana Quizhpi
0106653371

F: 

Milton Fabian Tsenkush Shakai
1401132558

CERTIFICADO DEL DIRECTOR DE TESIS

Yo Ing. Santiago Aurelio Ochoa García certifico que el presente trabajo de titulación realizado por los Sres. BRYAN STEVEN ALDANA QUIZHPI y MILTON FABIAN TSENKUSH SHAKAI, egresados de la UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y CONSTRUCCIÓN, fue realizado bajo mi supervisión y tutoría con el tema “CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE VELOCIDAD SUPERFICIAL DE LA CONFLUENCIA DEL RIO TARQUI Y YANUNCAY APLICANDO LA TÉCNICA LSPIV”.



ING. SANTIAGO AURELIO OCHOA GARCÍA PhD.

C.I. 010415814-2

DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN

DEDICATORIA MILTON FABIAN TSENKUSH SHAKAI

Toda persona necesita un impulso para caminar, una chispa que encienda el motor de sus sueños y que ilumine el camino hacia sus metas. A lo largo de este viaje, he tenido la fortuna de contar con personas extraordinarias que han sido ese impulso en mi vida.

Dedico este trabajo a mis padres: **Lidia Shakai**, quien siempre me apoyó moralmente, perdonó mis errores y me brindó su amor incondicional. Gracias por ser mi refugio y mi fuerza en los momentos más difíciles. **Milton Tsenkush**, quien fue mi sustento y apoyo constante, más que un amigo, por todo lo que tuvo que sufrir para verme crecer y triunfar. Gracias por tus sacrificios, tu ejemplo de fortaleza y por nunca dejar de creer en mí. A mis hermanos: **Shirley Tsenkush**, por los años vividos juntos y las lágrimas que compartimos cuando queríamos darnos por vencidos. Gracias por tu compañía y por ser mi confidente en las batallas más duras. **Kelly Tsenkush**, fiel amiga que nunca me abandonó y supo corregirme cuando estaba equivocado. Gracias por tu lealtad, tu sabiduría. **Danny Tsenkush**, acompañante de mis locuras y aventuras, quien siempre apoyó mis sueños y me permitió participar en los suyos. Gracias por ser mi cómplice y por compartir cada paso de este camino conmigo. Mi mejor amigo **Carlos Mayancela**, quien me enseñó lo difícil que es el camino del buen emprendedor y que siempre hay una mano fiel para poder avanzar. Gracias por tu apoyo incondicional y por ser un ejemplo de perseverancia. **Bryan Aldana**, amigo cercano que forjó mi espíritu de lucha en el ámbito académico, laboral y personal. Totalmente agradecido de compartir aula y conocimientos en esta pequeña etapa académica. **Ing. Juan Barbecho**, amigo y docente que me motivó en todo momento, inspiración para ser una persona de bien y un profesional comprometido con la ética y el esfuerzo diario. Gracias por tu orientación y por ser un faro en mi formación. Y a todas las personas que brindaron su mano, mi grato agradecimiento de corazón.

DEDICATORIA BRYAN STEVEN ALDANA QUIZHPI

Mi sacrificio se refleja en las personas que estuvieron detrás de mis logros personales, y ahora me es grato vivir uno de ellos. Por ello dedico este trabajo:

A mis padres: **Alfonso Aldana** y **Adriana Quizhpi**, gracias por ser el cimiento sólido sobre el que he construido mis sueños. Su amor, apoyo y sacrificio han sido la fuerza incondicional detrás de mi éxito. A **mi familia** y **amigos**, gracias por su paciencia, comprensión y aliento constante en los momentos difíciles. Su presencia en mi vida ha sido un regalo invaluable.

También quiero agradecer a mi **director de tesis** y **docentes** de la carrera de Ingeniería Civil, por su guía y orientación valiosa. A mi **compañero de tesis** y **amigo**, gracias por los momentos de risa, los desafíos compartidos y el apoyo incondicional. Juntos hemos superado obstáculos y celebrados logros. Con gratitud y amor, dedico este logro a todos ustedes, que han hecho posible mi éxito.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento más sincero va a la Universidad Católica de Cuenca y a la Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción por brindarnos la oportunidad y el respaldo para llevar a cabo este estudio. Como nuestro director de tesis, agradecemos especialmente al Ingeniero Santiago Aurelio Ochoa García, por su constante orientación y apoyo a lo largo de nuestro camino académico y forjado de este trabajo. Además, expresamos nuestra gratitud a nuestros amigos y familiares por su incondicional apoyo y comprensión durante este proceso.

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en la caracterización experimental y numérica de la velocidad superficial en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, utilizando la técnica LSPIV (velocimetría de imágenes de partículas a gran escala). Esta técnica permite la medición precisa de las velocidades superficiales de los ríos mediante el análisis de imágenes tomadas de la superficie del agua, siendo una metodología no intrusiva.

Se realizaron mediciones experimentales en condiciones de estiaje, lo que permitió observar áreas con velocidades altas en los canales principales de los ríos, mientras que en los márgenes se encontraron velocidades menores. Los resultados revelan la distribución heterogénea de las velocidades superficiales y la complejidad del flujo en ríos de montaña. Para representar de manera adecuada la velocidad superficial en la intersección de los ríos Tarqui y Yanuncay, se desarrolló un modelo hidrodinámico 2D. Este modelo mostró una alta correlación con los datos experimentales, lo que valida su confiabilidad.

En el análisis se encontraron errores promedios de 1.26% en el río Tarqui, 2.75% en el río Yanuncay y 1.77% en el punto de confluencia. El uso de técnicas experimentales y numéricas, en conjunto con el LSPIV, demostró ser una herramienta efectiva para la caracterización de flujos en áreas de confluencia de ríos. La combinación de estas técnicas con la modelación numérica brinda una metodología sólida para el análisis y la gestión de sistemas fluviales complejos.

Palabras clave: LSPIV, velocidad superficial, dinámica fluvial, modelación hidrodinámica 2D

ABSTRACT

This study focuses on the experimental and numerical characterization of surface velocity at the confluence of the Tarqui and Yanuncay rivers using the LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) technique. This technique allows for accurate measurement of watercourse surface velocities by analyzing images taken from the water surface, making it a non-intrusive methodology.

Experimental measurements were conducted under low flow conditions, which made it possible to observe areas with high velocities in the main river channels. In contrast, lower velocities were found along the river banks. The results reveal the heterogeneous distribution of surface velocities and the flow complexity in mountain rivers. To adequately represent the surface velocity at the confluence of the Tarqui and Yanuncay rivers, a 2D hydrodynamic model was developed. This model showed a high correlation with the experimental data, validating its reliability.

The analysis found average errors of 1.26% in the Tarqui River, 2.75% in the Yanuncay River, and 1.77% at the confluence point. Experimental and numerical techniques, in conjunction with LSPIV, proved to be an effective tool for flow characterization in river confluence zones. Combining these techniques with numerical modeling provides a solid methodology for analyzing and managing complex river systems.

Keywords: LSPIV, surface velocity, river dynamics, 2D hydrodynamic modeling

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1. Introducción a las técnicas de velocimetría por imágenes.....	16
1.1. Antecedentes	16
1.2. Formulación del problema	17
1.3. Delimitación del Problema.....	18
1.4. Justificación.....	18
1.5. Objetivos.	19
1.5.1 Objetivo General.....	19
1.5.2 Objetivos Específicos.....	19
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1. Introducción	20
2.2. Modelación Numérica Hidráulica fluvial.....	21
2.3. Métodos experimentales en hidráulica fluvial	23
2.4. Descripción de las técnicas PIV Y PTV.....	24
2.4.1 Descripción de LSPIV	28
2.4.2 Medición de la velocidad usando el molinete.....	38
3. CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO.....	46
3.1. Área de Estudio	46
3.1.1 Principales características del río Tarqui y Yanuncay en el punto de confluencia. 47	
3.1.2 Problemas existentes en el área de estudio	48
3.2. Descripción de materiales empleados para la recolección de datos.....	50

3.2.1	Materiales y equipos para el método del molinete hidráulico	50
3.2.2	Materiales y equipos para desarrollo de la técnica (LSPIV).....	52
3.3.	Recolección de datos	53
3.3.1	Método intrusivo con molinete hidráulico para cauces profundos ..	54
3.3.2	Método intrusivo con molinete hidráulico para cauces poco profundos 54	
3.3.3	Método LSPIV (no intrusivo)	55
3.4.	Aplicación de la Técnica LSPIV	56
3.4.1	Procesamiento de video a imágenes	56
3.4.2	Velocimetría de imágenes en PIVlab.....	56
3.5.	Aplicación del Software RIVeR.....	59
3.5.1	Orto rectificación de imágenes (RIVeR)	59
3.5.2	Batimetría de la sección transversal recolectada in situ.....	60
3.5.3	Caudales de salida LSPIV (método no intrusivo).....	61
3.6.	Aplicación y simulación de crecidas en HEC-RAS 2D	61
4.	CAPITULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS	65
4.1.	Recolección de datos Primera Campaña	66
4.1.1	Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui	66
4.1.2	Resultados Medición en el río Tarqui AJ río Yanuncay.....	70
4.1.3	Medición en el río Yanuncay DJ río Tarqui	73
4.2.	Recolección de datos Segunda Campaña	77
4.2.1	Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui	78
4.2.2	Medición en el río Tarqui AJ río Yanuncay	82
4.2.3	Medición en el río Yanuncay DJ río Tarqui	86

4.3. Recolección de datos Tercera Campaña.....	89
4.3.1 Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui	89
4.4. Recolección de datos Cuarta Campaña	94
4.4.1 Medición en el río Tarqui AJ río Yanuncay	94
4.5. Análisis del coeficiente de Manning	97
4.6. Morfología de los ríos Tarqui y Yanuncay	98
4.7. Comparación del modelo hidrodinámico con LSPIV	100
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111
Capítulo 6. BIBLIOGRAFIA.....	115

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1 Principio de funcionamiento de PIV en su forma clásica.....	25
Figura 2 ROI tomado de (Fuente (Patalano, 2017))	26
Figura 3 Fundamentos de correlación cruzada tomado de (Patalano, 2017)	28
Figura 4 Representación del proceso de orto rectificación, tomado de (Andrade, 2015). 29	
Figura 5 Diagrama de flujo del sistema de análisis de gran escala tomado de Fuente: (Patalano, 2017)	30
Figura 6 Diagrama de flujo de las sub secuencias de procesamiento clásico de imágenes con PIVlab y PTVlab tomado de Fuente (Patalano, 2017).....	32
Figura 7 Molinete eje vertical, cazoleta. (Fernandez, 2019).....	37
Figura 8 Molinete eje horizontal, hélice. (Fuente; propia)	38
Figura 9 Molinete cable y contrapeso. Tomado de (Fernandez, 2019)	38
Figura 10 Puntos de Interés de Estudio (Fuente: Elaboración propia)	46

Figura 11 Dispositivo de lectura de velocidad calibrado por el fabricante (Magna Rod – Redback) (Fuente: Propia)	50
Figura 12 Instrumento de medición " MAGNA ROD - REDBACK " (Fuente: Propia)..	51
Figura 13. Instrumento de lectura de velocidad “Magna rodad – red back” (Fuente: Propia).....	52
Figura 14. Hélice giratoria tipo cazoleta (Fuente: Propia).....	52
Figura 15 Fotogramas (Fuente; Propia)	57
Figura 16 Pre-Proceso PIVlab (Fuente; Propia)	58
Figura 17 DEM en HEC -RAS	63
Figura 18 DEM con las condiciones de entrada y salida, con grilla (Fuente: Propia).....	63
Figura 19 Ingreso de Datos (Fuente; Propia).....	64
Figura 20 Simulación final -segunda campaña (Fuente: Propia).....	64
Figura 21 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Fuente; Propia)	66
Figura 22. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay AJ Tarqui en m/s	67
Figura 23 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)	68
Figura 24 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	70
Figura 25. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s	71
Figura 26 Velocidades con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia)	72

Figura 27 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	74
Figura 28. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay DJ Tarqui en m/s	75
Figura 29 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)	76
Figura 30 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	78
Figura 31. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio(inferior) Yanuncay AJ Tarqui en m/s	79
Figura 32 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)	80
Figura 33. Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	82
Figura 34. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s	83
Figura 35 Velocidades con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)	84
Figura 36 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	86
Figura 37. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay DJ Tarqui en m/s	87

Figura 38 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)	87
Figura 39 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia).....	90
Figura 40. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay AJ Tarqui en m/s	91
Figura 41 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente: Propia)	92
Figura 42. Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia).....	94
Figura 43. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio(inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s	95
Figura 44 Velocidades con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)	95
Figura 45 Modelación 2D aguas abajo de confluencia y campo de velocidad obtenido en campo (LSPIV) – Segunda Campaña (Fuente; Propia)	102
Figura 46. Velocidad de sección de control Yanuncay AJ Tarqui de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Primera Campaña	103
Figura 47. Velocidad de sección de control Tarqui AJ Yanuncay de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) – Primera Campaña.....	104
Figura 48. Velocidad de sección de control aguas abajo de la confluencia de modelo de modelación hidrodinámico (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Primera Campaña	105

Figura 49. Velocidad de sección de control Yanuncay AJ Tarqui de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Segunda Campaña	106
Figura 50. Velocidad de sección de control Tarqui AJ Yanuncay de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Segunda Campaña	107
Figura 51. Velocidad de sección de control aguas abajo de la confluencia de modelo de modelación hidrodinámico (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Segunda Campaña	108
Figura 52. Velocidad de sección de control Yanuncay AJ Tarqui de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) - Tercera Campaña.....	109
Figura 53. Velocidad de sección de control Tarqui AJ Yanuncay de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) - Cuarta Campaña	110

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Características de los ríos en estudio (Vallejo, 2014).....	48
Tabla 2. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	68
Tabla 3 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	69
Tabla 4 Corrección de descarga en Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	69
Tabla 5. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	72
Tabla 6 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	73

Tabla 7 Corrección de descarga en Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	73
Tabla 8. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	76
Tabla 9 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	77
Tabla 10 Corrección de descarga en Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia).....	77
Tabla 11. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	80
Tabla 12 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	81
Tabla 13 Corrección de descarga en Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	81
Tabla 14. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	84
Tabla 15 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	85
Tabla 16 Corrección de descarga en Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	85
Tabla 17. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	88

Tabla 18 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia).....	89
Tabla 19 Corrección de descarga en Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente: Propia).....	89
Tabla 20. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	92
Tabla 21 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia)	93
Tabla 22 Corrección de descarga en Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia).....	93
Tabla 23. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV).....	96
Tabla 24 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)	96
Tabla 25 Corrección de descarga en Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente: Propia).....	97
Tabla 26 Datos de entrada para la modelación 2D (Fuente; Propia)	100
Tabla 27. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	103
Tabla 28. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	104
Tabla 29. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	105

Tabla 30. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	106
Tabla 31. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	107
Tabla 32. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	108
Tabla 33. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	109
Tabla 34. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV.....	110

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE VELOCÍMETRIA POR IMÁGENES.

1.1. Antecedentes

Las primeras aplicaciones de campo del método Velocimetría de Imágenes de Partículas a Gran Escala, fue en la década de los 90. Desde entonces, es una técnica no intrusiva que se utiliza para medir velocidades instantáneas. Este método prevé el análisis Euleriano del desplazamiento de los trazadores debido a que, se obtiene los campos de velocidades del flujo comparando el desplazamiento promedio de patrones o grupos de partículas en un sector definido de una imagen (Palatano A. , 2017). El procesamiento de la información se realiza utilizando los programas computacionales de Rectification of Image Velocity Results (RIVeR) y Particle Image Velocimetry (PIVlab) para la caracterización del fluido (Fredy Sandro, Shirley Pamela, & Ferrer, 2020).

En Australia, la técnica LSPIV fue empleada por Jones. para analizar las variaciones en las mediciones de velocidad superficial y las dinámicas de flujo en el río Murray-Darling durante un período de sequía. De acuerdo con el artículo de Jones, el LSPIV es adecuado para monitorear las variaciones en la velocidad superficial y la distribución de remolinas en un río afectado por un flujo bajo (Jones, A., Williams, D., & Brown, C., 2023).

En América del Sur, en 2021, Castro utilizó LSPIV en el río Santa, Perú, evaluando la dinámica de flujo en la interfaz fluvial de los ríos de montaña. En el trabajo de Castro se presentó cómo el LSPIV puede proporcionar datos precisos sobre líneas de corriente y la interacción de flujos en el contexto de la alta montaña, presentando una mejor comprensión de los procesos hidrodinámicos en dicha área geográfica. (Castro, R., Gómez, J., & Martínez, A., 2021)

Otro estudio realizado en el área del delta del río Paraná en 2023, aplicó LSPIV para investigar la dinámica del flujo en un sistema de canales y humedales. El trabajo de Pérez et al. mostró cómo LSPIV puede capturar la complejidad de los flujos en zonas de deltas, en donde las interacciones de las corrientes y los cambios en la geometría del cauce crean patrones complejos. Este estudio contribuyó a la mejora de la comprensión de los procesos hidrodinámicos en ecosistemas de humedales y deltas. (Pérez, V., Castro, A., & Bravo, J., 2023)

La caracterización experimental en el punto de confluencia del río Tarqui y Yanuncay mediante el método LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) o velocimetría con imágenes de partículas a gran escala), permitirá analizar las características hidráulicas y cuantificará lo que sucede en las confluencias de ríos. Este método utiliza imágenes para medir la velocidad de flujo de un río, lo que proporciona datos valiosos para comprender el comportamiento de los ríos y sus efectos en el entorno circundante (Botelli, Guillén, García, Patalano, & Chalabe, 2020).

1.2. Formulación del problema

La medición de fluidos en zonas de difícil acceso, lugares donde el cauce va muy rápido y puede causar daños al personal y/o equipos, y cuando los ríos presentan grandes crecidas no se puede realizar el control de algunos parámetros hidrológicos mediante los métodos tradicionales. Dentro del territorio nacional no se tienen aplicaciones de métodos diferentes de medición para estos casos, por lo que implementar un nuevo método (LSPIV) que ha funcionado con gran versatilidad en otros países sería de gran ayuda al campo investigativo nacional para innovar los métodos tradicionales (Massó, 2018).

Aplicando el método LSPIV con ayuda de una aeronave no tripulada (RPAS) o drones se puede llegar a obtener información de la velocidad superficial de los cauces y

monitoreo de caudales cuando las circunstancias del sitio o climáticas son desfavorables. Debido al alcance de este método innovador se llegaría a tener grandes controles de las crecidas al poder monitorear su comportamiento en tiempo real y sin necesidad de correr riesgos al momento de las mediciones. Por otra parte, con la ayuda de un software (RIVeR) que tiene como objetivo procesar la caracterización de la superficie del agua a gran escala, como campos de velocidad o trayectorias individuales de trazadores flotantes, los datos analizados serían aún más precisos y confiables para promover medidas de control de las crecidas de los cauces (Massó, 2018).

1.3. Delimitación del Problema

Al tener un control de las velocidades superficiales de los cauces (Rio Tarqui y Yanuncay) en condiciones normales y desfavorables al aplicar el método LSPIV por lapsos de tiempo prolongados se puede llegar a tener datos reales de las mediciones directas con un alto grado de confianza en la información obtenida. Además, se puede conocer los daños que llegan a causar las crecidas en las fronteras ribereñas o zonas habitables cercanas a los ríos se acoplaría a este método la introducción del Software RIVeR que utiliza los resultados de desplazamiento de la velocimetría de imagen como PIV implementado a gran escala (Palatano, García, & Rodríguez, 2017), y con ello se permitirá caracterizar la velocidad de flujos superficial en condiciones hidrológicamente extremas extrayendo información importante para el diseño sustentable de medidas tanto estructurales como no estructurales para el aprovechamiento de los recursos hídricos de la zona y mitigar las grandes amenazas hídricas de la actualidad (Palatano, 2017)

1.4. Justificación

El LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry) es una metodología de caracterización que podría ayudar a resolver varios problemas relacionados con la gestión de recursos hídricos y la prevención de desastres naturales en esa área. Bajo este aspecto, los

métodos de medición no han evolucionado a lo largo de los años con el fin de facilitar la toma de datos de las velocidades superficiales y caudales en condiciones desfavorables (crecidas y estiajes) (Rosas & Tejada, 2020). Los problemas que esta técnica permiten resolver incluyen:

- Monitoreo de inundaciones y estiajes
- Estudios ambientales
- Gestión de recursos hídricos
- Planificación urbana y de infraestructura

1.5. Objetivos.

1.5.1 Objetivo General.

- Caracterizar los campos de velocidad superficiales en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay mediante la aplicación de técnicas experimentales basadas en LSPIV, molinetes y modelos numéricos hidrodinámicos.

1.5.2 Objetivos Específicos.

- Aplicar métodos experimentales para obtener campos de velocidad superficial en diversos eventos de flujo de los ríos Tarqui y Yanuncay.
- Verificar la versatilidad de la metodología LSPIV en los ríos de montaña para eventos de crecida y estiajes.
- Validar modelos numéricos bidimensionales con campos de velocidad superficial obtenidos en la caracterización de campo con la técnica LSPIV.

CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

En el presente trabajo se pondrá en práctica una nueva técnica de medición de velocidades en los ríos Tarqui y Yanuncay los cuales pasan por la ciudad de Cuenca. El método LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry), sirve para monitorear diversos flujos superficiales en cauces naturales de forma no intrusiva. Esta técnica analiza el desplazamiento de las partículas que flotan sembradas en el flujo, o a su vez determinar los patrones que existen sobre la superficie del agua los cuales son generados por la turbulencia. Esta técnica ha permitido que se pueda realizar la caracterización de flujos complejos y ha tenido avances notables en el campo de la mecánica de fluidos e hidráulica. Por esta razón investigadores de la Universidad Nacional de Córdoba están trabajando en la mejora de programas computacionales que permitan la aplicación del método LSPIV (Botelli, Guillén, García, Patalano, & Chalabe, 2020).

Esta técnica experimental utilizara un sistema aéreo no tripulado a lo largo del río para capturar imágenes de la superficie del agua. Luego, se procesan estas imágenes para rastrear el movimiento de partículas en el agua, lo que permite calcular la velocidad del flujo (Botelli, Guillén, García, Patalano, & Chalabe, 2020). Esta información puede utilizarse para analizar la dinámica del flujo de agua, la distribución de sedimentos y otros aspectos relacionados con la hidráulica de la zona de confluencia entre el río Tarqui y el río Yanuncay.

La caracterización en el punto de confluencia es importante para diversos propósitos, como la gestión de inundaciones, la conservación de ecosistemas acuáticos y la planificación del uso de la tierra en la zona circundante (Palatano, García, & Rodríguez, 2017). Los resultados de este tipo de estudio pueden ayudar a tomar decisiones informadas sobre el manejo de recursos hídricos y la protección del medio ambiente en esta región específica.

2.2. Modelación Numérica Hidráulica fluvial

El cómo se comportan los cauces naturales de agua es un tema relevante dentro de la ingeniería civil, la misma nos permite saber el riesgo de inundaciones, daños que pueda causar el cauce, a la postre nos permite tomar acciones para prevenir dichos daños o incidentes, debido a esto las modelaciones numéricas son herramientas computacionales que resuelven las ecuaciones matemáticas en donde se describe el flujo de agua en ríos o cauces. Para conocer la evolución espacial y temporal de las variables hidráulicas del flujo de agua sobre la superficie, se han desarrollado modelos numéricos ya sea académicos, libres o comerciales que permiten representar la realidad de forma simplificada empleando ecuaciones con aproximación en 1D, 2D e incluso en 3D, empleando esquemas en diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos para su resolución.

Este enfoque está basado en las ecuaciones de Navier-Stokes las mismas describen el movimiento de los fluidos de una forma general, la modificación o implicación a estas, es la ecuación de Saint- Venant, estas ecuaciones son más próximas para la aplicación de cauces naturales.

La ecuación de cantidad de movimiento de Saint-Venant

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gAh \right) = gA(S_o - S_f)$$

Donde:

- g ; Gravedad
- h ; Profundidad del flujo
- S_o ; La pendiente del río
- S_f ; Pendiente de la energía

Estas ecuaciones se consideran la variable espacial y temporal del cauce, permitiendo de esta manera poder modelar los diferentes eventos de los cauces. (García et al., 2010).

Las ecuaciones para el modelamiento bidimensional de Saint-Venant, que radica en un sistema hiperbólico de 3 incógnitas, Estas ecuaciones en su forma conservativa se expresan como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hUx)}{\partial x} + \frac{\partial(hUy)}{\partial y} = Ms$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hUx) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_x^2) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial zb}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} - gh\frac{\partial h}{\partial x} + 2\Omega\text{sen}\lambda Uy + \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xx}^e) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{xy}^e) + Mx$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hUy) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_y^2) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) = -gh\frac{\partial zb}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} - gh\frac{\partial h}{\partial y} + 2\Omega\text{sen}\lambda Ux + \frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy}^e) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy}^e) + My$$

Donde

U_x y U_y son las velocidades promediadas en profundidad.

τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento.

τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo

ρ es la densidad del agua

Ω es la velocidad angular de la tierra,

λ es la latitud del punto considerado

h representa la altura de agua

M_y , M_s , M_x son los términos fuente/sumidero de masa y momento, a través de los cuales se realiza la modelización de precipitación, infiltración y sumideros.

τ_{yy}^e , τ_{xx}^e y τ_{xy}^e son las tensiones efectivas horizontales

2.3. Métodos experimentales en hidráulica fluvial

Los métodos experimentales en la hidráulica fluvial priorizan en técnicas de laboratorio y técnicas de campo de esta forma se logra comprender y gestionar modelos digitales. Ambos métodos son esenciales y complementarios; brindan observaciones y datos esenciales para el estudio de los ríos y otros cuerpos de agua.

Los métodos de laboratorio se fundamentan en la elaboración de modelos físicos a escala reducida de un tramo de río o sistema fluvial. Los investigadores pueden observar fenómenos particulares, como la sedimentación, la erosión y la dinámica del flujo de agua, gracias a estos modelos que les permiten controlar y manipular de manera precisa las condiciones experimentales. Los modelos de laboratorio se utilizan para realizar experimentos que, debido a su complejidad o escala, serían difíciles o imposibles de realizar en el campo (Chanson, 2015).

Es posible realizar experimentos en laboratorio en flumes, canales creados para investigar el comportamiento de los sedimentos y el agua en condiciones controladas. Para validar y mejorar los modelos numéricos y teóricos, estos estudios brindan información detallada. Adicionalmente, los modelos físicos brindan una comprensión más fácil de la dinámica fluvial al permitir la visualización de procesos hidráulicos en tres dimensiones. (Chanson, 2015).

Por otra parte, la recolección de datos en el ambiente natural del río o cuerpo de agua es parte de los métodos de campo. Los investigadores pueden obtener una comprensión precisa y realista de las condiciones hidráulicas y geomorfológicas gracias a este método. La velocidad del agua, el caudal, la topografía del lecho del río y la composición del sedimento son mediciones comunes en estudios de campo. Para calibrar modelos numéricos y físicos y comprender los procesos naturales, estos datos son esenciales. (Hicks et al., 2013).

El monitoreo continuo, que puede llevarse a cabo a través de estaciones de medición equipadas con sensores que registran datos en tiempo real, es una parte crucial de los estudios de campo. Esto permite a los investigadores observar cómo cambian las condiciones del río con el tiempo debido a intervenciones humanas o a cambios climáticos. Para ofrecer una imagen completa del ecosistema fluvial, los estudios de campo también pueden incluir métodos de muestreo de sedimentos y análisis de calidad del agua. (Hicks et al., 2013).

2.4. Descripción de las técnicas PIV Y PTV

La técnica PIV (en inglés "Particle Image Velocimetry" o en español "Particle Image Velocimetry") tiene un principio de funcionamiento simple e implica la identificación y cuantificación del movimiento de un trazador (el propio trazador) en el flujo. El principio que también dio origen a la velocidad de seguimiento de partículas del PTV ("Particle Tracking Velocimetry" conocida en español como velocidad de seguimiento de partículas). (Andrade, 2015)

Las técnicas mencionadas no son intrusivas, por ende, permiten realizar las mediciones sin perturbar el flujo calculando de esta forma la velocidad del cauce, la diferencia radica en que la técnica del PTV la velocidad corresponde a la partícula dada, en cambio la técnica PIV la velocidad es una medida estadística de la región del fluido. El material que se necesita para implementar las técnicas; cámara digital, trazador, dispositivo de emisión laser de alta potencia y un lente semicilíndrico. (Andrade, 2015)

La lente semicilíndrica transforma el haz del dispositivo laser en un plano que ilumina el área de medición. Esto sirve como iluminación para la cámara digital, que capta la reflexión del láser sobre los trazadores dentro del plano iluminado del flujo. Para calcular los caudales en sistemas fluviales en situaciones hidrológicas extremas, esta configuración clásica no puede ser utilizada en el terreno. (Andrade, 2015)

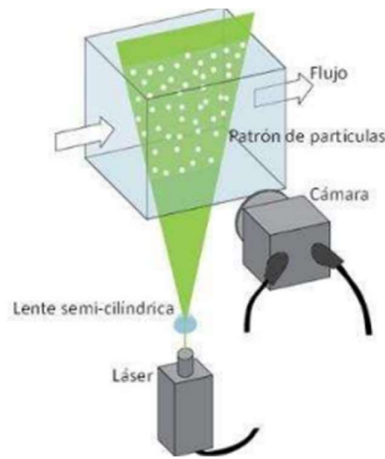


Figura 1 Principio de funcionamiento de PIV en su forma clásica

Los factores que condicionan las técnicas son: densidad y tamaño de las partículas, resolución de las imágenes, intervalo de tiempo entre cada par de imágenes (Andrade, 2015)

-Densidad y tamaño de las partículas: Las partículas deben tener una densidad similar a la del agua si se desea que se distribuyan uniformemente en profundidad para medir velocidades en un plano que cubre toda la columna de agua. Para medir la velocidad superficial, la densidad de las partículas trazadoras debe ser menor pero cercana a la del fluido. Es recomendable que la partícula tenga un tamaño de entre tres y cuatro píxeles de la imagen para poder captarla correctamente.

-Resolución de las imágenes: Si las partículas son demasiado pequeñas, será necesaria una cámara de alta resolución, lo que resultará en un mayor tiempo de procesamiento y una mayor capacidad de almacenamiento.

- Intervalo de tiempo entre cada par de imágenes: dependerá de la velocidad del flujo, ya que el campo de velocidad no se puede calcular si el intervalo entre imágenes es extenso porque no habrá partículas comunes entre dos imágenes consecutivas.

Para experimentos bien controlados en laboratorios, donde todas las fuentes de luz son relativamente constantes durante las mediciones, se desarrollaron inicialmente los algoritmos

utilizados en la implementación de PTV y PIV. Una cámara se emplea para captar el movimiento de las partículas trazadoras y un láser ilumina la zona de interés en la mayoría de las aplicaciones de laboratorio. Un alto contraste entre la luz dispersada por las partículas y el fondo es una característica típica de las imágenes debido a que el sensor se expone a la luz durante poco tiempo. Siempre es más rápido procesar imágenes en escala de grises que imágenes en color con capas de rojo, verde y azul (RGB) desde un punto de vista computacional. Las imágenes en color se registran en la mayoría de las cámaras comerciales que se utilizan para implementar LSPIV o LSPTV a gran escala. (Patalano, 2017)

Para la recopilación y análisis de datos con velocimetría de imágenes (PIV), el modelo PIVlab procesa la información a partir de la definición de la región de interés, procesamiento de la imagen, detección del centroide de las partículas y correspondencia temporal de las partículas

-Definición de la región de interés

La cámara registra una subárea del área total llamada Región de Interés (ROI). Para disminuir los costos computacionales de procesamiento, el ROI debe establecerse para cada cuadro que se analizará y puede ser reducido al mínimo. (Patalano, 2017)

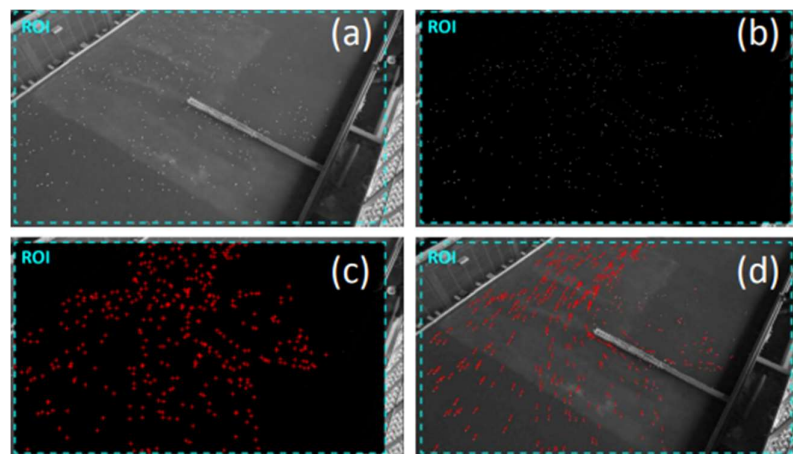


Figura 2 ROI tomado de (Fuente (Patalano, 2017))

En donde se presenta:

- a) Las imágenes se convierten en escala a grises, el recuadro de líneas representa la región de interés.
- b) Se observan las partículas en movimiento
- c) Detección de centroides de partículas en ROI
- d) Vectores de velocidad instantánea.

-Preprocesamiento de la imagen

Se tiene presente que la medición a gran escala tiene más ruido que las mediciones realizadas en laboratorio, por ende, se debe realizar un sesgo y eliminación de las partículas estancadas.

-Detección del centroide de las partículas

El patrón de brillo de las partículas representa una distribución gaussiana en 2 dimensiones, El método de correlación de la máscara de partículas se utiliza para detectar centroides de partículas; una imagen de partículas es referenciada por los usuarios, a través de la forma de la máscara de la partícula en donde se distingue el radio de la partícula y el umbral de brillo. Cada imagen es escaneada y se detecta cuando la correlación entre la imagen de la partícula de referencia y un área de la imagen actual es mayor valor definido por el usuario. (Patalano, 2017)

-Correspondencia temporal de la partícula

El algoritmo de correlación cruzada se caracteriza por tener una rápida ejecución. El desplazamiento asociado con una partícula se encuentra utilizado el coeficiente correlación cruzada más alto, obtenido después de comparar una matriz de intensidad de referencia.

La matriz de referencia se extrae de una ventana de interrogación en el cuadro 1 el cual está centrado en las partículas candidatas “i” que está en la posición \vec{X}_i . El tamaño de las ventanas de interrogación lw es el determinado por el usuario y se supone que el desplazamiento de las partículas está dentro de esta distancia. Las submatrices están

centradas en cada una de las partículas candidatas $j(i)$ cuya posición son $\vec{y}j(i)$. El desplazamiento asociado $\vec{U}i$ de una partícula “i” está determinado por (Patalano, 2017):

$$\vec{U} = (\vec{y}j(i) - \vec{x}i) / \Delta t$$

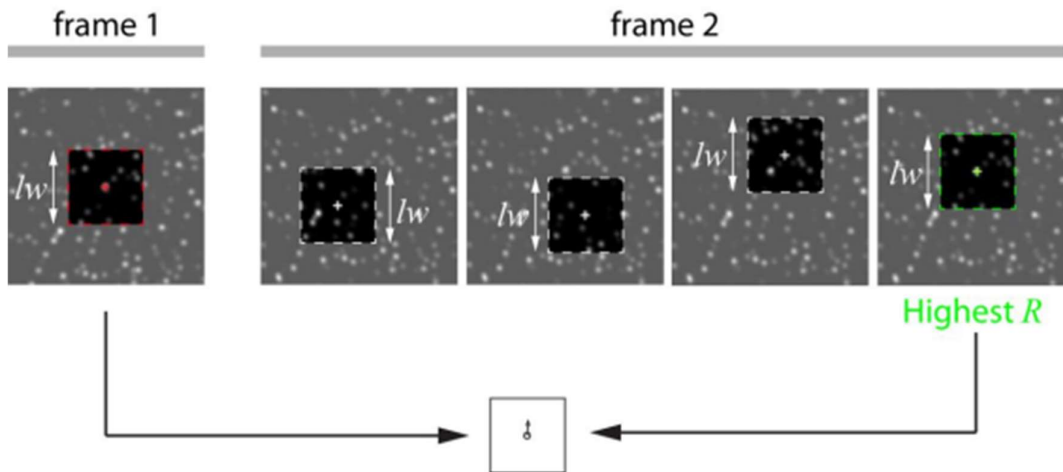


Figura 3 Fundamentos de correlación cruzada tomado de (Patalano, 2017)

2.4.1 Descripción de LSPIV

Desde la década de 1980, muchos investigadores intentaron adaptar la técnica PIV para caracterizar flujos de mayores escalas a los presentes en laboratorio, incluyendo mediciones de campo, apareciendo la técnica Velocimetría por Imágenes de Partículas a Gran Escala (Palatano, García, & Scacchi, 2015).

La técnica LSPIV es una moderna técnica experimental con gran potencial para el monitoreo de diversos flujos superficiales en cauces naturales de manera remota (no intrusiva). Con esta técnica LSPIV se puede analizar el desplazamiento de las partículas que flotan sembradas en el flujo o determinados patrones existentes sobre la superficie del agua, generados por la turbulencia. El desarrollo de esta técnica en los últimos años ha permitido su aplicación en la caracterización de flujos complejos logrando un avance notable en el campo de la mecánica de los fluidos e hidráulica (Quinn & Bruce, 2018).

LSPIV permite la aplicación de la técnica a un entorno natural cuyas condiciones no estén controladas ya que, en el laboratorio, podemos regular el tipo de iluminación y la siembra de los trazadores de forma óptima mientras que, en la naturaleza, la iluminación es la del sol, y depende de las condiciones meteorológicas y de la hora del ensayo. La superficie de los ríos suele ser marcada por sombras o reflejos.

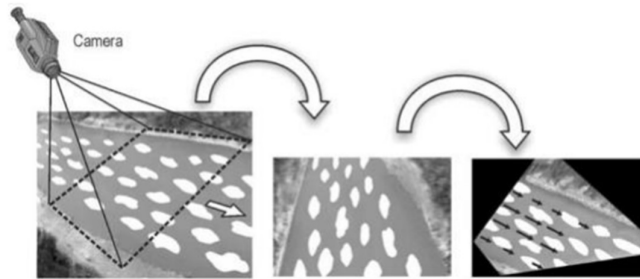


Figura 4 Representación del proceso de orto rectificación, tomado de (Andrade, 2015)

LSPIV trabaja con el software RIVeR el propósito de este programa es conectar el sistema de coordenadas del mundo real con su proyección 2D en el plano de la imagen. Es necesario establecer claramente cuatro puntos de control o de referencia para corregir los resultados del procesamiento de la imagen.

a) Descripción del Software RIVeR.

A partir de 2013, RIVeR es una aplicación genuina creada en el Centro de Estudios y Tecnología del Agua (CETA) de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. El propósito de RIVeR es brindar una caracterización experimental de los flujos de agua a gran escala en canales artificiales, ríos - modelos físicos hidráulicos. La estimación de los caudales y la determinación de las velocidades de flujo y las trayectorias forman parte de la caracterización mencionada. RIVeR se ha creado como una adición a los sistemas PIVlab y PTVlab de análisis disponibles para lograr un análisis a gran escala efectivo. (Palatano, Antoine; García, Carlos; Rodríguez, Andrés, 2017)

RIVeR presenta sus características que son:

- Separa la adquisición del video, el procedimiento de imágenes y las tareas de rectificación para que el sistema sea independiente de la cámara y la técnica de procesamiento de datos
- Uso de herramientas computacionales actualizadas y gratuitas
- Desarrollo de una interfaz didáctica sencilla, fácil de usar

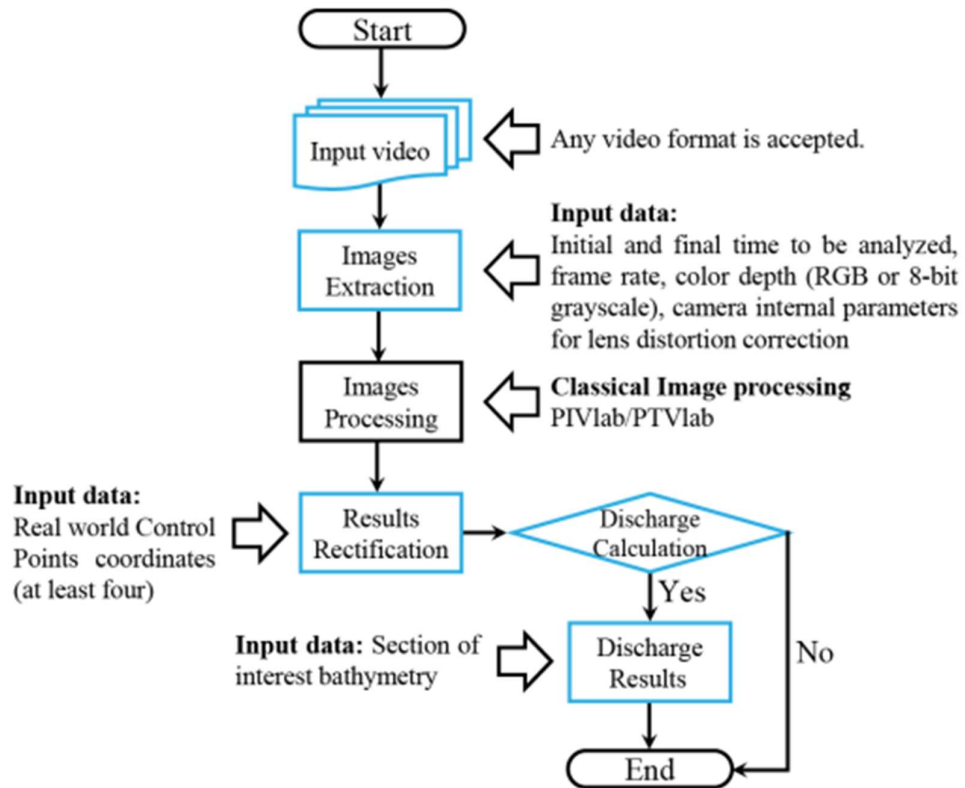


Figura 5 Diagrama de flujo del sistema de análisis de gran escala tomado de Fuente: (Patalano, 2017)

El sistema de análisis se maneja con extracción de imágenes, procesamiento de imágenes, rectificación de resultados y cálculo de caudal.

-Módulo de extracción de imágenes.

Las imágenes son registradas en escala de 8 bits, estas son extraídas de un video a través de la interfaz de usuario. Para la extracción e imágenes RIVeR contiene el paquete gratuito ffmpeg que contiene diferentes bibliotecas y sus programadores afirman que

soportan formatos antiguos y actuales. La frecuencia de cuadros del video puede ser mostrada, en el caso que sea necesario, considerando que la frecuencia de muestreo es demasiado alta para el rango de velocidad de flujo que se analizara, también se puede aplicar una corrección de lente opcional si la cámara es calibrada previamente para obtener los parámetros de ajuste. La matriz que trabaja en función es descrita a continuación. (Patalano, 2017)

$$\begin{pmatrix} xp \\ yp \\ 1 \end{pmatrix} = KK \begin{pmatrix} xp \\ yp \\ 1 \end{pmatrix}$$

Donde

$$KK = \begin{pmatrix} fcx & alpha0 & ccx \\ 0 & fcy & ccy \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

En donde explica, X_p, Y_p y X_d, Y_d representan las coordenadas de un punto en el sistema de coordenadas distorsionada y no distorsionado, respectivamente fcx y fcy Fcx son las longitud focal en las direcciones x y y, ccx y ccy representan las coordenadas del centro de la imagen, Alpha es el coeficiente de asimetría que define el ángulo de los ejes x y y, kk se obtiene de varias imágenes registradas de un tablero de dimensiones conocidas con la matriz de calibración de cámara. (Patalano, 2017)

-Módulo de procesamiento de imágenes.

RIVeR explica un método novedoso para el procesamiento a gran escala. Para procesar las imágenes previamente extraídas, se emplean PIVlab o PTVlab con algoritmos de última generación que incluyen preprocesamiento y mejora de imagen. La información deseada, así como la cantidad y el tipo de trazadores empleados en la superficie del agua, determinarán si se empleará el análisis PIV o PTV para la serie de imágenes. (Patalano, 2017)

Si la determinación del campo de velocidad media es el propósito principal del análisis y si los trazadores naturales o trazadores agregados al flujo se distribuyen densamente y homogéneamente sobre la superficie del agua, el PIV se emplea en un marco euleriano. Si, por el contrario, se requieren trayectorias individuales se debe utilizar el PTV en un marco de análisis lagrangiano. (Palatano, Antoine; García, Carlos; Rodríguez, Andrés, 2017)

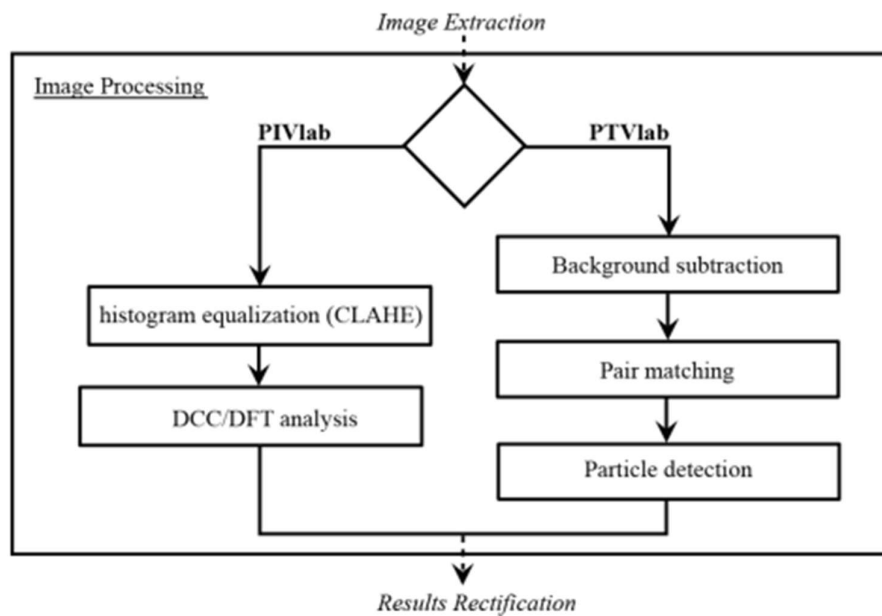


Figura 6 Diagrama de flujo de las sub secuencias de procesamiento clásico de imágenes con PIVlab y PTVlab tomado de

Fuente (Patalano, 2017)

-Módulo de rectificación de resultados.

En este apartado relaciona el sistema de coordenadas del mundo real con su proyección bidimensional en las imágenes. Se supone que en la superficie de agua del área de interés analizada en el paso anterior presenta el plano que será rectificado, el plano no tiene que ser horizontal por la rugosidad superficial. (Patalano, 2017)

La matriz C, que hace referencia a los parámetros de la cámara como la posición y rotación de la misma, que depende únicamente de la cámara, como la distancia focal, el zoom los pixeles y la escala, esto nos presenta el sistema homogéneo de la imagen (Corke, 2011)

$$\begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Xr \\ Yr \\ Zr \\ 1 \end{pmatrix}$$

Donde

$(\tilde{x} \tilde{y} \tilde{z})$ son componentes de coordenadas homogéneas de la imagen X Y Z son las coordenadas cartesianas del mundo, estas se calculan como;

$$X = \tilde{x}/\tilde{z} \quad y \quad Y = y/\tilde{z}$$

Los componentes de Z pueden ser ignorados de la matriz de cámara y esta se reduce a la matriz homogénea H dada por.

$$\begin{pmatrix} Xp \\ Yp \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Xr \\ Yr \\ 1 \end{pmatrix}$$

El valor izquierdo representa las coordenadas del mundo real, el vector derecho representa la proyección de la imagen en coordenadas del mundo real, y H es la matriz de homogeneidad, de esta forma si la matriz H tiene 10 incógnitas puede ser resueltas conociendo las coordenadas Xr y Yr, de solo cuatro puntos de control. La resolución de la matriz homogénea H, en lugar de la matriz de cámara completa simplifica las mediciones porque se pueden tomar con una cinta métrica, mientras que instrumental más completa y complejo es requerido para tomar medidas en el espacio tridimensional, los resultados de PIVlab y PTVlab son desplazamientos que se expresan como (Patalano, 2017);

$$\vec{dt} = X_{pi}^e - X_{pi}^o$$

Donde:

\vec{dt} es el vector desplazamiento, X_{pi}^e y X_{pi}^o son coordenadas proyectadas del origen y del final del vector. Ambas coordenadas se rectifican en coordenadas del mundo real como;

$$\vec{Dt} = X_{ri}^e - X_{ri}^o$$

Donde;

\vec{Dt} es el vector desplazamiento rectificado, X_{ri}^e y X_{ri}^o son coordenadas proyectadas del origen y del final del vector, y la velocidad se calcula como;

$$\vec{Vt} = \vec{Dt}/\Delta t$$

Donde

Δt es el paso de tiempo entre las imágenes extraídas elegidas en el módulo de extracción de imágenes cuando se elige la frecuencia de muestreo de los videos

-Módulo de cálculo de caudales

Utilizando el campo de velocidad superficial calculado en el módulo anterior, se ha creado el módulo de cálculo de caudales para estimar los caudales en varias secciones transversales de un río o canal. El campo de velocidad media contiene el perfil de velocidad horizontal. El área de interés debe ser cubierta por los datos del perfil. La batimetría de cada sección se interpolan los datos desde los datos obtenidos en el campo de esta forma se preparan los cálculos de caudal, por otra parte, la altura de la superficie libre debe incluirse como un dato de entrada adicional. El caudal se calcula utilizando un método de sección media, este consiste en dividir la sección transversal en N verticales adyacentes y una distancia igual d. (Patalano, 2017)

La distribución horizontal de la velocidad se distribuye con homogeneidad, se utiliza el método de la sección media para calcular la descarga total, por ende, Q se calcula como la suma de los productos de las profundidades mediadas en dos vértices adyacentes, por la medida de la velocidad siendo esta de superficie normal. (Patalano, 2017)

$$Q_s = \sum_{i=1}^{N-1} d \cdot (h_i + h_{i+1}/2) \cdot (V_{si} + V_{si+1}/2)$$

El caudal Q_s no es exactamente el caudal real, debido a que se calcula con el campo de velocidad superficial, suponiendo que el perfil de velocidad vertical sigue la ley logarítmica, la relación teoría entre la velocidad media del flujo y la velocidad superficial es $\alpha=0.85$. Este valor se utiliza para flujos uniformes de rugosidad promedio. De esta manera la ecuación final queda; (Patalano, 2017)

$$Q = \alpha * Q_s$$

El valor de α tiene un rango de 0.8 a 1

b) Descripción y uso del Molinete

El molinete es un instrumento utilizado para medir la velocidad del agua, el mismo consta con una serie de aspas que giran en torno al eje horizontal, el cual nos da como dato el número de vueltas o revoluciones en un determinado tiempo. (Fernandez, 2019)

La composición del molinete es; hélice, interruptor mecánico eléctrico, un sistema eléctrico digital y un sistema de sujeción. También se debe tener presente que cada molinete tiene su propio sistema de calibración, de esta manera se encuentra la fórmula para determinar la velocidad de un cauce. (Fernandez, 2019)

En el uso del molinete debe estar de manera vertical en el flujo del agua, a la altura que se determine según el tirante, este es sostenido mediante un tubo de aluminio, la

velocidad se determina en diferentes puntos dentro de la misma sección transversal, la velocidad se obtiene mediante la curva de calibración en donde se relaciona las revoluciones por cada segunda contra la velocidad (Fernandez, 2019).

El principio de medición se basa en la Normativa ISO-748, en donde se especifica las recomendaciones pertinentes para mediciones de flujos en canales abiertos utilizando correntímetros o flotadores. En esta normativa se puede destacar los aspectos más relevantes para cumplir con la metodología de este trabajo investigativo.

La selección del sitio debe ser lo más cercano a:

- Lechos y márgenes de canales estables y definidos en toda la etapa de la sección a analizar,
- Evitarse sitios con presencia de vórtices, sitios de estancamiento y zonas con presencia de flujos convergentes y divergentes,
- La sección de medición debe ser visible en todo su ancho y no estar restringida en la visual por árboles o maleza,
- La profundidad del flujo debe ser suficiente en toda su etapa de medición para que el equipo sea sumergido correctamente,

En cuanto a la demarcación del sitio se debe tomar en cuenta que el nivel del flujo se mantenga constante en las etapas de medición, la posición de la sección transversal ortogonal a la dirección del flujo, y ubicar puntos de control al inicio y al final de la sección.

Para medir el área de la sección transversal se tomará en cuenta el número suficiente de punto que idealicen la forma natural del lecho del río, la distancia entre cada punto de toma (punto vertical) será de forma horizontal. La profundidad se tomará medida mediante varillas o cables de sondeo regido bajo las correcciones de inmersión como lo establece esta normativa internacional. El molinete con elementos giratorios cumplirá con las normativas

ISO 2537 e ISO 3455, y utilizados dentro de sus rangos de velocidades y calibraciones mínimas (ninguno de los elementos giratorios debe exponerse fuera del agua).

- **Tipos de molinetes**

Existen 2 tipos de molinetes; el molinete vertical de cazoletas y de eje horizontal que es el molinete de hélice. En ambos casos el molinete tiene un interruptora en su rotor, en mismo debido a cada giro efectúa un pulso eléctrico, estos pulsos pueden ser visualizados mediante un contador eléctrico que se enfoca en las pulsaciones por cada revolución del rotor en un tiempo determinado.

Molinete de cazoletas, de eje vertical:

Este tipo de molinete operan a velocidades más bajas, las aspas presentan protecciones contra el agua con demasiado residuo sólido también el rotor es reparable sin afectar a las calibraciones, el rotor vertical se aprecia en la Figura 7. (Fernandez, 2019)



Figura 7 Molinete eje vertical, cazoleta. (Fernandez, 2019)

Molinete de hélice, de eje horizontal.

El molinete es un instrumento que tiene una hélice (Figura 8), la cual gira al introducirla en una corriente de agua, la velocidad de rotación es proporcional a la velocidad de la corriente. Existe simetría con el flujo por ende el rotor perjudica el flujo. Debido a la forma en que se coloca el rotor es menos probable que se puede enredar con algún tipo de desecho o materia orgánica que arrastre la corriente. (Fernandez, 2019).

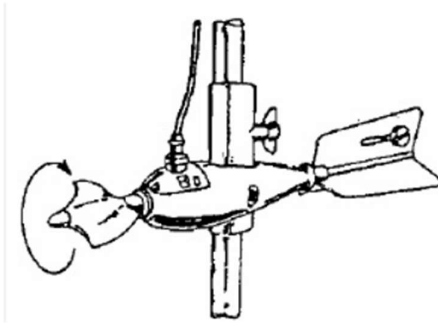


Figura 8 Molinete eje horizontal, hélice. (Fuente; propia)

c) Sistema de sujeción cable y contrapeso.

Este sistema ayuda que el molinete se mantenga paralelo al flujo, los mismo pueden variar según la necesidad (Fernandez, 2019), las partes se muestran en la figura 9.

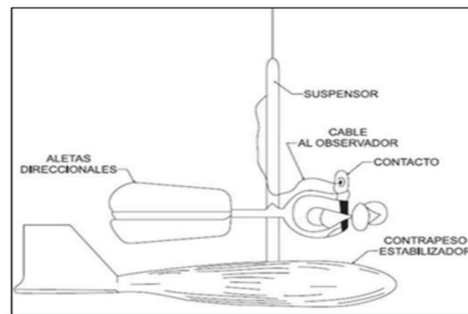


Figura 9 Molinete cable y contrapeso. Tomado de (Fernandez, 2019)

2.4.2 Medición de la velocidad usando el molinete

El molinete es una herramienta que mide la velocidad en un solo punto, por lo tanto, se llevan a cabo múltiples mediciones en más de un punto; estos puntos o verticales de observación deben ser ubicados para que se pueda definir adecuadamente la variación en la elevación del lecho de la corriente y la variación en la velocidad horizontal. Como resultado, el ancho del cauce no debe ser mayor de $1/20$ de la distancia entre dos verticales sucesivas, y la velocidad entre estos dos verticales no debe ser mayor del 10% de la velocidad máxima.

Para calcular el ancho del cauce y la distancia entre las verticales, se deben realizar mediciones a partir de un punto fijo de referencia, que normalmente se encuentra en el mismo plano de la sección transversal.

a) Determinación de la velocidad de la corriente

Se determina mediante la siguiente ecuación

$$V = K * N + A$$

Donde;

V es la velocidad de la corriente

K es el paso hidráulico de la hélice

N revoluciones de la hélice por segundo

A constante del molinete en m/s

b) Procedimiento de medición

Las observaciones de velocidad normalmente se realizan al mismo tiempo que las mediciones de profundidad. Este método se utilizará especialmente en el caso de lechos inestables. Sin embargo, cuando las dos mediciones se realicen en momentos diferentes, las observaciones de la velocidad se tomarán en un número suficiente de lugares y la distancia horizontal. Al juzgar el número específico n de verticales en canales pequeños (< 5 m) que se definirán con el fin de determinar el flujo en una ubicación particular, se aplicarán los siguientes criterios. Estos criterios serán el requisito mínimo y sólo las limitaciones prácticas de tiempo, costos o condiciones del sitio deberían resultar en una reducción de estos números. (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2007)

Ancho del canal <0.5 m n= 5 a 6

Ancho del canal > 0.5m 5 < 1 m n= 6 a 7

Según la norma ISO 748:2007 se deben seguir los siguientes criterios

Ancho del canal $> 1\text{m}$ y $< 3\text{m}$ $n = 7$ a 12

Ancho del canal $> 3\text{m}$ y $< 5\text{m}$ $n = 13$ a 16

Ancho del canal $> 5\text{m}$ $n > 22$

“Para anchos de cauce > 5 m, el número de puntos verticales se elegirá de manera que el caudal en cada tramo sea inferior al 5 % de su total y que no supere el 10 %. En todos los casos, las mediciones de profundidad realizadas en la orilla del agua son adicionales a las anteriores. La primera y el último punto de la vertical deberán estar lo más próximo al borde del agua “ (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

“Se recomienda además que la ubicación de los puntos verticales se seleccione después de un estudio transversal previo. La velocidad en cada punto seleccionado se observará exponiendo el molinete durante un mínimo de 30 segundos. Cuando la velocidad esté sujeta a pulsaciones periódicas superiores a 30 s, el tiempo de exposición debe aumentarse en consecuencia. Ancho del canal > 1 m y < 3 m. (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

El molinete se sujetará en la posición deseada en cada vertical mediante una vara en el caso de canales poco profundos, o se lo debe suspender de un cable o varilla en el caso de canales más profundos. El molinete se mantendrá de manera que no se vea afectado por ninguna perturbación del flujo. El molinete deberá retirarse del agua o sacarse a la superficie a intervalos para un examen visual, normalmente al pasar de una vertical a otra. Los molinetes o indicadores de velocidad con pantalla digital de baja resolución no deberían utilizarse a velocidades bajas, por ejemplo, inferiores a $0,15$ m/s.” (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

c) **Determinación de la velocidad media en vertical.**

La selección del método para poder determinar la velocidad depende de ciertos factores, como: el tiempo disponible, el ancho y la profundidad de la cuenca, condiciones del lecho en la sección de medición en el tramo de aguas arriba, la tasa de variación del nivel y el equipo utilizado. Los mismo se clasifican en: (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

-Método de la distribución de velocidades.

Como se trata de un método, la velocidad se determina por observaciones en varios puntos de cada vertical entre la superficie del agua y el lecho del canal. Debe seleccionarse el número y el espaciado de los puntos de tal manera, que la distribución de la velocidad en cada vertical se defina correctamente con una diferencia en la lectura entre dos puntos adyacentes no superior al 20 % al máximo. (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

Luego, utilizando dichos datos, se trazan gráficamente las observaciones de velocidad a lo largo de cada posición y se descarga el ancho unitario o la velocidad media utilizando un planímetro, un digitalizador u un procedimiento equivalente. La velocidad media a lo largo de la vertical también se puede determinar dividiendo el ancho unitario de descarga por la profundidad. Se expresa de la siguiente manera: (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

$$V_x = V_a \left(\frac{x}{a} \right)^{1/m}$$

Donde:

V_x : Es la velocidad del punto abierto en la zona extrapolada a una distancia x del lecho o lado vertical

Va: Es la velocidad del punto de medición del lado vertical

m: Es un exponente

La velocidad media, \bar{v} (donde la velocidad medida es v_a) se puede calcular directamente a partir de la ecuación:

$$\bar{V} = \left(\frac{m}{m+1} \right) * V_a$$

Generalmente, m se encuentra entre 5 y 7, pero puede variar en un rango más amplio dependiendo de la resistencia hidráulica. El valor $m = 4$ se aplica a lechos gruesos o lados verticales, mientras que $m = 10$ es característico de lechos lisos o lados verticales (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2007)

$$m = \frac{C_{ver}}{\sqrt{g}} \left(\frac{2\sqrt{g}}{\sqrt{g} + C_{ver}} + 0.3 \right)$$

Donde:

g : es la aceleración de la gravedad m/s^2

C_{ver} : Es el coeficiente de Chezy sobre una vertical m/s^2

-Método de puntuación reducida

Aun considerando los métodos menos estrictos, en comparación con los métodos que exploran todo el campo de la velocidad, son frecuentes porque requieren menos tiempo que el método de distribución de velocidades, sin embargo, son igualmente confiables, pero se basan en perfiles de velocidad. Se aconseja que al realizar por primera vez en una sección de medición la precisión del método seleccionado, se compruebe los resultados de las

mediciones preliminares con los obtenidos con el método de distribución de la velocidad.
(COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

1) Método de un punto

Las observaciones de velocidad se realizarán en cada vertical exponiendo el molinete a 0,6 de la profundidad bajo la superficie. El valor observado se tomará como la velocidad media en la vertical (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

2) Método de dos puntos

Las observaciones de velocidad se realizarán en cada vertical exponiendo el molinete a 0,2 y 0,8 de la profundidad bajo la superficie. La media de los dos valores se tomará como velocidad media en la vertical (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

3) Método de tres puntos

Las observaciones de velocidad se realizarán en cada vertical exponiendo el molinete a 0,2, 0,6 y 0,8 de la profundidad bajo la superficie. La medición de 0,6 puede ponderarse y obtenerse la velocidad mediante la siguiente ecuación. (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

$$\bar{V} = 0.25(V_{0.2} + 2V_{0.6} + V_{0.8})$$

4) Método de los cinco puntos

Las mediciones de velocidad se realizan exponiendo el molinete en cada vertical a 0,2, 0,6 y 0,8 de la profundidad debajo de la superficie y lo más cerca posible de la superficie y del lecho. La velocidad media v puede determinarse a partir de la siguiente ecuación.
(COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

$$\bar{V} = 0.1(V_{surface} + 3V_{0.2} + 3V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_{bed})$$

5) Método de los seis puntos

Las observaciones de velocidad se realizan exponiendo el molinete en cada vertical a 0,2, 0,4, 0,6 y 0,8 de la profundidad debajo de la superficie y lo más cerca posible de la superficie y del lecho. Las observaciones de velocidad en cada punto se trazan en forma gráfica y la velocidad media o la descarga unitaria de ancho se determinan con la ayuda de un planímetro. Alternativamente, la velocidad media v se puede encontrar a partir de la siguiente ecuación. (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

$$\bar{V} = 0.1(V_{surface} + 2V_{0.2} + 2V_{0.4} + 2V_{0.6} + 2V_{0.8} + V_{bed})$$

-Método de integración

En este método, el molinete desciende y sube a lo largo de toda la profundidad en cada vertical a un ritmo uniforme. La velocidad a la que se baja o sube el medidor no debe exceder el 5 % de la velocidad media del agua. En ningún caso, esta velocidad no debe exceder los 0.04 m / s. Se deben realizar dos ciclos completos en cada vertical. Si los resultados difieren en más del 10 %, la operación se repite. El método de integración da buenos resultados si el tiempo de medición permitido es suficientemente largo. Durante 60 a 100 s, la tecnología se puede aplicar a superficies más profundas que 1 m, aunque, por lo general, no se utiliza en la profundidad inferior a 1 m. (COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION, 2007)

Con un molinete de tipo hélice, la velocidad promedio se puede leer en la calibración del instrumento, como al número promedio de revoluciones, lo que se deriva, como se ha dicho anteriormente, como el número total de revoluciones dividido por el tiempo total necesario para la medición en esa vertical. No se deben utilizar medidores con más de una ecuación de calibración, ya que se estarían introduciendo incertidumbres. Con un molinete de medición de la velocidad, como un molinete electromagnético, es posible leer una velocidad

promedio en vertical. Esto es posible para leer con un instrumento que mide de manera directa la velocidad. (COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, 2007)

$$qu = \frac{2V_m h_f}{3}$$

Donde:

qu: Es el ancho unitario de descarga por debajo de la zona media

V_m: Es la velocidad media de la parte vertical

h_f: es la profundidad de la zona no medida

De manera similar, el caudal unitario en ancho para cualquier zona no medida cerca de la superficie se obtiene de:

$$qs = \frac{V_s h_s}{0.9}$$

qs: Es el ancho unitario de descarga por encima de la zona media

V_s: Es la velocidad media de la parte vertical

h_s: es la profundidad de la zona no medida

CAPITULO 3. MARCO METODOLÓGICO

La metodología aplicada para el presente trabajo colaborativo fue teórica y experimental, a fin de alcanzar con los objetivos planteados. El trabajo abarca varias etapas, que incluyeron la recolección de muestras, la medición de parámetros in situ y procesamiento de datos en ordenador.

3.1. Área de Estudio

La ubicación de la zona de estudio se encuentra en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, en la Avenida María Moscoso. El área de estudio comprende los ríos Tarqui (aguas arriba AJ rio Yanuncay) y Yanuncay (junto al Parque Botánico) y en la confluencia de dichos ríos (Puente de la Universidad del Azuay).

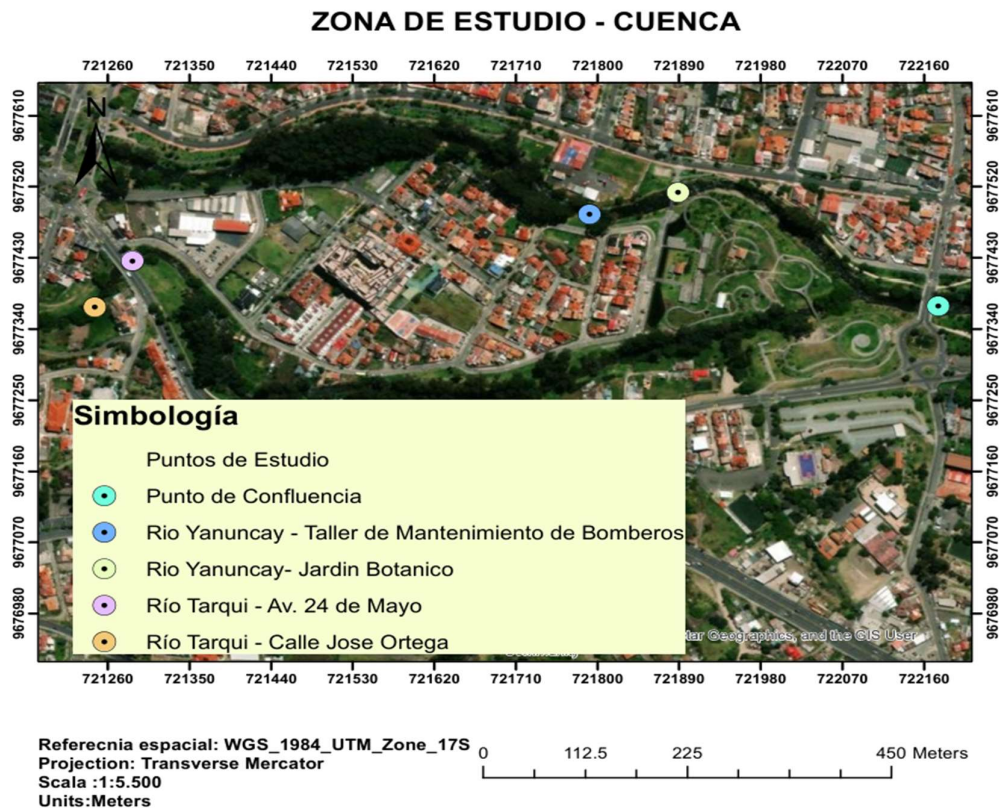


Figura 10 Puntos de Interés de Estudio (Fuente: Elaboración propia)

3.1.1 Principales características del río Tarqui y Yanuncay en el punto de confluencia.

Para el desarrollo del presente trabajo de titulación se obtuvo algunos datos importantes de las cuencas del Río Tarqui y Río Yanuncay.

Dentro del área de estudio el Río Tarqui comprende un área aproximada de 476 km² junto al Río Yanuncay que abarca un área de alrededor de 413 km².

Las subcuencas que alimentan al Río Tarqui son: Portete, Irquis, Cumbe, Zhucay y San Agustín. El río Tarqui nace en las partes montañosas del oeste y suroeste de la cuenca correspondiente, en su parte céntrica fluye a través de un valle hacia el noroeste para finalmente unirse con el río Yanuncay. La subcuenca del río Tarqui pertenece a la cuenca del río Amazonas (Palma & Villagómez, 2012). El terreno en esta área se destina principalmente a la agricultura y la ganadería, con una notable presencia de fincas lecheras que cuentan con amplios campos dedicados al pastoreo y cuidado del ganado bovino.

Por otro lado, el Río Yanuncay se abastece de las subcuencas: Yanuncay AJ Bermejós, Bermejós, Yanuncay AJ Izhcayrrumi, Izhcayrrumi, Soldados, Yanuncay AJ Pucán, Pucán, Yanuncay DJ Minas y Yanuncay AJ Tarqui. El 75% del área de la cuenca del Río Yanuncay corresponde a paramos, 1.62% a la población urbana, 7.34% a pastizales y el resto del área está dividida en: lagunas, vías, degradación, cultivos, bosques de Quínoa, eucalipto, pinos y bosques andinos (Fernández et al., 2011).

	Río Tarqui	Río Yanuncay
Área de la Cuenca (km ²)	476,92	413,9
Caudal pico más alto registrado (m ³ /s)	80,304	197,74
Caudal promedio de la serie (m ³ /s)	3,21	7,75
Pendiente promedio	2,20%	2,50%

Elevación a la salida de la cuenca (msnm)	2520	2560
Elevación del punto más alto de la cuenca (msnm)	3920	4280
Área de la Cuenca (km ²)	476,92	413,9
Caudal pico más alto registrado (m ³ /s)	80,304	197,74

Tabla 1 Características de los ríos en estudio (Vallejo, 2014).

En la tabla 1, se resumen algunas características del terreno de las 2 zonas de estudio. Cabe mencionar que pese a que la subcuenca del río Tarqui tiene mayor extensión territorial que la subcuenca del río Yanuncay la salida de caudal al final es menor. Esto se debe a las diferencias de las subcuencas en: capacidad de infiltración de las masas del suelo, el uso del suelo, expansión de la frontera agrícola/ganadera y zonas urbanas.

3.1.2 Problemas existentes en el área de estudio

La gestión de los recursos hídricos, es primordial para garantizar una adecuada distribución del recurso vital a la población, tanto para el uso doméstico, industrial y comercial. Sin embargo, la mala gestión del suelo, así como una ineficiente gestión urbana ha causado en los últimos años, problemas de inundaciones en épocas de invierno y estiajes severos en los meses correspondiente a la época de verano. Este problema se ve reflejado no solo en la ciudad de Cuenca, sino en la mayoría de zonas del país.

Desde el año 1997 hasta 2017 en la estación Tarqui AJ Yanuncay hubo un registro de 52 eventos con crecidas mayores a 15 m³/s y en el mismo periodo dentro de la estación Yanuncay AJ Tarqui se registraron 53 eventos con caudales mayores a 50 m³/s sin alertas de desbordamientos. En las épocas de sequía los caudales llegan a incrementarse de manera inmediata en cuestión de horas, tiempo insuficiente para gestionar medidas de prevención ante peligros de inundación en zonas cercanas a los afluentes, en Tarqui AJ Yanuncay se

registró un incremento de 0.5 m³/s a 16,19 m³/s en 2 horas y en Yanuncay AJ Tarqui pasó de 0,5 m³/s a 12 m³/s en 2,5 horas (Vallejo, 2014).

Los puntos de control (Tarqui AJ Yanuncay, Yanuncay AJ Tarqui y punto de confluencia) se ubican dentro de la zona urbana de la ciudad de Cuenca y los datos de medición de caudales son registrados por ETAPA EP y los datos de grandes crecidas y/o estiajes no pueden llegar a tomarse con gran precisión por la vulnerabilidad del equipo de monitoreo.

Según Tatiana Pineda, directora de la Unidad de Gestión de Riesgos del Municipio de Cuenca en una entrevista con la revista (PRIMICIAS, 2024): “*En los últimos años, hemos visto más daños del invierno en todo el cantón. Hemos tenido inundaciones y aluviones año tras año y en diferentes zonas*”. Para el río Yanuncay, un caudal de 30 m³/s es suficiente para causar inundaciones en sus sectores más vulnerables: Tres Puentes, Misicata, Universidad del Azuay (zona de estudio) y Gapal. En cambio, en las prolongaciones del río Tarqui existen 2 parroquias vulnerables: Victoria del Portete, Tarqui y Carmen de Guzho, con emergencias en los últimos años. Adicional a esto, las inundaciones son detonantes de remoción de masas, aluviones, deslizamientos y derrumbes.

Todo esto conlleva a crear nuevas medidas en el Plan de Contingencia contra el invierno de la Municipalidad de Cuenca.

El detonante de esta escasa gestión, es que las mediciones de fluidos en zonas de difícil acceso, lugares donde el cauce va muy rápido (puede causar daños al personal y/o equipos), o cuando los ríos presentan grandes crecidas no se puede realizar el control de algunos parámetros hidrológicos mediante los métodos tradicionales como el molinete.

Pese a que se tiene estos problemas de recolección de datos, dentro del territorio nacional no se tienen aplicaciones de métodos diferentes de medición para estos casos, por lo que implementar un nuevo método (LSPIV) que ha funcionado con gran versatilidad en otros países sería de gran ayuda al campo investigativo nacional para innovar los métodos tradicionales (Massó, 2018).

3.2. Descripción de materiales empleados para la recolección de datos

Para la determinación de los paramétricos de velocidad superficial de los 5 puntos de estudio: Tarqui AJ Yanuncay, Yanuncay AJ Tarqui y Yanuncay DJ Tarqui, se utilizaron como ya mencionamos en la metodología, 2 tipos de mediciones en donde la primera se caracteriza por ser intrusiva (método del molinete hidráulico) y la segunda es una nueva técnica experimental no intrusiva, muy novedosa Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV).

3.2.1 Materiales y equipos para el método del molinete hidráulico

Este método permite aforar una corriente de agua con ayuda del molinete. Para cauces caudalosos se utiliza el molinete a través de puentes, cables o tarabitas, en su defecto si se trata de cauces poco caudalosos y poco profundo se utiliza el vadeo con el micro molinete. En este estudio se utilizaron ambas herramientas.



Figura 11 Dispositivo de lectura de velocidad calibrado por el fabricante (Magna Rod – Redback) (Fuente: Propia)

-Molinete para medición de velocidad en aguas poco profundas: El mecanismo cumple el mismo principio que el molinete explicado en el apartado anterior, solo que se

diferencia por el método intrusivo de vadeo para afluentes poco caudalosos o poco profundas. El dispositivo se denomina “MAGNA ROD - REDBACK”. Se compone de un trazador de profundidad ayudado de una guía visual y calibrada en el dispositivo de lectura de velocidad. También, consta de una hélice giratoria tipo cazoleta y un alambre de lectura magnética en su parte inferior. Se debe tomar en cuenta la perfecta nivelación del instrumento en el tiempo de medición a lo largo de la sección transversal (Figura 15).



Figura 12 Instrumento de medición " MAGNA ROD - REDBACK " (Fuente: Propia)

En la Figura 13, se expone el método intrusivo del equipo “MAGNA ROD- RED BACK” en conjunto con la barra de vadeo Magna Rod. El equipo completamente nivelado, y con el usuario en completo equilibrio para la toma de muestra de velocidades superficiales (velocidades de flujos de 0.025 m/s a 10 m/s).



Figura 13. Instrumento de lectura de velocidad “Magna rodad – red back” (Fuente: Propia)

La Figura 14, expone el equipo “MAGNA ROD- RED BACK” en cada sección de toma de muestra de velocidades. En este punto, se puede apreciar la velocidad constante del flujo a lo largo del cauce. También, como se recomienda en ISO 748, el dispositivo giratorio permanece dentro del agua en todo momento (Figura 15).



Figura 14. Hélice giratoria tipo cazoleta (Fuente: Propia)

3.2.2 Materiales y equipos para desarrollo de la técnica (LSPIV)

La técnica LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) requiere de un dispositivo de vuelo tipo DRONE y adicional, los elementos descritos a continuación:

a) Un dispositivo que cuente con una cámara (resolución mínima 640 x 480 pixeles) que pueda grabar un video de 1 minuto como mínimo, con una cierta calidad de registro superior a los 15 FPS en el curso de agua que se quiera medir;

b) Molinetes para obtener las velocidades medias en varias profundidades verticales, y verificación del caudal de salida del afluente, así como su comprobación. Es decir, se requiere una batimetría de la sección transversal como en los métodos anteriores;

c) Un elemento de medición de distancias como ser una regla, una cinta, un distanciómetro, etc. para poder relevar la posición de los puntos fijos, los cuales servirán para poder realizar la rectificación de los resultados;

d) 4 puntos de control visibles para corrección de los datos, y evitar la iluminación excesiva del sol, así como turbulencia del agua o zonas cercanas a infraestructuras hidráulicas;

e) Trazadores flotantes de cualquier material: plástico, cascaras de frutas, madera de aserrín u otros. Procurar reciclar para evitar la contaminación de los ríos y sus alrededores.

f) Programa computacional “PIV-lab” desarrollado en Matlab necesario para la obtención de la dirección de los vectores de velocidad y el programa “RIVeR” para la orto rectificación de la velocidad real del afluente a partir de los 4 puntos de control (Patalano, 2017).

3.3. Recolección de datos

A continuación, se detalla el proceso de recolección de datos (velocidad superficial y caudales) in situ tanto del método tradicional del molinete hidráulico y el método LSPIV para su posterior comprobación, verificación de resultados y simulación de crecidas.

3.3.1 Método intrusivo con molinete hidráulico para cauces profundos

El proceso de recolección de datos se expone de la siguiente manera:

- a) Se localiza el sitio de muestreo como un puente (Puente de la Universidad del Azuay en el punto de confluencia, Puente del Parque Botánico del Río Yanuncay y Puente del Parque Botánico del Río Tarqui), en el cual se detalla el abscisado cada 3 metros en la sección transversal del análisis.
- b) Armado e instalado, tanto del equipo de transporte como del molinete hidráulico. Se sitúa todo el equipo de monitoreo en la abscisa 0+00 m. El molinete desciende hasta alcanzar el espejo de agua, seguido ingresa al cauce para medir la altura de ese tramo.
- c) Como se menciona en la metodología, las velocidades se toman en las alturas siguientes: espejo de agua, 20%, 60% y 80% de profundidad del agua a partir de la superficie.
- d) El tiempo de muestreo para cada profundidad es de 30 segundos.
- e) Los datos se registran en una hoja estándar como se muestra en la Figura 10, con el orden siguiente: abscisas, profundidad de medición con sus respectivos tiempos, números de giros y velocidades.
- f) El cálculo de la descarga de caudal en el tramo estudiado sigue con lo establecido en la metodología planteada para el método del molinete hidráulico.

3.3.2 Método intrusivo con molinete hidráulico para cauces poco profundos

Este método se utiliza para medición de velocidades en aguas poco caudalosos y poco profundos por vadeo. El vadeo se lo realiza por inmersión en el cauce del personal especialista con el equipo necesario.

- a) Preparación de los equipos “MAGNA ROD - REDBACK” en conjunto con el lector de velocidad.
- b) Medición de la longitud de la sección transversal y discretización cada metro para optimizar los resultados tal como lo establece la Norma ISO -748.
- c) Iniciar las mediciones en las profundidades: espejo de agua, 20%, 60% y 80% del tirante hidráulico a partir de la superficie del agua, con un tiempo de 30 segundos para cada caso.
- d) Los datos se registran en una hoja estándar siguiendo el proceso de la medición para caudales profundos.

3.3.3 Método LSPIV (no intrusivo)

Una vez terminada las mediciones con el molinete se procede a la toma de muestras con esta técnica como lo establece Bolatti, durante su trabajo investigativo en 2019:

- Se establece los 4 puntos de control procurando estar lo más cercano a las orillas del río, de tal forma que sean visibles en todo momento,
- Las distancias entre los puntos, así como las diagonales deben ser medidos (6 longitudes en total). Tener en cuenta que se necesita la distancia de la sección transversal que servirá para el análisis de salida de caudal del afluente,
- Realizar el vuelo del dron (4 minutos en cada tramo de estudio) teniendo en cuenta que se debe tener buena visibilidad de los 4 puntos de control, así como la superficie del agua. Evitar en lo posible el exceso de iluminación del sol y las ráfagas de viento que pueden alterar los resultados,
- Los trazadores flotantes se arrojan al río, de tal forma que cubran toda la superficie de borde a borde y homogénea durante el proceso de medición,
- La batimetría de la sección transversal se determina de la misma manera como se utiliza en la metodología del molinete hidráulico.

3.4. Aplicación de la Técnica LSPIV

La técnica LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) debe realizarse a partir del seguimiento de partículas, en gran medida similar a la técnica PIV que se desarrolla en laboratorio, solo que se diferencia que, LSPIV se debe ortorectificar por la interferencia de la luz solar, la pobre resolución asociada a un gran ángulo que causa una gran diferencia de áreas integradas en los píxeles, aplicación de la técnica en ambientes no controlado (Bolatti, 2019).

3.4.1 Procesamiento de video a imágenes

LSPIV, al tratarse de seguimiento de partículas en cuadrantes vectoriales se requiere una secuencia de fotogramas, es decir un video. En RIVeR, se especifica la velocidad de los fotogramas deseados del video a analizar (por lo general se tiene un rango de 15 a 30 FPS), rango de procesamiento (elegir el lapso de tiempo con mejor condición). La extracción de las imágenes debe ser en blanco y negro (Grayscale), con el fin de disminuir el costo computacional de procesamiento (postproceso) como se muestra en la figura 21. El programa auto guarda las imágenes en la misma carpeta donde se encuentra el video y ordenadas según el tiempo de grabación y los FPS (Patalano et al., 2017).

3.4.2 Velocimetría de imágenes en PIVlab

El programa PIVlab funciona con un algoritmo vectorial de seguimiento de partículas en diferentes cuadrantes (método euleriano), y para LSPIV se maneja la secuencia: 1-2, 2-3, 3-4..., con el fin de comparar los fotogramas en pares, es decir, detener el análisis en cada paso de fotograma y compararlo con el anterior. En la Figura 16 se puede observar los 2 procesos de secuencias de fotogramas, el primero basado en 1 solo paso; y el segundo que se realiza en múltiples pasos.

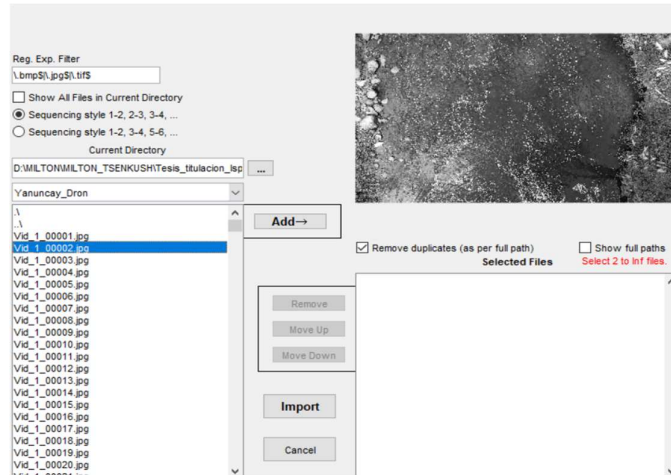


Figura 15 Fotogramas (Fuente; Propia)

Si se procesa todo el rango de vista de los fotogramas, el procesamiento se volverá muy costoso en cuanto al rendimiento computacional, tal como sucedería en rocas expuestas, orillas y elementos estructurales hidráulicos en donde no existe movimiento de flujo y por ello es necesario eliminarlos dentro del análisis. Para ello, existe una herramienta, *Región de Interés (ROI)*, definida como una subárea dentro de la imagen completa, y se prolonga en todos los cuadros o pasos secuenciales que se analizará. En la Figura 17, se tiene la selección del área del ROI en una silueta azul y dentro de ella una máscara de color roja que desprecia áreas pequeñas que pueden llegar a alterar el seguimiento de las partículas (zona que no servirá para analizar).

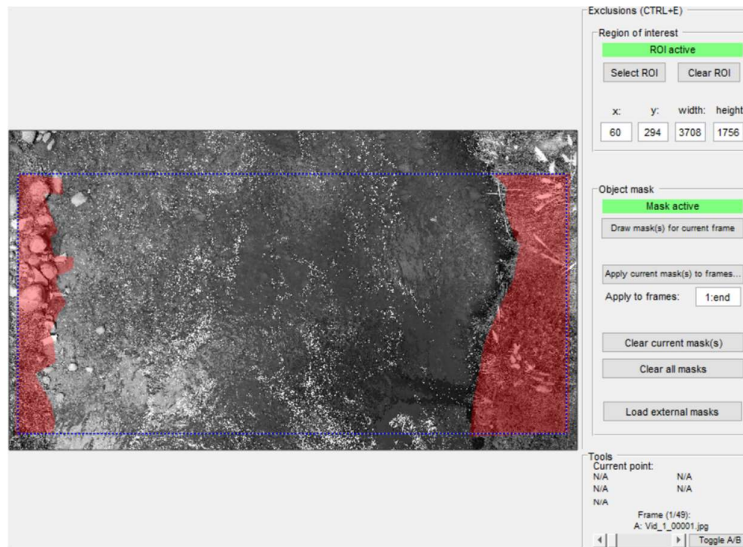


Figura 16 Pre-Proceso PIVlab (Fuente; Propia)

El preprocesamiento de imagen es una herramienta importante dentro del análisis de seguimiento de partículas. Para mejorar la precisión en la estimación de velocidad y garantizar una medición de calidad en el preprocesamiento de imágenes, se utilizan diversos filtros. Dos de los más empleados son el *CLAHE* (Constrast Limited Adaptive Histogram Equalization) y el *highpass* alto de intensidad (Figura 27). El *CLAHE* redistribuye las intensidades más frecuentes del histograma de la imagen a lo largo de todo el rango de datos, mientras que el filtro de paso alto se obtiene aplicando un filtro paso-bajo a la imagen y sustrayendo el resultado de la imagen original, resaltando así los detalles de alta frecuencia (Lobo, 2019).

Para el procesamiento de las imágenes, influyendo en la cantidad y calidad de información espacio-temporal recuperado. Este procesamiento sigue la correlación cruzada, en donde se lleva una serie de matrices de imágenes binarias a un campo de velocidad (Patalano, 2017).

El software PIVlab ofrece dos algoritmos de correlación diferentes: DCC (correlación cruzada directa de un solo paso) y deformación de ventana FFT (correlación de transformada

directa de Fourier con múltiples pasos y ventanas deformadas). Por lo general, se recomienda seleccionar la opción de deformación de ventana FFT, ya que este método produce una alta resolución vectorial, una excelente relación señal-ruido y un amplio rango de velocidad dinámica. El proceso comienza con áreas de interrogación relativamente grandes para calcular los desplazamientos de la imagen, lo que mejora la relación señal-ruido. Posteriormente, se reduce el tamaño de las ventanas de interrogación en los siguientes pasos, utilizando la información de desplazamiento del paso anterior para compensar las áreas más pequeñas. Este enfoque iterativo permite obtener resultados detallados y de alta calidad (Patalano et al., 2017).

La calidad y resolución de los vectores aumenta con cada pasada (método euleriano), los vectores se discretizan en pequeños cuadrantes para tener las direcciones del flujo en cada fotograma de relación: 1-2, 2-3, 3-4 respectivamente hasta finalizar. Es importante sacar el promedio de vectores que serán adimensionales durante todo el tiempo de medición.

3.5. Aplicación del Software RIVeR

Debido a que los resultados de análisis en PIVlab son adicionales, las áreas de interrogación son muy grandes y tomando las condiciones ambientales y de los equipos que no son controlables, es necesario realizar la orto rectificación con medidas asociadas a coordenadas del mundo real o distancias reales medidas (4 puntos de control y 6 distancias previamente medidas en campo durante la medición).

3.5.1 Orto rectificación de imágenes (RIVeR)

Cabe mencionar que RIVeR no corrige las imágenes originales extraídas en la misma, sino los resultados provenientes del PIVlab. Durante este proceso se requiere una imagen de base para la orto rectificación que se mantendrá firme durante cada paso. Es decir, existe un fotograma base de comparación para todos los pasos, en donde cada cuadrante analizará una

partícula y la seguirá hasta pasar al siguiente cuadrante. De esta forma se analiza las velocidades superficiales.

Sobre la imagen guía de fondo se ubican los 4 puntos de control 2D (CP's) conocido en esta metodología como Puntos de Referencia Terrestres. Es recomendable empezar la asignación de los puntos de forma antihoraria y procurando tomar inicialmente el punto izquierdo inferior si es que el flujo avanza de sur a norte y el punto derecho superior si es que el flujo avanza de norte a sur. Terminado de asignar los puntos, una ventana emergente requiere las longitudes entre los puntos (6 distancias), ordenados en formas de colores para facilitar la correcta medida de los mismos.

La Región de Interés (ROI) no debe ser la misma que se utiliza en PIVlab (No cuadrada) pero si mucho a esta para tener referencia a tierra (suelo sin movimiento).

El paso del tiempo (unidad en milisegundos) entre cada fotograma es importante porque a partir de ella se define las nuevas velocidades en el mundo real. Una forma fácil es dividir 1000 entre la cantidad de FPS.

$$t = \frac{1000}{FPS}$$

El resultado final corregido del promedio total de cada paso se insertará como un fotograma al final de todos los pasos y se resalta de color verde cuando se selecciona el promedio de vectores de velocidad.

3.5.2 Batimetría de la sección transversal recolectada in situ

En el fotograma que contiene el promedio total de las velocidades se traza una línea transversal de izquierda a derecha (sobre la imagen orto rectificadas) en donde se carga la batimetría utilizada en las mediciones con molinete. Como existen varios vectores que pasan por el mismo cuadrante durante el tiempo de medición, existirá variaciones en las velocidades

dentro del mismo, por ello se requiere el promedio en cada celda o cuadrante que arroja el tamaño y dirección de los vectores.

3.5.3 Caudales de salida LSPIV (método no intrusivo)

RIVeR viene integrado de una interfaz capaz de calcular la descarga de la sección transversal mediante el método de las secciones medias (consiste en dividir la sección transversal en N verticales adyacente con una distancia d). Finalmente, se requiere conocer la relación entre la velocidad superficial y la velocidad media medida con el molinete hidráulico, y para ellos se utiliza un factor de corrección que por defecto es $\alpha=1$. El valor de α puede variar por cuestiones ambientales, tipo de cauces o alteraciones de las batimetrías (discretización de la sección transversal), por lo que es necesario tomar un valor óptimo de α para la corrección de caudal con LSPIV.

3.6. Aplicación y simulación de crecidas en HEC-RAS 2D

HEC-RAS es un software que permite las modelaciones hidráulicas para flujos ya sea en canales abiertos con régimen permanente o no permanente, esto es posible mediante cálculos de los niveles en la superficie del agua en un flujo gradualmente variado. La modelación se puede dar en un río o en una red de ríos, ya sean estos de régimen supercríticos y/o subcríticos (Villon Béjar, 2016).

Debido a que este software genera modelos hidráulicos, que representa la dinámica de los cauces por medio de la simulación de flujos, en base a sus características como la pendiente, el caudal y de esta forma, se realiza el estudio de las áreas afectadas por medio de las inundaciones. (Palacios, 2021)

En la modelación 2D o modelo bidimensional, se centra en las ecuaciones diferenciales que describen el flujo bidimensional no estacionario promediado verticalmente, estas ecuaciones tienen una alta aplicabilidad dentro del estudio del flujo variable de

superficie libre. (Palacios, 2021). HEC-RAS resuelve los modelos bidimensionales a partir de ecuaciones diferenciales parciales que permiten que el software procese la información de manera más efectiva y rápida (Palacios, 2021)

Para obtener el comportamiento hidrodinámico de la zona de estudio, se realizó el trabajo de campo e investigativo, de esta forma se obtuvo los puntos necesarios para la creación de curvas de nivel y seguidamente del modelo de elevación (TIN) con ayuda del Software Arc Map.

Para obtener la velocimetría superficial 2D en donde, se puede apreciar el comportamiento hidrodinámico del cauce en el punto de confluencia, y de explora la influencia de velocidades en el cauce:

La modelación hidrodinámica trabaja con el modelo de elevación y las curvas de nivel, en donde se genera un DEM con extensión TIFF, debido a que es el formato que ideal para trabajar en HEC-RAS (programa de modelamiento hidrodinámico).

En el software HEC-RAS se ingresa a la extensión RAS Mapper, en la cual se carga el DEM en formato TIFF para la creación del modelo hidrodinámico digital. Al cargar el modelo de elevación DEM como archivo TIFF en el RAS Mapper, éste se visualiza como se expone en la figura 17.

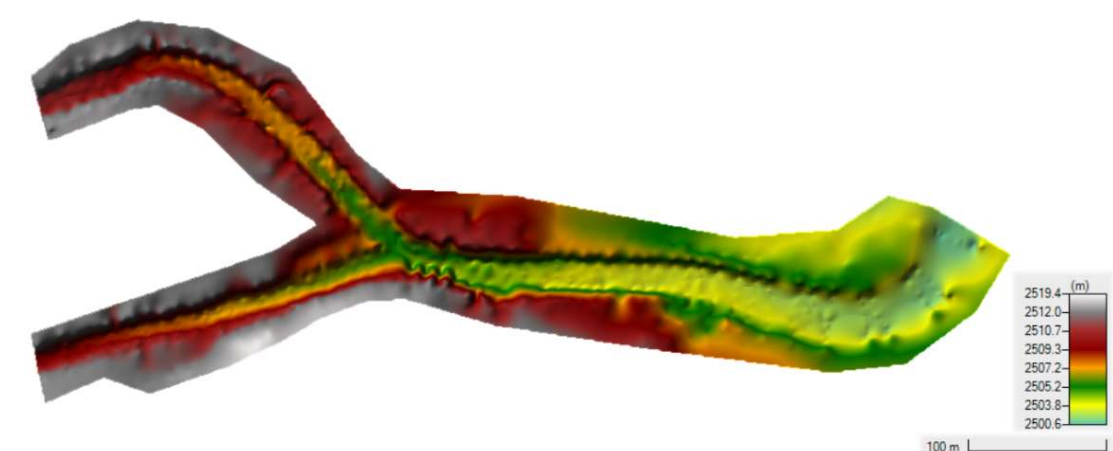


Figura 17 DEM en HEC -RAS

Las celdas de análisis son importantes porque en ellas se realiza el cálculo de las condiciones hidrodinámicas de los cauces (entre más pequeña las grillas, más peso computacional tiene), las condiciones de contorno de entrada y salida, y la línea de referencia del río se muestra en la figura 18.

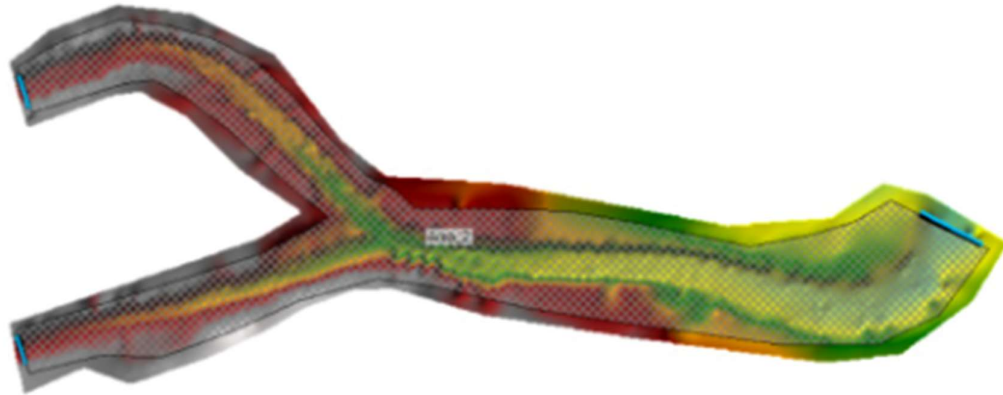


Figura 18 DEM con las condiciones de entrada y salida, con grilla (Fuente: Propia)

Los datos de entrada son los respectivos caudales arrojados con la técnica LSPIV para cada sección de control (5 puntos de control). De la misma forma se ingresa, los datos del coeficiente de Manning (rugosidad) y pendiente de los afluentes (figura 19). Para finalmente nos muestra un resultado con intervalos de tiempo de como el río incrementa su caudal y ver el comportamiento hidrodinámico a lo largo de los ríos a analizar.

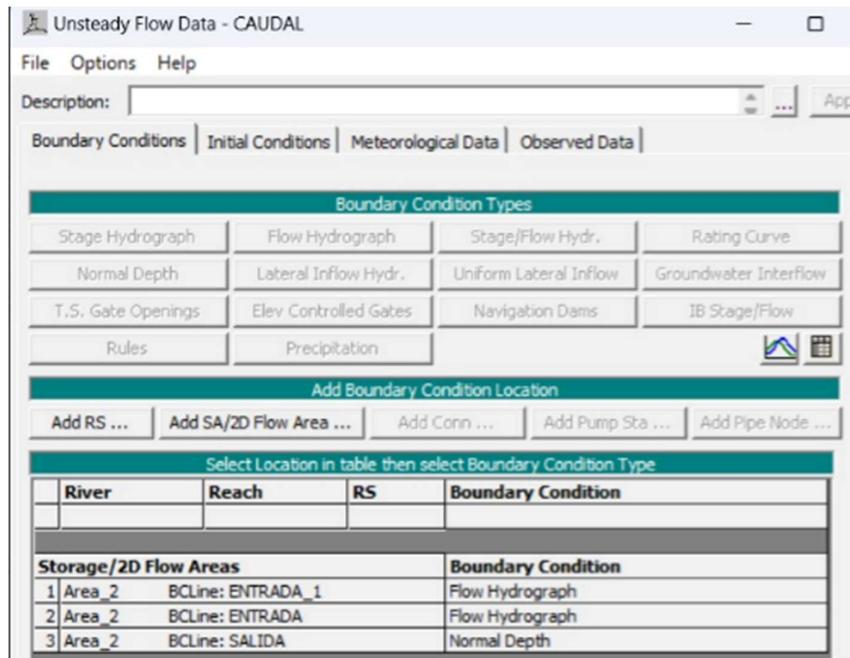


Figura 19 Ingreso de Datos (Fuente; Propia)

Se muestra la modelación del cauce para poder de esta manera comprender el comportamiento del tramo analizado, las velocidades del agua y cómo van llenando el mismo hasta llegar al caudal de demanda que se proporciona al inicio, en la figura se observa como forma de ejemplo los datos de caudales correspondientes a la segunda jornada de aforos en Yanuncay AJ Tarqui y Tarqui AJ Yanuncay.

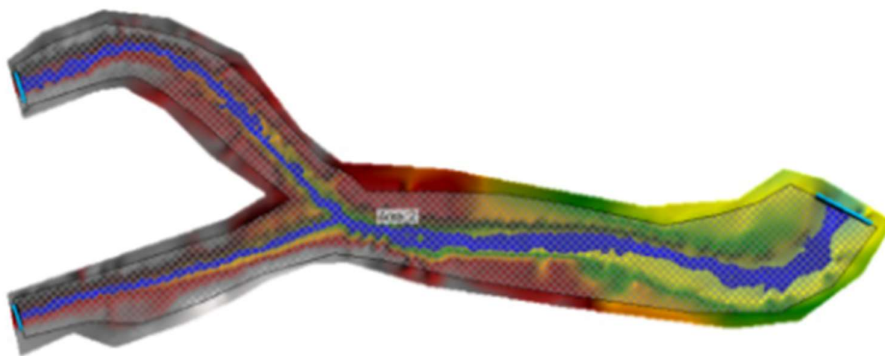


Figura 20 Simulación final -segunda campaña (Fuente: Propia)

CAPITULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se expone los resultados de las mediciones de velocimetría superficial, en donde se realiza una comparación de la medición con molinete frente a la Metodología LSPIV dentro de las mismas secciones transversales de los cauces y el mismo periodo de tiempo para evitar fallas en los resultados de análisis. Por consiguiente, se presenta las batimetrías de cada sección de estudio, campos de velocimetría superficial en la sección de control, velocidades in situ mediante molinete (método tradicional), caudales y descarga final, para finalmente comparar la descarga de caudal obtenida del Software RIVeR y generar una curva de comparación entre ambas metodologías de medición (técnica del molinete hidráulico y técnica Experimental LSPIV), además vincular el comportamiento hidrodinámico de los ríos (Tarqui y Yanuncay) con los valores de LSPIV.

4.1. Recolección de datos Primera Campaña

4.1.1 Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui

La batimetría en esta zona de estudio se obtuvo cada 2 metros, teniendo un ancho de 16.6 m, como se observa en la Figura 21, con una vista desde agua abajo hacia aguas arriba.

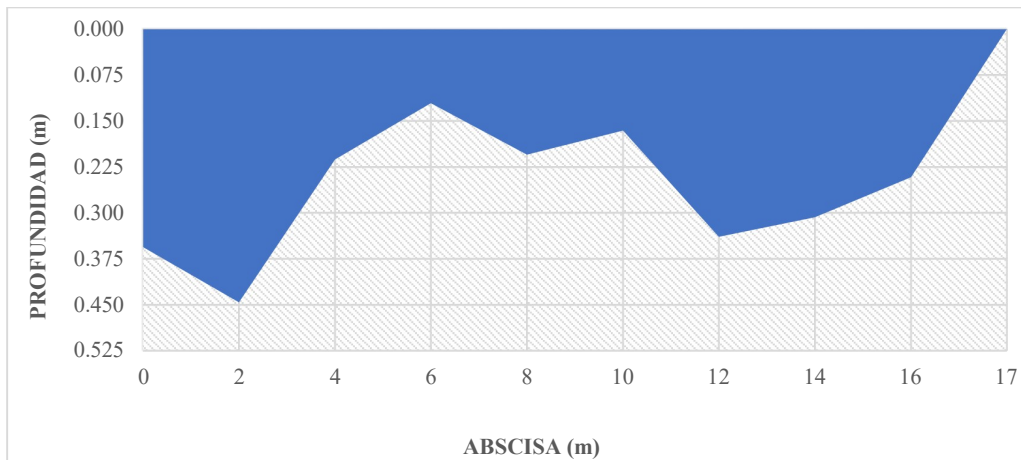


Figura 21 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Fuente; Propia)

Los campos de velocidades en el punto de control Yanuncay AJ Tarqui se encuentra distribuida como se aprecia en la Figura 22, en donde muestra la sección transversal de análisis. La técnica LSPIV, al analizar fotogramas en secuencias una tras otra siguiendo partículas en movimiento llega a obtener un modelo de velocimetría promedio en cada una de las celdas de análisis. En la zona media donde se tiene mucha presencia de rocas y poca profundidad, no se produce el comportamiento hidrodinámico deseado (flujos convergentes son un obstáculo para LSPIV). En esta zona media en particular existe velocidades cercanas a 0 m/s, y reduciendo la precisión de LSPIV. En las zonas cercanas a las orillas tanto izquierda como derecha se tiene una distribución homogénea de velocimetría superficial en donde los vectores siguen el curso natural del cauce, mostrando mayores velocidades en zonas cercanas a los bordes debido a la no existencia de islas que generan zonas de estancamiento.

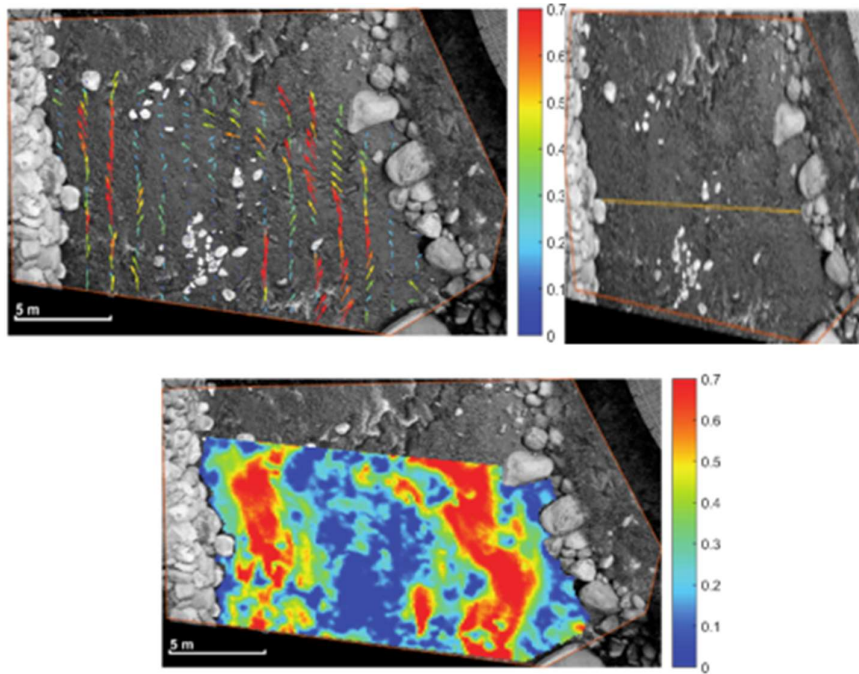


Figura 22. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

En la sección transversal, existen puntos en donde es imposible tomar velocidades al 20%, 60% y 80% a partir de la superficie del agua por: irregularidad en el fondo del cauce, profundidades menores a 20 cm (profundidad mínima para operación del equipo 6 cm) o presencia de cantos rodados. Esto conlleva a tener poca información para calcular la velocidad media con el método del molinete, tal como se lo puede apreciar en la Figura 23 en donde la diferencia al aplicar las dos metodologías es mayor a lo largo de la sección intermedia.

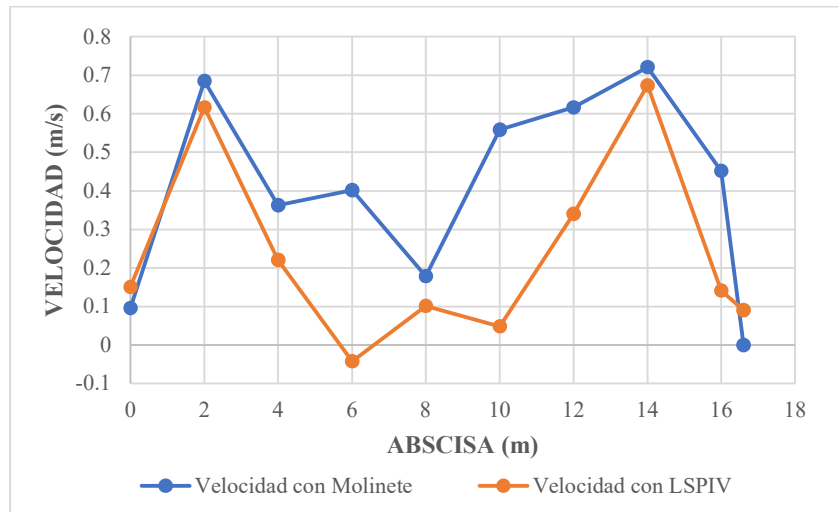


Figura 23 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

En la tabla 2 se observa los valores de criterios estadísticos que nos permiten determinar la relación entre los valores tomados en campo con el método del molinete hidráulico y los datos calculados con LSPIV. El coeficiente de correlación R^2 llega a tener un valor de 0.65 lo que se explica con la variación de los datos en la zona media del cauce, ya que están dispersos en la abscisa 6m y 10m, y el resto de valores de velocidad si se ajustan a la realidad. De la misma manera el valor de 0.0674 de error cuadrático medio explica un ajuste ideal entre los datos tomados en campo y los datos arrojados con la técnica experimental LSPIV, es decir mientras más cercano a cero sea este valor mejor será la relación de los datos.

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.652373014
Error Cuadrático Medio	0.067471985
Desviación Media	0.173

Tabla 2. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

En esta sección en particular se observó la presencia de velocidades negativas o próximas a 0 m/s en zonas de estancamiento, tal como se observa en la tabla 3, esto se debe a

la irregularidad en el fondo y presencia de piedras, produciendo un flujo convergente, de tal manera que la recirculación de los vectores que asumen el análisis LSPIV de seguimiento de partículas, y al momento de vectorizarlas crea valores negativos que al final cuando se promedia los valores de la celda de análisis se obtenga valores atípicos e inferiores a los medidos en campo.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m ³ /s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m ³ /s)
0	-0.356	0.1511	0.03	0.077	0.096
2	-0.446	0.6169	0.55	0.548	0.685
4	-0.213	0.2206	0.094	0.290	0.363
6	-0.121	-0.042	-0.01	0.322	0.402
8	-0.205	0.1014	0.042	0.143	0.179
10	-0.166	0.0487	0.016	0.447	0.559
12	-0.339	0.3407	0.231	0.494	0.617
14	-0.307	0.6739	0.414	0.577	0.721
16	-0.242	0.1414	0.044	0.362	0.452
16.6	0	0.0904	0.002	0.000	0
Total			1.31		2.14

Tabla 3 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

La bibliografía de (Patalano, 2017) y la técnica experimental LSPIV recomienda un factor de corrección inicial de descarga al final del cauce en análisis ($\alpha:85$), esto debido a distintos factores propios del método y también de factores ambientales de la zona en estudio. En la tabla 4 se observa una gran diferencia del caudal de descarga entre los 2 métodos. Para este análisis se toma un valor $\alpha=1$ por la irregularidad en la batimetría con un error absoluto de 38.91 % siendo muy notorio la variabilidad causada por el flujo convergente, recirculación de agua y exceso de zonas con turbulencias (en zonas de aguas poco profundas y régimen supercrítico) que se menciona en el análisis de las velocidades.

Técnica	Caudal (m ³ /s)	Caudal con $\alpha:1$ (m ³ /s)	Error %
Molinete	2.14	2.14	-
LSPIV	1.31	1.31	38.91

Tabla 4 Corrección de descarga en Yanuncay AJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

4.1.2 Resultados Medición en el rio Tarqui AJ rio Yanuncay

La batimetría en esta sección de estudio se obtuvo cada 2 metros, teniendo un ancho total de 11.7 m, como se observa en la Figura 24, con una vista desde agua abajo hacia aguas arriba.

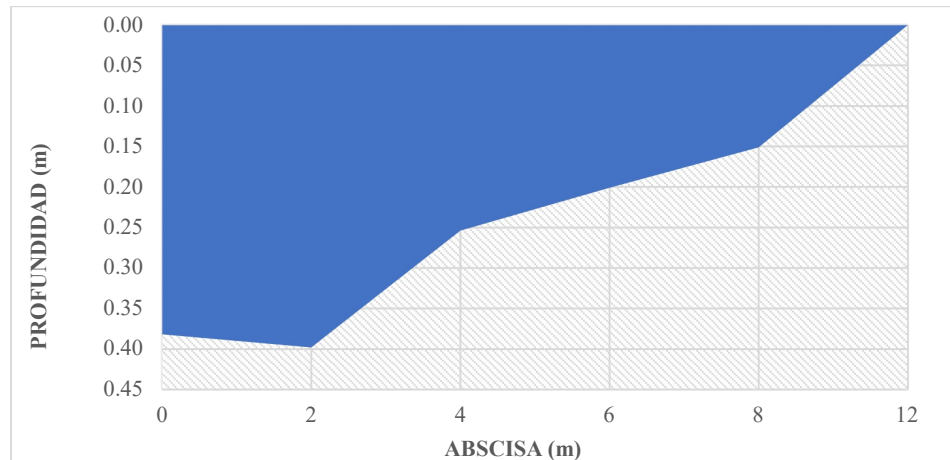


Figura 24 Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

El campo de vectorización de velocidades en este punto de control se encuentra de manera homogénea (parte céntrica del área de interés), dando a entender poca presencia de material rocoso en el cauce y mayores velocidades en la zona. En la sección de control se tiene la presencia de velocidades bajas en el sector derecho a diferencia del lado izquierdo, esto se debe a la poca profundidad y la tendencia de la fuerza hidrodinámica del agua que guía el cauce hacia el lado izquierdo. De la misma manera el campo de velocidad nos permite observar velocidades que oscilan entre 0.5 m/s y 0.8 m/s en la zona media del cauce, ocasionando mayores fuerzas erosivas en el fondo del agua.

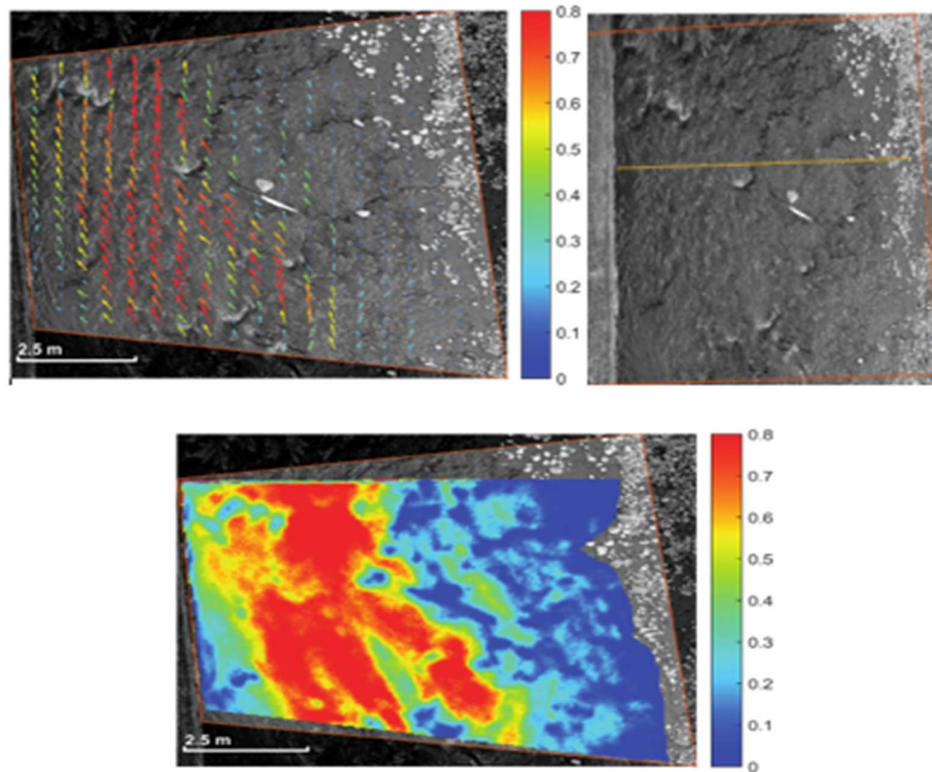


Figura 25. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s

La distribución de velocidades a lo largo de esta sección transversal se puede apreciar que se encuentra homogénea, pese a tener poca cantidad de punto capturados de velocidades (60% a partir de la superficie y superficial). También, esta sección posee regularidad en el fondo del cauce y poca presencia de piedras, lo que facilita tener esta una distribución de velocidades en la zona media en el rango de 0.6 m/s a 1.2 m/s como se observa en la Figura 26.

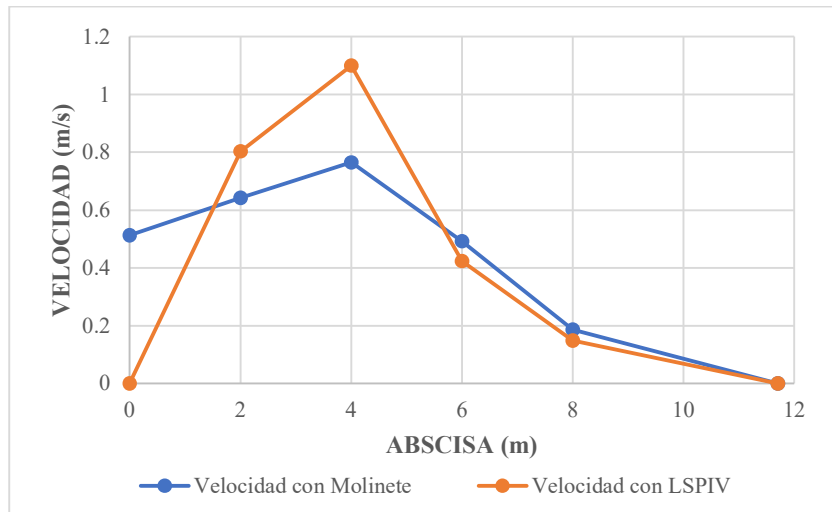


Figura 26 Velocidades con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

Los datos calculados y observados siguen una tendencia homogénea y se puede corroborar gracias al coeficiente de determinación R^2 con un valor de 0.934, es decir datos se ajustan a la línea de regresión ajustada (entre más cercano a 1 representa un ajuste óptimo entre los datos). De la misma forma el error cuadrático medio presenta un valor de 0.0144, evidenciando una relación homogénea entre las velocimetrías tomadas con LSPIV y molinete.

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.934934727
Error Cuadrático Medio	0.014440417
Desviación Media	1.575

Tabla 5. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

El resumen de datos arrojados de las mediciones con el molinete hidráulico se lo puede observar en la tabla 6, en donde se llega a tener similitudes en los puntos de análisis respecto a la técnica LSPIV. La discretización del abscisado en la batimetría se la puede realizar cada metro, pese a esto la distribución de velocidad es óptima para el estudio del caso pese a tener poca cantidad de datos.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m ³ /s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m ³ /s)
0	-0.382	0	0.0612	0.410	0.513
2	-0.398	0.8036	0.5804	0.514	0.642
4	-0.254	1.1001	0.3385	0.612	0.765
6	-0.201	0.4242	0.1352	0.394	0.492
8	-0.151	0.1487	0.0488	0.150	0.187
11.7	0	0	0	0.000	0
Total			1.4		1.28

Tabla 6 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña)

(Fuente; Propia)

Para poder validar el caudal de salida se debe realizar la corrección pertinente con el factor de corrección ($\alpha:0.9$). El margen de error en este tramo llega a ser del 1.26 % siendo muy válido el criterio de análisis como se menciona en la tabla 7.

Técnica	Caudal (m ³ /s)	Caudal con $\alpha:0.9$ (m ³ /s)	Error %
Molinete	1.28	1.28	-
LSPIV	1.40	1.26	1.26

Tabla 7 Corrección de descarga en Tarqui AJ Yanuncay (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

4.1.3 Medición en el río Yanuncay DJ río Tarqui

Para la unión de ambos cauces de análisis se obtuvo la batimetría de la sección transversal discretizados cada 2 metros, empezando en la abscisa 3 m debido a que el punto de inicio se encuentra fuera del borde derecho del río. De esta forma el cauce tiene un ancho real de 21.4 m con una vista de aguas abajo hacia aguas arriba (Figura 27).

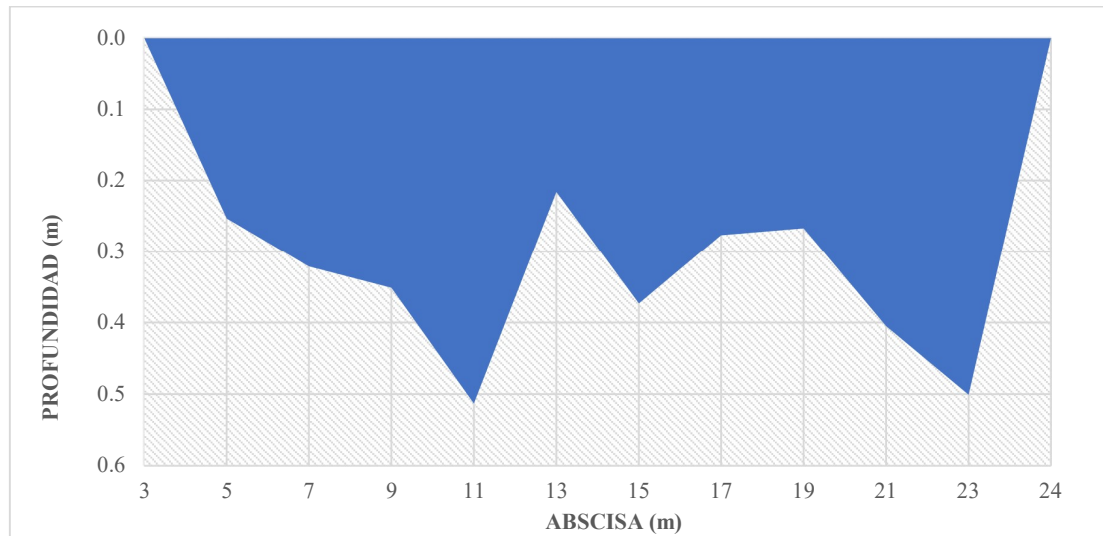


Figura 27 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

El punto de confluencia de ambos ríos aguas abajo en la zona del puente de la UDA (Universidad del Azuay) se tiene altas velocidades en las zonas medias como se puede observar en los campos de velocidad vectorial, las flechas muestran el curso del cauce en donde el agua golpea con poca fuerza los bordes izquierdos y derechos, debido a la amplitud del cauce y la gran profundidad del mismo en la zona media. En la sección transversal de control se llega a tener la presencia de roca que pueden llegar a crear un comportamiento convergente en el análisis, pero se llegó a tomar esta sección para observar dichos comportamientos hidrodinámicos. El campo de velocidad muestra velocidades cercanas a 0.2 m/s en zonas rocas del medio del cauce, en donde se llegó a poner una mascarar en dichos elementos para que no afecte en grandes medidas el efecto de convergencia del agua al chocar con las rocas y las orillas. Las velocidades se mantienen fuertes a lo largo del borde derecho del cauce teniendo velocidades entre 0.8 m/s y 1.4 m/s. Existen zonas en ambas orillas en donde las velocidades son cercanas a 0 m/s debido a la poca profundidad del cauce y presencia de material rocoso de gran tamaño.

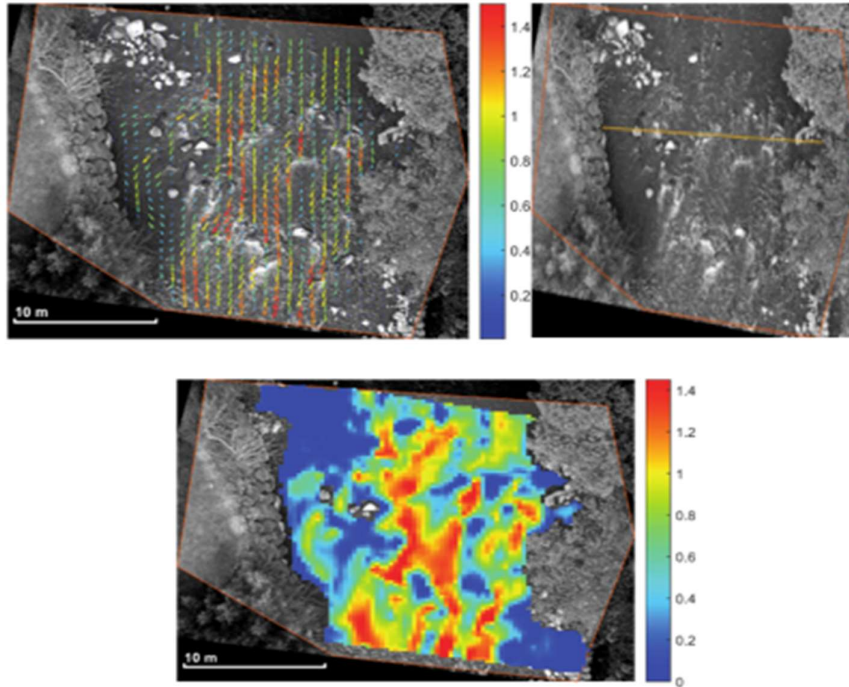


Figura 28. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay DJ Tarqui en m/s

La distribución de velocidades (Figura 29) en la sección de confluencia se encuentra homogénea respecto a la técnica del molinete hidráulico, a excepción en el punto medio (abscisa 13 m) y zona final (abscisa 19, 21 y 23 m) en donde la presencia de rocas y piedras de gran tamaño producen flujo convergente en esta zona que no llega a perjudicar en el resultado por la profundidad del cauce mayor a 20 cm.

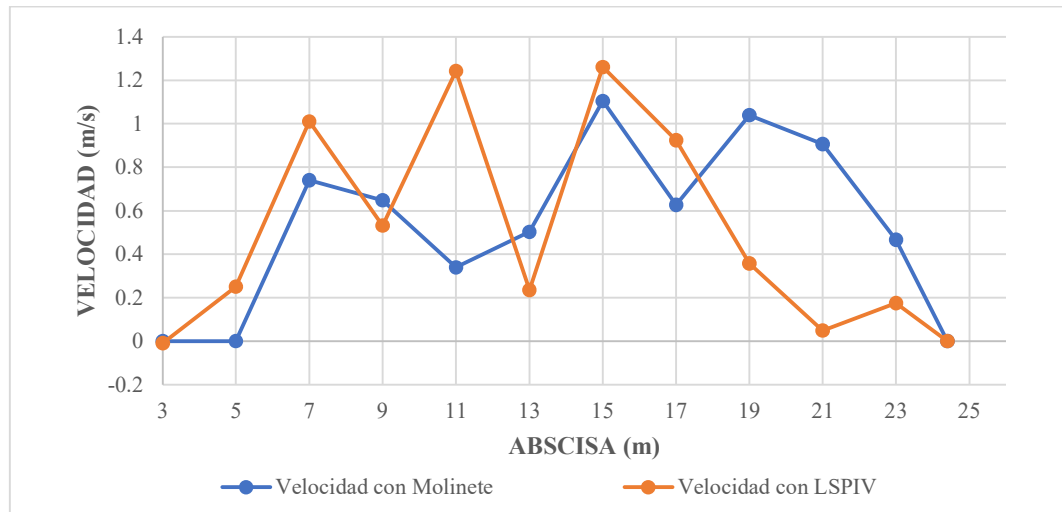


Figura 29 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

Esta tendencia de variabilidad entre los datos expuestos por la técnica del molinete frente a la técnica LSPIV se puede apreciar de mejor manera con el coeficiente de determinación R^2 con un valor de 0.434, es decir los datos no se ajustan de manera correcta debido a la presencia de zonas de turbulencia y estancamiento. De la misma manera el error cuadrático medio es de 0.203 indicando una diferente significativa entre los valores de ambas técnicas. Tal como se realizó en el análisis de los campos de velocidad promedio, este fenómeno se produce debido a la sección que se llegó a tomar (zonas de turbulencia) y a la irregularidad en las batimetrías en esta zona de estudio.

CRITERIOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.434789869
Error Cuadrático Medio	0.203118869
Desviación Media	0.029

Tabla 8. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

Los datos reales con valores numéricos tanto del método del molinete hidráulico como del LSPIV se lo muestra en la tabla 9. En donde la diferencia se lo puede ver de manera visual en la Figura 43.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m ³ /s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m ³ /s)
3.00	0	-0.0088	-0.0006	0	0.000
5.00	-0.25	0.2515	0.1273	0	0.000
7.00	-0.32	1.0104	0.6487	0.74	0.475
9.00	-0.35	0.5318	0.3733	0.648	0.455
11.00	-0.51	1.2433	1.2756	0.34	0.349
13.00	-0.22	0.2364	0.1021	0.503	0.217
15.00	-0.37	1.261	0.9407	1.105	0.824
17.00	-0.28	0.9246	0.5122	0.627	0.347
19.00	-0.27	0.3574	0.1909	1.04	0.555
21.00	-0.41	0.0491	0.0398	0.907	0.735
23.00	-0.5	0.1744	0.1485	0.467	0.398
24.40	0	0	0	0	0.000
Total			3.986		4.355

Tabla 9 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

La corrección de la técnica experimental LSPIV con el coeficiente de corrección ($\alpha:1$). En este punto se elige este factor porque es una zona de alta turbulencia y un valor cercano a 1 prioriza este comportamiento, y produce un porcentaje de error del 8.48 % siendo una cifra muy valiosa respecto a la técnica del molinete hidráulico. Para este punto de salida en el punto de confluencia el caudal de salida es de 3.98 m³/s (tabla 10).

Técnica	Caudal (m ³ /s)	Caudal con $\alpha:1$ (m ³ /s)	Error %
Molinete	4.355574	4.3555739	-
LSPIV	3.986	3.986	8.4850793

Tabla 10 Corrección de descarga en Yanuncay DJ Tarqui (Primera Campaña) (Fuente; Propia)

4.2. Recolección de datos Segunda Campaña

Durante la segunda campaña de recolección de datos se tomaron en cuenta las recomendaciones de la Norma ISO-748 respecto al abscisado en las secciones transversales. En cuanto a las velocidades tomadas se optaron tomar datos al 20%, 60% y 80% respecto a la superficie del cauce, pero en zonas con presencia de rocas y material que produzcan flujos convergentes se observarán ciertos criterios que se mencionarán a continuación.

4.2.1 Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui

La batimetría que se toma en esta sección de estudio se los observa en la Figura 30, en donde se puede llegar apreciar que en la zona media existe puntos con profundidades menores a 20 cm en donde será difícil tomar las 3 velocidades óptimas para analizar la velocidad media en dicho punto. El abscisado está tomado cada metro con un ancho del cauce de 16.4 m. La vista del perfil está de aguas abajo hacia aguas arriba.

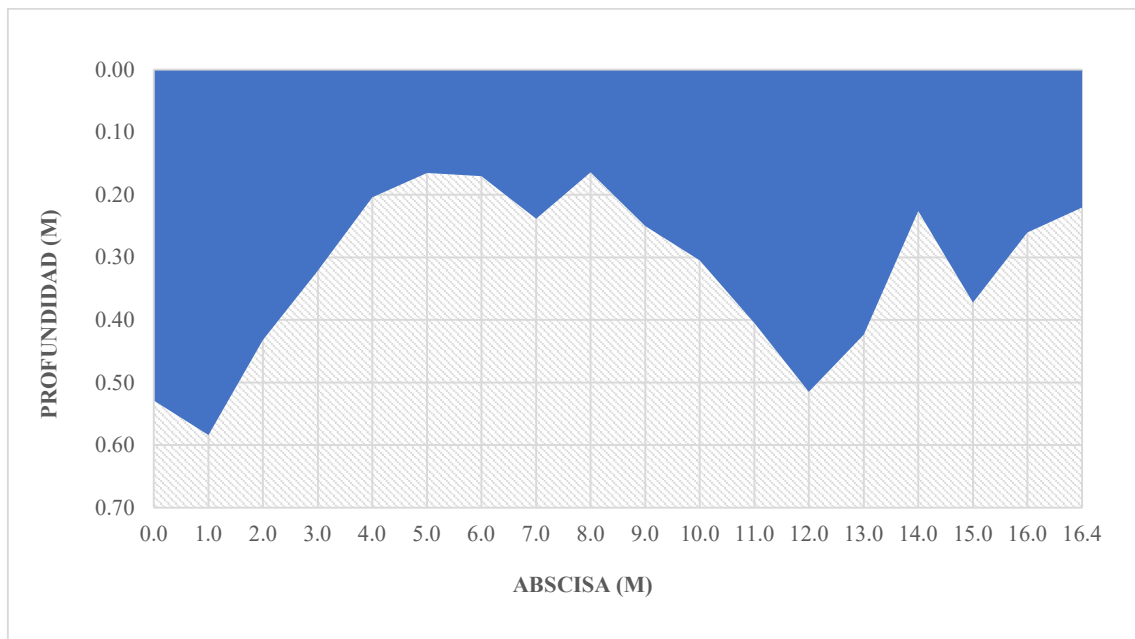


Figura 30 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente: Propia)

La sección en este punto se llegó a tomar las recomendaciones de la primera jornada, en donde se tuvo menor presencia del material rocoso que reducen la precisión de LSPIV. El campo vectorial sigue el curso del cauce sin mayores inconvenientes respecto al comportamiento convergente del flujo del agua. A lo largo de la sección transversal se tiene velocidades inferiores en la zona media a diferencia de los bordes izquierdo y derecho. Las distribuciones de velocidades son muy notorias en el campo de velocidad, y se llega a apreciar velocidades inferiores a 0.4 m/s en los sectores medios del cauce e inferiores a 0.2 m/s en ambos bordes. Por otra parte, ligeramente alejados de los bordes se tiene 2 sentidos

del flujo muy bien definidos. Es decir, 2 caminos en donde el río tiene mayor demanda de caudal en este sector (altas velocidades).

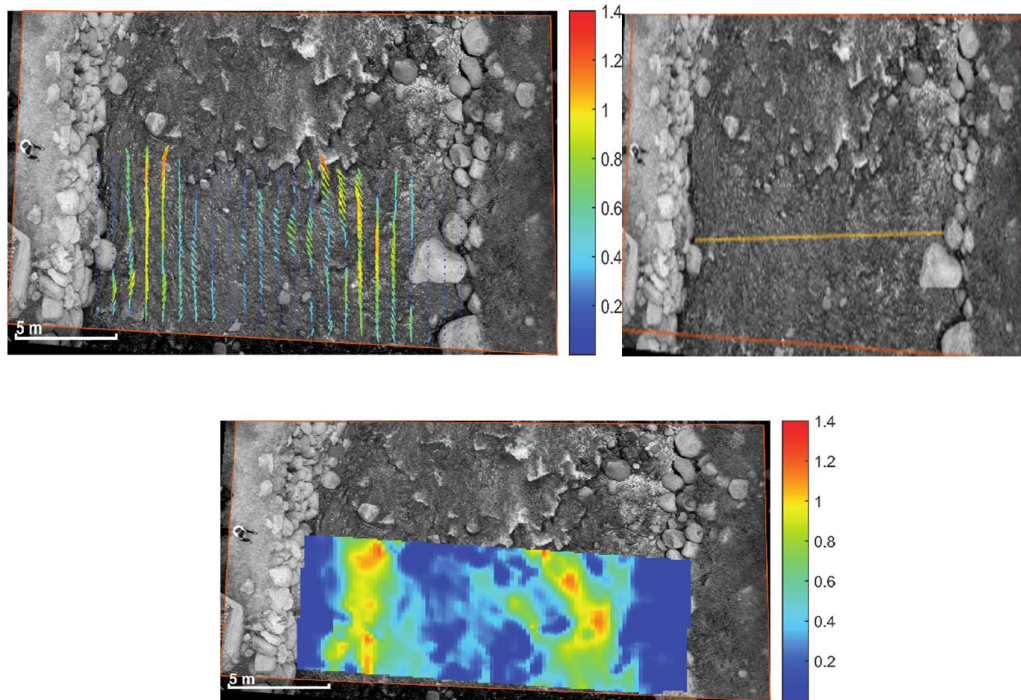


Figura 31. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio(inferior) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

La distribución de velocidad a lo largo del perfil se mantiene homogenizado durante todo el tramo a excepción de la zona media del cauce, en donde por la presencia de material rocoso y poca profundidad del cauce producen el flujo convergente, produciendo una leve exactitud en la técnica experimental LSPIV. Es decir, bajas velocidades en ciertos puntos (Figura 32).

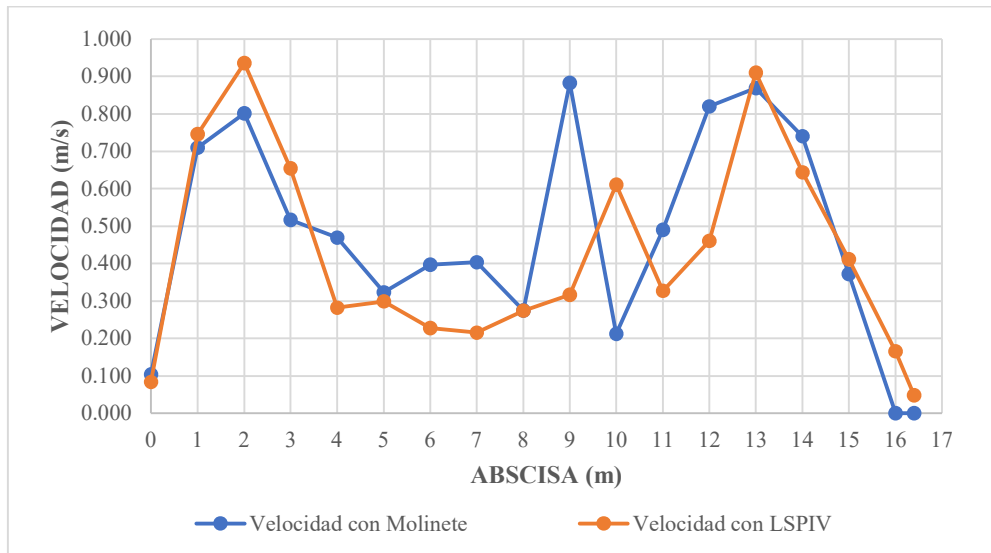


Figura 32 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

En la sección de análisis se puede llegar a apreciar un moderado ajuste de datos entre ambas metodologías en donde el valor del coeficiente de determinación llega a ser de 0.705 y para que los datos lleguen a tener un mejor ajuste se tendría que tomar una mayor cantidad de datos o elegir una zona sin presencia de turbulencias, estancamiento y reflujos del agua. Pese a tener dicho valor de coeficiente de determinación, el error cuadrático medio muestra un valor de 0.045 con una buena relación entre los datos (la magnitud de los datos comparados sigue el mismo sentido muestras más cercanos a 0).

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R²	0.705607
Error Cuadrático Medio	0.0451534
Desviación Media	0.043

Tabla 11. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

La tabla 12 muestra las velocidades tomadas con el molinete hidráulico y la técnica experimental LSPIV, en donde en la sección media de la abscisa 9 m se tiene una diferencia

de velocidad del 61.1% entre ambas técnicas, esto disminuye la precisión de la técnica LSPIV al momento de realizar la corrección del caudal de salida.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m ³ /s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m ³ /s)
0	-0.53	0.084	0.0117	0.104	0.014
1	-0.58	0.746	0.4358	0.710	0.415
2	-0.43	0.935	0.404	0.801	0.346
3	-0.32	0.654	0.2099	0.517	0.166
4	-0.2	0.282	0.0575	0.469	0.096
5	-0.17	0.299	0.0493	0.323	0.053
6	-0.17	0.227	0.0386	0.397	0.068
7	-0.24	0.216	0.0513	0.404	0.096
8	-0.16	0.274	0.045	0.275	0.045
9	-0.25	0.317	0.0792	0.882	0.221
10	-0.31	0.611	0.1863	0.212	0.065
11	-0.41	0.327	0.1326	0.490	0.198
12	-0.52	0.461	0.2373	0.820	0.422
13	-0.42	0.91	0.3849	0.869	0.368
14	-0.23	0.644	0.1455	0.740	0.167
15	-0.37	0.412	0.1531	0.372	0.138
16	-0.26	0.165	0.0301	0.000	0.000
16.4	-0.22	0.048	0.0012	0.000	0.000
Total			2.622		2.8777

Tabla 12 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

La técnica experimental LSPIV requiere una corrección del caudal de la salida con un factor de 1 (esta sección de análisis presenta zonas de altas turbulencia, por ello se el valor de 1 como se explica en los casos anteriores para este tipo de secciones en particular) en donde el caudal de salida con esta técnica es de 2.622 m³/s, mientras que la técnica del molinete hidráulico nos da un caudal de 2.877 m³/s, dando como resultado un margen de error del 8.88 % (tabla 13).

Técnica	Caudal (m ³ /s)	Caudal con $\alpha:1$ (m ³ /s)	Error %
Molinete	2.8777973	2.8777973	-
LSPIV	2.622	2.622	8.88865

Tabla 13 Corrección de descarga en Yanuncay AJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

4.2.2 Medición en el río Tarqui AJ río Yanuncay

En la sección del río Tarqui AJ Yanuncay se tiene un abscisado cada metro como nos enseña la Norma ISO-748. En este caso el cauce tiene un ancho de 10m, con profundidades menores a 20 cm a partir de la abscisa 6 m en adelante hasta el final. La vista de la sección esta tomado de aguas abajo hacia aguas arriba (Figura 33).

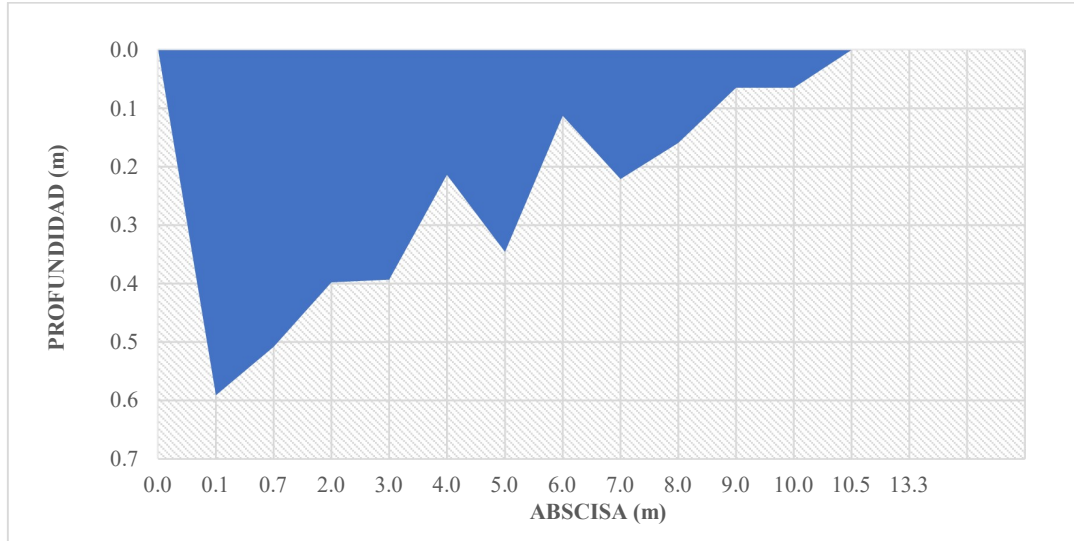


Figura 33. Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

En el sector del río Tarqui se mantiene el flujo y comportamiento vectorial como en la primera jornada de medición. Las velocidades se mantienen mayores en el centro del cauce con las flechas vectoriales que siguen el curso natural del río, dando a entender que no existe presencia de material rocoso que produzca anomalías en LSPIV. La sección transversal de análisis se muestra para comparar los resultados de velocidades observados y los calculados con LSPIV y corregidos en RIVER. Los campos de velocidad muestran velocidades nulas en los sectores en donde no existe flujo del agua (muro de hormigón izquierdo y borde derecho del río). En este caso, se tiene velocidades entre 0.6 m/s y 0.8 m/s que golpean el borde izquierdo y en la parte central, de manera casi uniforme velocidades entre 1.2 m/s y 1.4 m/s.

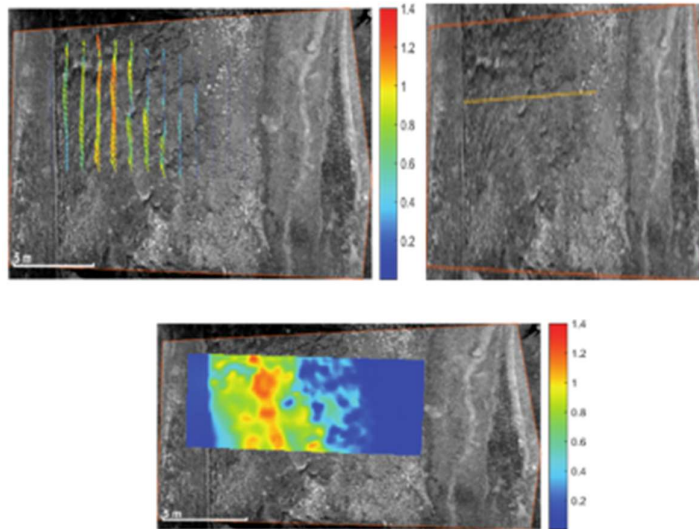


Figura 34. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s

El perfil de velocidad y la distribución del mismo a lo largo de la sección transversal (Figura 35) se mantiene homogénea en cierta medida porque la velocimetría de la técnica LSPIV desde la abscisa 0 m hasta 4 m presenta un exceso muy notorio en relación al molinete hidráulico (no muy crítico para el cálculo del caudal de salida), pero en la sección siguiente hasta el final del abscisado se tiene velocidades bajas con el LSPIV debido a la poca profundidad explicada anteriormente.

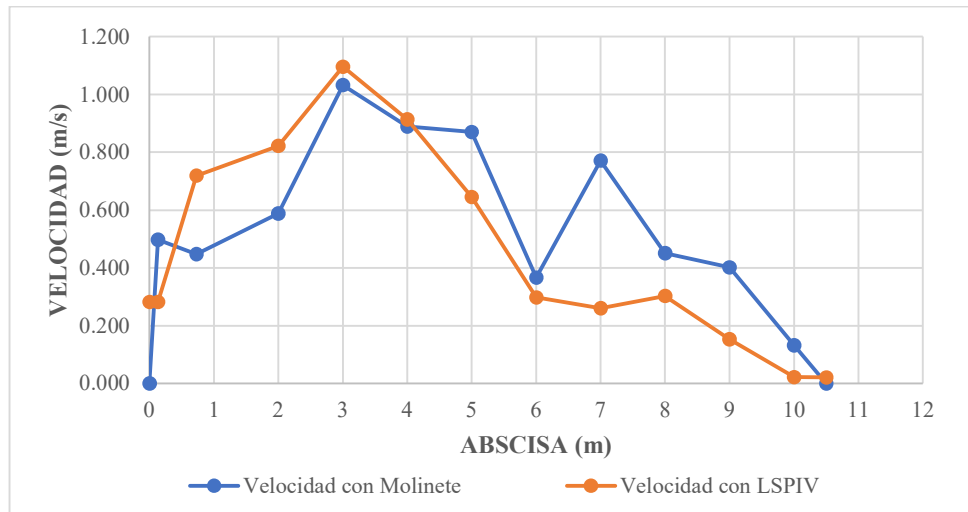


Figura 35 Velocidades con Molinete y LSPIV Tarquí AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

Los datos poseen un valor de 0.771 para el coeficiente de determinación R^2 , pese a parecer de manera visual que los datos están ajustados o cercanos entre ellos. En este punto de control se tuvo mayores velocidades en la zona inicial de la sección transversal con LSPIV por lo que presenta mayor variabilidad entre los datos de velocimetría. De la misma manera el error cuadrático medio nos indica que ambos modelos siguen la misma dirección con un valor cercano a cero de 0.0516.

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coeficiente de determinación R^2	0.7717053
Error Cuadrático Medio	0.051646
Desviación Media	0.048

Tabla 14. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

La tabla 15 nos muestra las velocidades a lo largo de la sección transversal tanto para el método del molinete como la técnica LSPIV. En esta tabla el error del caudal es mucho mayor con el valor del coeficiente de corrección inicial de 0.85, por ende, se debe tomar un valor cercano a 1 para compensar la presencia de zonas turbulenta y material sedimentario.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m ³ /s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m ³ /s)
0.00	0.000	0.2828	0.0027159	0.000	0.000
0.13	0.591	0.2828	0.0610042	0.498	0.107
0.73	0.508	0.7189	0.3414631	0.448	0.213
2.00	0.398	0.8225	0.3715479	0.588	0.266
3.00	0.393	1.0959	0.4306887	1.033	0.406
4.00	0.214	0.9138	0.1955532	0.889	0.190
5.00	0.346	0.6458	0.2234468	0.871	0.301
6.00	0.113	0.2977	0.0336401	0.367	0.041
7.00	0.221	0.2605	0.0575705	0.771	0.170
8.00	0.159	0.303	0.048177	0.451	0.072
9.00	0.065	0.1532	0.009958	0.402	0.026
10.00	0.065	0.0226	0.0011018	0.133	0.006
10.50	0.000	0.0213	8.653E-05	0.000	0.000
13.30	0	0.000	0.00	0.000	0.000
Total			1.762		1.7994

Tabla 15 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

Mediante la corrección (coeficiente de corrección $\alpha:1$) del caudal de salida a la técnica del LSPIV se llega a tener una descarga de 1.762 m³/s con un error del 2.07 %. Este punto es importante por la presencia de zonas de turbulencias, que de no ser tomadas en cuenta existiría una variación mucho mayor entre los valores tomados con el molinete y LSPIV (tabla 16).

Técnica	Caudal (m ³ /s)	Caudal con $\alpha:1$ (m ³ /s)	Error %
Molinete	1.7994248	1.7994248	-
LSPIV	1.762	1.762	2.0798225

Tabla 16 Corrección de descarga en Tarqui AJ Yanuncay (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

4.2.3 Medición en el río Yanuncay DJ río Tarqui

En el punto de confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay aguas abajo se llega a tener una batimetría como se muestra en la Figura 36, con abscisado cada metro y un ancho del cauce de 16.9 m. Las profundidades en la mayoría de la sección del cauce superar por mucho los 20 cm, por lo que el comportamiento de velocidad será óptimo.

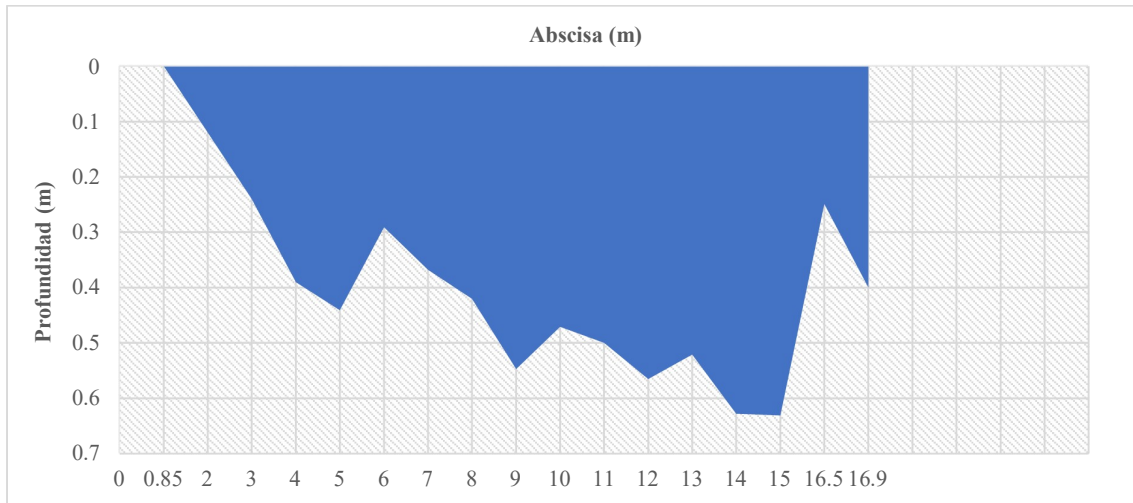


Figura 36 Batimetría en la sección Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

El sector del punto de confluencia se mantiene en el mismo sector de la primera campaña de medición. El campo vectorial de velocidades muestra la dirección del flujo, en donde se llega a notar velocidades relativamente bajas en los alrededores de las rocas presentes en la zona media del área de medición. La sección transversal se llegó a marcar en donde no se tenga turbulencias y material rocoso. El campo de velocidad muestra velocidades inferiores a m/s en ambos bordes del cauce y en la zona media velocidades entre 0.6 m/s y 1.2 m/s con mayor incidencia en los sectores donde el color tiene a rojo y mostrando el camino en donde la fuerza del agua es más fuerte que en otros puntos y de manera directa afectaría en el fondo rocoso del cauce arrastrando gran cantidad de sedimentos y erosionando el fondo del mismo.

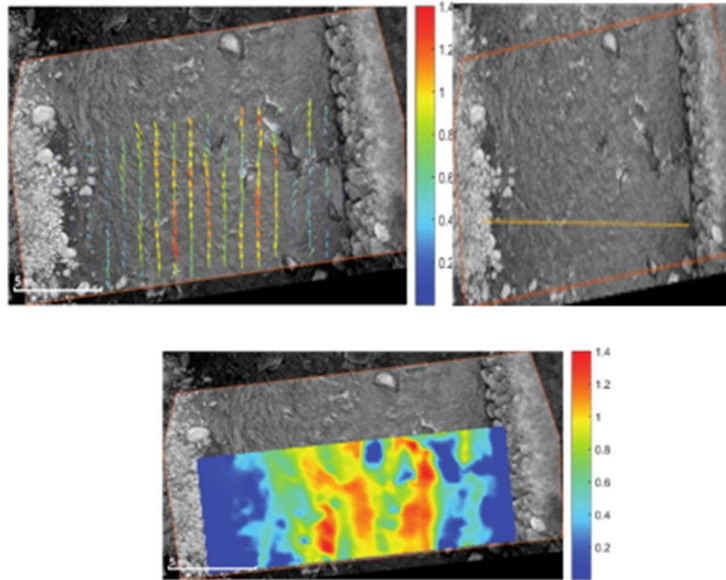


Figura 37. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay DJ Tarqui en m/s

La velocimetría en la zona de confluencia aguas abajo tiende a tener un comportamiento homogéneo en toda la sección transversal, teniendo puntos pico de velocidades en la zona media del cauce entre 0.8 y 1.2 m/s. Esto se debe a la profundidad del cauce y la poca presencia de material roco en el mismo.

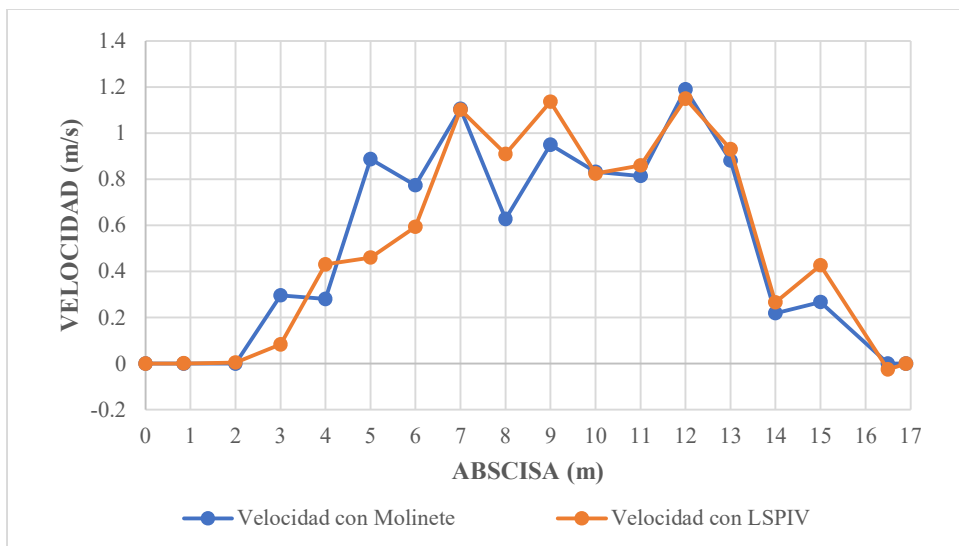


Figura 38 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente; Propia)

Los datos de velocimetría en esta sección se encuentran ajustados en la mayoría de la longitud de análisis evidenciando un coeficiente de determinación de 0.919 y un error cuadrático medio de 0.0278 (muy cercano a 0 significa mejor ajuste de los modelos).

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R²	0.919561689
Error Cuadrático Medio	0.027856238
Desviación Media	-0.038

Tabla 17. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

La tabla 18 ofrece de manera numérica las velocidades tanto con la técnica del molinete como del LSPIV, en donde las similitudes de velocidades son muy notorias. Este es la condición perfecta del flujo a analizar porque las profundidades son óptimas para el método del molinete y la poca presencia de flujo convergente hacen del método LSPIV viables.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m ³ /s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m ³ /s)
0	0	0	0.000	0	0.000
0.85	0	0	0.000	0	0.000
2	-0.12	0	0.000	0	0.000
3	-0.24	0	0.000	0.296	0.071
4	-0.39	0.3572	0.139	0.28	0.109
5	-0.441	0.4499	0.198	0.887	0.391
6	-0.291	0.4338	0.126	0.773	0.225
7	-0.368	0.9865	0.363	1.105	0.407
8	-0.42	0.866	0.364	0.627	0.263
9	-0.547	1.0739	0.587	0.95	0.520
10	-0.471	0.7603	0.358	0.832	0.392
11	-0.5	0.8646	0.432	0.814	0.407
12	-0.565	1.1328	0.640	1.19	0.672
13	-0.521	0.9267	0.483	0.881	0.459
14	-0.628	0.3298	0.207	0.219	0.138
15	-0.631	0.3819	0.301	0.267	0.211
16.5	-0.249	0	0.000	0	0.000
16.9	-0.4	0	0.000	0	0.000
Total			4.34		4.264

Tabla 18 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente: Propia)

Mediante el proceso de corrección de caudal de salida del método experimental del LSPIV se llega a tener un margen de error entre los 2 métodos del 1.774 % siendo una cifra muy óptima para analizar el comportamiento hidrodinámico en esta segunda campaña de medición. El caudal de salida del método del molinete hidráulico es de 4.26 m³/s y de la técnica LSPIV 4.34 m³/s.

Técnica	Caudal (m ³ /s)	Caudal con $\alpha:1$ (m ³ /s)	Error %
Molinete	4.2643313	4.2643313	-
LSPIV	4.34	4.34	-1.7744576

Tabla 19 Corrección de descarga en Yanuncay DJ Tarqui (Segunda Campaña) (Fuente: Propia)

4.3. Recolección de datos Tercera Campaña

La tercera campaña de medición abarcó las mediciones en un solo punto de control para analizar la técnica experimental LSPIV con trazadores flotantes (madera – viruta) a lo largo de la sección transversal del río Yanuncay AJ Tarqui, específicamente junto a la estación de bomberos de la ciudad de Cuenca.

4.3.1 Medición en el río Yanuncay AJ río Tarqui

La batimetría en la sección del río Yanuncay AJ Tarqui se encuentra seccionado cada metro, con un ancho final de 15.55 m. La mayor parte de las profundidades se mantienen superior a los 20 cm, por tanto, se llega a tener una excelente sección de análisis. La vista de la sección está de aguas abajo hacia aguas arriba (Figura 39).

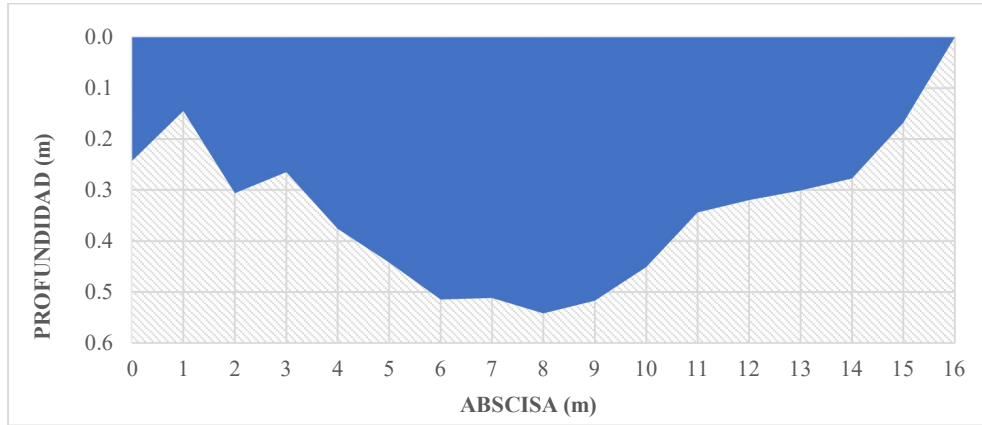


Figura 39 Batimetría en la sección Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia)

Esta sección en particular es interesante por la nula presencia de material rocoso y poseer profundidades mayores a 0.3 m. A lo largo del área de muestreo el campo de velocidad vectorial nos muestra que el sentido del flujo es casi paralelo al sentido del cauce a excepción de los bordes, en donde el flujo tiende a querer chocarlos de forma diagonal. La sección transversal se encuentra dentro del área deseada y es considerada óptima. En ambos bordes del cauce las velocidades predominantes son menores a 0.1 m/s y aumentando conforme se acerca al centro del cauce. La línea que se tiñe de rojo muestra en camino en donde la fuerza del agua es mucho mayor que en otros sectores indicando de forma indirecta que existe mayor desgaste en el fondo en esta zona.

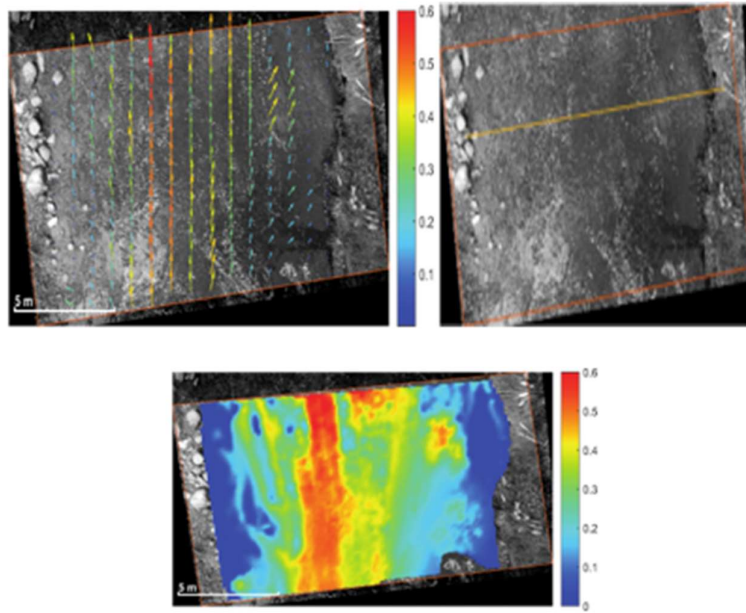


Figura 40. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio (inferior) Yanuncay AJ Tarqui en m/s

En la Figura 42, las velocidades se encuentran homogenizados en su mayoría desde la abscisa 2 m, desde este punto hacia atrás existe una zona de estancamiento en donde las velocidades se mantienen cercanas a cero con la técnica LSPIV, debido a la presencia de maleza y escombros de madera.

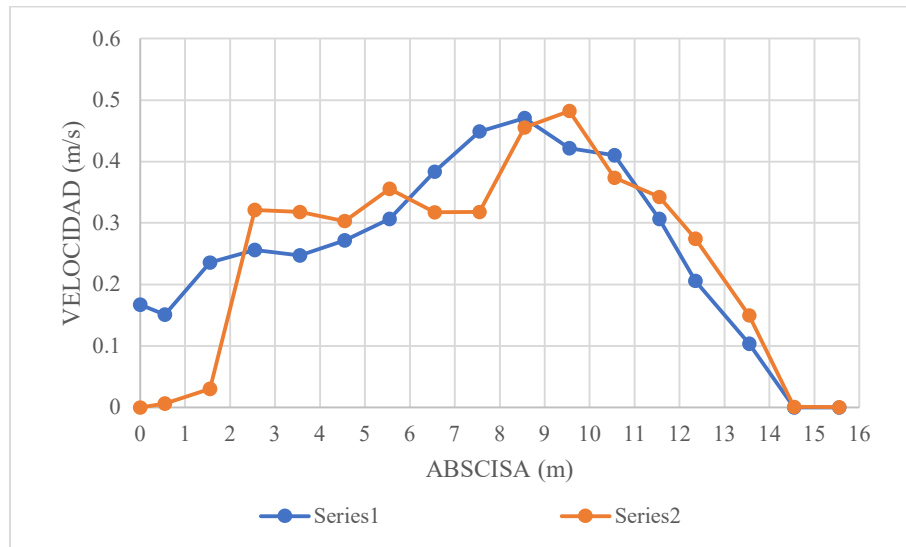


Figura 41 Velocidades con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente: Propia)

El ajuste de los datos tomados con molinete y utilizando la técnica LSPIV en una zona sin presencia de turbulencias y/o estancamiento presentan similitudes a lo largo de la sección transversal (coeficiente de determinación R^2 de 0.843 y un error cuadrático medio de 0.0106).

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.8434038
Error Cuadrático Medio	0.0106484
Desviación Media	0.026

Tabla 20. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

En la tabla 21, se observa las distribuciones de velocidad del método del molinete hidráulico y método LSPIV, en donde el caudal inicial de salida con la primera técnica es de $1.7419 \text{ m}^3/\text{s}$ y con LSPIV $1.694 \text{ m}^3/\text{s}$. Se aprecia velocidades cercanas a cero con LSPIV, es este aspecto se debe procurar elegir zonas sin estancamiento.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m^3/s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m^3/s)
0	0	0	0	0.167	0.008

0.55	-0.168	0.0061	0.000885	0.151	0.022
1.55	-0.277	0.0302	0.010165	0.2355	0.079
2.55	-0.301	0.3214	0.085171	0.256	0.068
3.55	-0.32	0.3177	0.10751	0.2475	0.084
4.55	-0.344	0.3029	0.133882	0.272	0.120
5.55	-0.451	0.3553	0.18298	0.3065	0.158
6.55	-0.517	0.3174	0.162509	0.3835	0.196
7.55	-0.542	0.3179	0.172302	0.449	0.243
8.55	-0.512	0.4553	0.23539	0.4705	0.243
9.55	-0.515	0.4822	0.217472	0.4215	0.190
10.55	-0.442	0.3737	0.128553	0.4105	0.141
11.55	-0.376	0.3422	0.109504	0.3065	0.098
12.35	-0.265	0.2741	0.082504	0.206	0.062
13.55	-0.306	0.1495	0.041412	0.1035	0.029
14.55	-0.145	0.00052138	6.79E-05	0	0.000
15.55	-0.243	0.0001127	1.3E-06	0	0.000
Total			1.7419		1.694

Tabla 21 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia)

Con la ayuda del factor de corrección $\alpha=1$ se llega a reducir el caudal de salida con el LSPIV a 1.694 m³/s, y con un error final de 2.752 %. Este nivel de precisión es muy óptimo para garantizar una buena toma de muestras en campo.

Técnica	Caudal (m³/s)	Caudal con $\alpha:1$ (m³/s)	Error %
Molinete	1.7419518	1.7419518	-
LSPIV	1.694	1.694	2.7527627

Tabla 22 Corrección de descarga en Yanuncay AJ Tarqui (Tercera Campaña) (Fuente; Propia)

4.4. Recolección de datos Cuarta Campaña

4.4.1 Medición en el río Tarqui AJ río Yanuncay

La última campaña (cuarta) abarca una zona en donde las profundidades son óptimas para obtener velocidades al 20%, 60% y 80% a partir de la superficie del cauce. No existe presencia de zonas de estancamiento o material rocoso en la sección de análisis. El abscisado está cada metro como nos sugiere la Norma ISO-748 y en ancho total del cauce es de 8.87 m. La vista de la batimetría está de aguas abajo hacia aguas arriba.

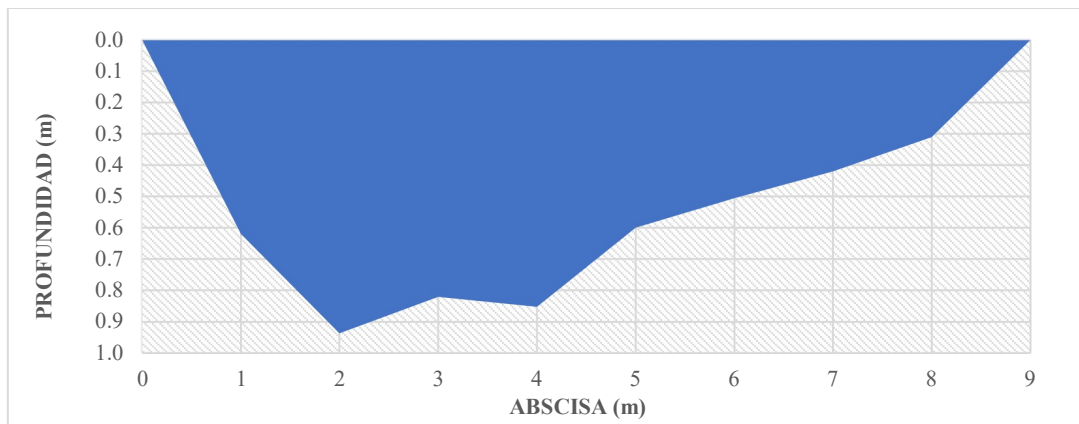


Figura 42. Batimetría en la sección Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)

Al igual que la tercera campaña, este sector se caracteriza por la nula presencia del material rocoso en la superficie del cauce. El campo vectorial de velocidades muestra el sentido del flujo paralelo al cauce en donde los vectores tienden a unirse al final del área de estudio en donde la anchura del cauce se reduce a consideración de aguas arriba en donde la anchura es mucho mayor. La sección transversal indica en donde se realiza la batimetría para conocer y comparar la descarga del cauce con LSPIV y los calculados con el método del molinete. El campo de velocidad indica velocidades inferiores a 0.1 m/s en ambos bordes del río a lo largo de la zona de estudio. En el centro del cauce se tiene la mayor distribución de velocidades que están en el orden del 0.3 m/s al 0.45 m/s, y finalmente se incrementa a la salida de la zona de interés debido a la reducción en la anchura del río. Cabe mencionar que

este sector posee altura del agua mayores a 0.5 m, y por ello las velocidades no llegan a superar 1 m/s como en otros puntos de análisis, en donde las profundidades fueron menores.

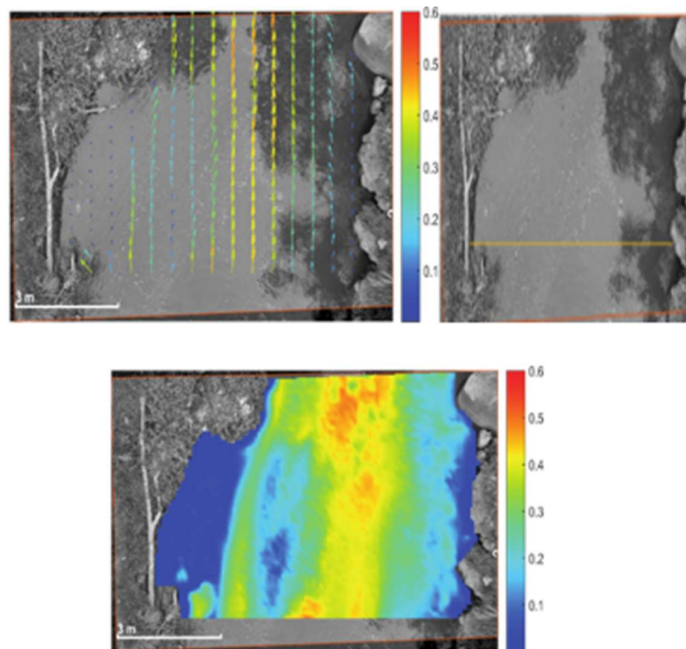


Figura 43. Campo de velocidad vectorial (superior izquierda), sección de control (superior derecha), y campo de velocidad promedio(inferior) Tarqui AJ Yanuncay en m/s

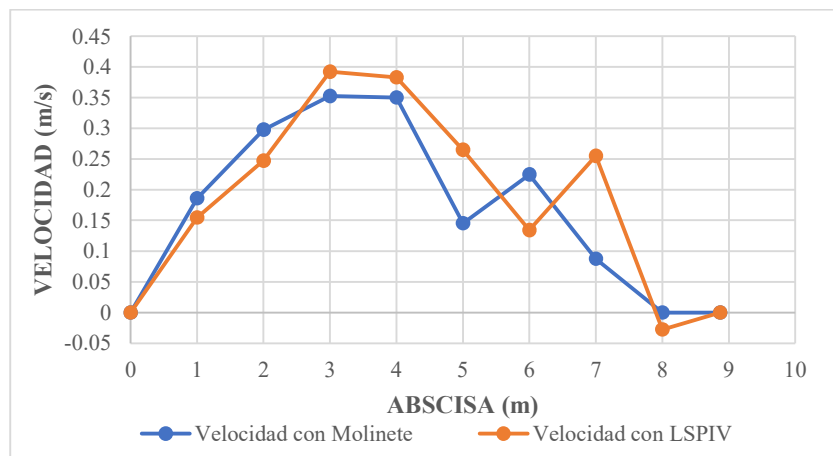


Figura 44 Velocidades con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente; Propia)

La última campaña de control presentó un coeficiente de determinación R^2 presenta un valor de 0.947 y un error cuadrático medio de 0.00281, el ajuste de datos se puede llegar a considerar perfecto en esta zona.

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R²	0.947586
Error Cuadrático Medio	0.0028186
Desviación Media	-0.0315

Tabla 23. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría observados y medidos (LSPIV)

Tanto la Figura 44 como la tabla 24, en conjunto nos dejan ver en efecto la distribución de velocidades de las técnicas de estudio (Molinete hidráulico y LSPIV), en donde las similitudes en el comportamiento están bien definidas y homogéneas en toda la sección. Este comportamiento ideal es el esperado en las mediciones en el caso de LSPIV en donde la nula presencia de material rocoso o zonas de estancamiento no producen problemas para validar la técnica respecto a otros sistemas de medición.

Abscisa (m)	Profundidad (m)	Velocidad con LSPIV (m/s)	Caudal con LSPIV (m ³ /s)	Velocidad con molinete (m/s)	Caudal con molinete (m ³ /s)
0	0	0	0	0	0.000
1	-0.6200	0.2153	0.133486	0.186	0.115
2	-0.9370	0.2812	0.2634844	0.2975	0.279
3	-0.8210	0.4047	0.3322587	0.3525	0.289
4	-0.8520	0.3472	0.2958144	0.35	0.298
5	-0.6000	0.1699	0.10194	0.1455	0.087
6	-0.5050	0.2414	0.121907	0.2245	0.113
7	-0.4200	0.1689	0.070938	0.0875	0.037
8	-0.3100	0.1297	0.0375935	0	0.000
8.87	0	0	0	0	0.000
Total			1.103		1.2191

Tabla 24 Velocidades, caudales y batimetría con Molinete y LSPIV Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente;

Propia)

El coeficiente de corrección se mantiene en 1 para el análisis de la técnica experimental LSPIV, dando un caudal de 1.103 m³/s, con un porcentaje de error del 9.523 % respecto a la técnica del molinete, siendo un margen óptimo entre ambas técnicas. Estos casos

de estudios son importantes para poder analizar puntos y zonas en donde sea viable utilizar la técnica LSPIV.

Técnica	Caudal (m ³ /s)	Caudal con $\alpha:1$ (m ³ /s)	Error %
Molinete	1.2191025	1.2191025	-
LSPIV	1.103	1.103	9.5236045

Tabla 25 Corrección de descarga en Tarqui AJ Yanuncay (Cuarta Campaña) (Fuente: Propia)

4.5. Análisis del coeficiente de Manning

El río Tarqui, presenta variaciones en su coeficiente de Manning debido a diferentes características de los causes y la densidad de la vegetación en las márgenes del río. En las áreas donde su cause está compuesto de arena-grava, el coeficiente de Manning varía entre 0,030 y 0,035, lo que significa que presenta una resistencia moderada al flujo y el agua fluye con relativa rapidez. Estas características son comunes para canales con menos obstrucciones y con un cauce más uniforme. Por el contrario, en las áreas donde hay vegetación densa en las márgenes del río, “n” aumenta a 0,040. Esto significa que la resistencia al flujo es mayor en comparación a las zonas donde la vegetación es menos densa. Tres es el resultado de la interacción del agua con las raíces y plantas que crecen en el canal, lo que aumenta la rugosidad efectiva en la zona y, en consecuencia, reduce la velocidad del flujo.

Por otro lado, el río Yanuncay tiene un coeficiente de Manning generalmente más alto que el Tarqui en las secciones estudiadas. En áreas con cauce predominantemente rocoso, el coeficiente de Manning varió entre 0.040 y 0.045. Esto se asocia con una mayor fricción en áreas de lecho de rocas y grandes bloques que actúan como obstáculos naturales que aumentan la rugosidad del lecho del río, incrementando la complejidad en el flujo. Además, en las secciones donde el río tiene curvas pronunciadas y está cubierto de vegetación densa, el coeficiente “n” llegó a hasta 0.050. En estas áreas, la variación se puede atribuir a dos

factores: la propia morfología del cauce y la turbulencia adicional introducida por las curvas, disminuyendo aún más la velocidad de flujo.

El río Yanuncay, con predominancia de cauce rocoso y mayor rugosidad, se encuentra con el río Tarqui, que tiene un cauce suave y menor rugosidad. Por ello, la unión de los cauces puede llegar a generar un cauce mixto a la altura de la confluencia, lo que probablemente va a aumentar el coeficiente de Manning del nuevo canal. Las rocas y vegetación del Yanuncay contribuirán a aumentar la rugosidad y esfuerzo cortante del flujo, aun cuando el Tarqui aporte un lecho más uniforme y menos rugoso. Debido a esto se asocia al coeficiente de Manning entre 0.38 a 0.45

4.6. Morfología de los ríos Tarqui y Yanuncay

El río Tarqui, en el sur de la cuenca de Cuenca, es otro afluente importante que pertenece a la ciudad de Cuenca. Hay una sección específica en el tramo trasero del río cercano a la Universidad del Azuay (UDA). En esta área, el cauce del Tarqui consiste en partículas de arena y grava, con secciones de grava más gruesa en algunas áreas. Reporta que el diámetro medio de las partículas en el canal fluvial es de 5 mm en áreas de grava y 0.5 mm en áreas de arena. Esto proporciona una velocidad promedio más alta porque un cauce menos rugoso ofrece menos resistencia al movimiento. El perfil perpendicular del río Tarqui es relativamente moderado para este río y se ubica en el margen del 0.2% y el 0.5%. Esto proporciona un flujo de agua estable y moderado, que es una realidad típica en un área completamente urbanizada, donde las pendientes han sido alteradas por los arreglos humanos. Los márgenes del río Tarqui en esta área están parcialmente pobladas, pero la urbanización ha cambiado la morfología natural. Esto puede afectar los patrones de flujo y deposición, incrementando el peligro de erosión en un canal angosto donde el agua se desplaza a 1.2 m/s.

Por otra parte, el río Yanuncay, tiene un perfil ligeramente diferente al del Tarqui. Es más rugoso y rocoso, con grandes rocas redondeadas, su diámetro alcanza hasta 20 cm en el cauce, lo que agrega complejidad al flujo y resistencia a él. El cauce del Yanuncay también tiene un coeficiente de Manning más alto, por ejemplo, un valor promedio es de 0,045, en comparación con 0,035 en Tarqui, lo que indica una dificultad relativamente mayor de movimiento de agua. El perfil del río también es más irregular, con más curvas pronunciadas que causan turbulencia. Algunas pendientes, para ser más precisas, pueden alcanzar hasta 1%, lo que aumenta la erosión y la sedimentación. Además, el río en general parece ser más ancho y profundo, en promedio 12 metros de ancho y 2 de profundidad, respectivamente. Por lo tanto, a pesar de ser más profundo, el aumento en la rugosidad reduce el flujo a 0,8 m/s.

En la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, cerca de la UDA, se observan cambios significativos en la morfología debido a la combinación de los dos cauces. El cauce más fino y uniforme del Tarqui se mezcla con el cauce más rugoso y rocoso del Yanuncay, creando un nuevo tramo con una morfología heterogénea. En esta área, se alternan zonas de sedimentación de sedimentos finos con áreas más rugosas. Por ejemplo, se ha observado que la combinación de sedimentos puede llevar a una sedimentación promedio de 30 kg/m² en zonas de acumulación.

La confluencia forma un canal más amplio y profundo, con un ancho promedio de 15 metros y una profundidad que puede alcanzar los 3 metros. Este nuevo tramo muestra características de flujo más complejas, como vórtices y turbulencias, especialmente en los primeros metros después de la confluencia. La velocidad del flujo en esta sección puede disminuir a 0.6 m/s debido a la mayor rugosidad combinada y a la mayor área de contacto con los sedimentos, lo que incrementa la sedimentación en áreas donde el flujo pierde energía. Estas dinámicas afectan la morfología del canal a lo largo del tiempo y la estabilidad de las márgenes.

En la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay, surgen importantes diferencias en la morfología debido a la combinación de dos cauces. El Tarqui, con un cauce más fino y uniforme, se combina con el cauce más rugoso y con mayor roca del Yanuncay. Como resultado, en este tramo, nace una morfología heterogénea que intercala zonas de sedimentación de sedimentos finos con áreas de más rugosidad. En este caso, el cauce se vuelve más amplio y profundo, con un ancho promedio de 15 m y una profundidad que puede alcanzar los 3 m. También muestra morfologías más complejas, como vórtices y turbulencias, especialmente en los primeros metros después de la confluencia. La velocidad del flujo en este tramo se reduce a 0.6 m/s debido a una mayor rugosidad combinada y a una mayor superficie de contacto con los sedimentos, lo que incrementa la sedimentación en las áreas donde el flujo pierde energía. Desde luego, esta y las demás dinámicas descritas afectan la morfología del cauce a lo largo del tiempo, así como la estabilidad de las márgenes.

4.7. Comparación del modelo hidrodinámico con LSPIV

Para comparar los datos obtenidos es necesario simular un modelo computacional con el software HEC-RAS mencionado en el capítulo 3, para comprobar que la técnica LSPIV tiene un correcto funcionamiento respecto al modelo computacional 2D en la confluencia de los ríos Tarqui y Yanuncay. Para este caso se usará la segunda campaña la cual contiene los siguientes datos de caudales corregidos mediante la técnica LSPIV.

Sección	Caudal (m ³ /s)	N Manning	Pendiente
TAQUI	1.762	0.038	0.021
YANUCAY	2.622	0.045	0.024
CONFLUENCIA	4.34	0.04	0.02

Tabla 26 Datos de entrada para la modelación 2D (Fuente; Propia)

A partir de estos datos, se genera la modelación 2D para comprobar que los caudales en la confluencia sean igual al caudal de salida obtenidos con LSPIV. Con los caudales de ambos ríos que alimenta la confluencia se analiza las velocidades a lo largo de todo el tramo hasta el punto de control final, teniendo en cuenta el comportamiento de flujo en las orillas (casos de inundación o estiajes). (Anexo 15)

De esta forma se obtiene que la descarga al final de la sección es de $4.34 \text{ m}^3/\text{s}$, teniendo relación directa con el caudal obtenido mediante la técnica LSPIV, teniendo un error de 3.93 %. Es decir, que se puede validar tanto el modelo computacional como el modelo experimental. Es importante destacar que, mediante esta validación de datos, se puede analizar 2 cauces antes de un punto de confluencia y mediante la modelación 2D verificar el comportamiento de la sección, como el caso de inundación, erosiones o para protecciones de rivera.

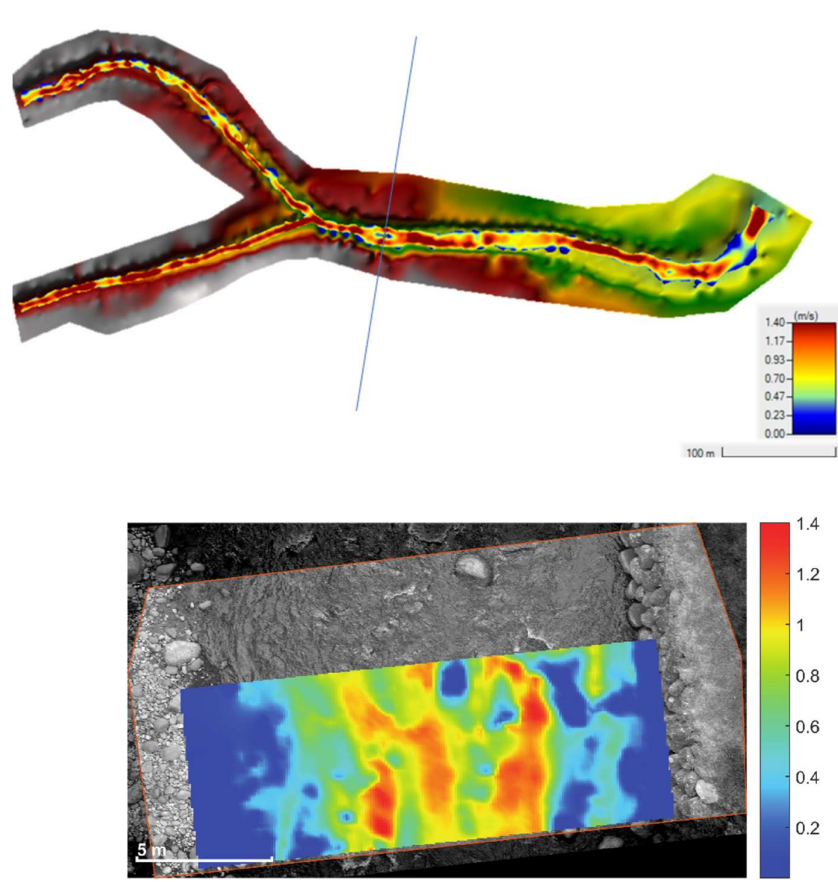


Figura 45 Modelación 2D aguas abajo de confluencia y campo de velocidad obtenido en campo (LSPIV) – Segunda Campaña (Fuente; Propia)

Como se muestra en la Figura 45, las velocidades en el punto de confluencia aguas abajo, en la zona media de la sección superan los 2.5 m/s, esto debido a la gran velocidad que viene del río Tarqui. Dicho fenómeno llegaría a crear grandes cantidades de sedimentos en el punto de confluencia. Cabe destacar que para esta simulación las velocidades en las orillas del punto de confluencia en aguas abajo no superan la velocidad de 0.5 m/s, tal como se puede apreciar en el campo de velocidad promedio de LSPIV. En ambos modelos se llega a apreciar 2 franjas (colores que tienden a rojo) con velocidades superiores a 1 m/s.

En las secciones de control se ubican las secciones transversales correspondientes a las 4 campañas de mediciones, en donde se llega a tener el perfil de velocimetría tanto del modelo hidrodinámico como de LSPIV.

Como se puede apreciar en la figura 46, se tiene la sección transversal en el punto de control Yanuncay AJ Tarqui donde se puede llegar a apreciar los picos de velocidades en ambos modelos de modelación hidrodinámica y LSPIV, en el primer pico con valores de aproximadamente 0.54 m/s y 0.6 m/s, respectivamente. De la misma manera se tiene un segundo pico de velocidades en la abscisa 12 m con valores aproximados de 0.6 m/s y 0.69 m/s, respectivamente. La variabilidad en la sección media donde el punto más bajo del primer modelo está con 0.3 m/s y el segundo con 0.1 m/s se debería a la batimetría en donde no se tiene la batimetría completa para LSPIV pero se puede validar el modelo por la gran similitud entre ambos modelos, cabe mencionar que en el modelo hidrodinámico intervienen factores hidrodinámicos como la pendiente del cauce y el n de Manning (rugosidad del fondo y laterales) como se puede ver en la tabla 27, el valor de R^2 es de 0.55 y el error cuadrático medio de 0.0759 dando a entender un moderado ajuste entre los datos.

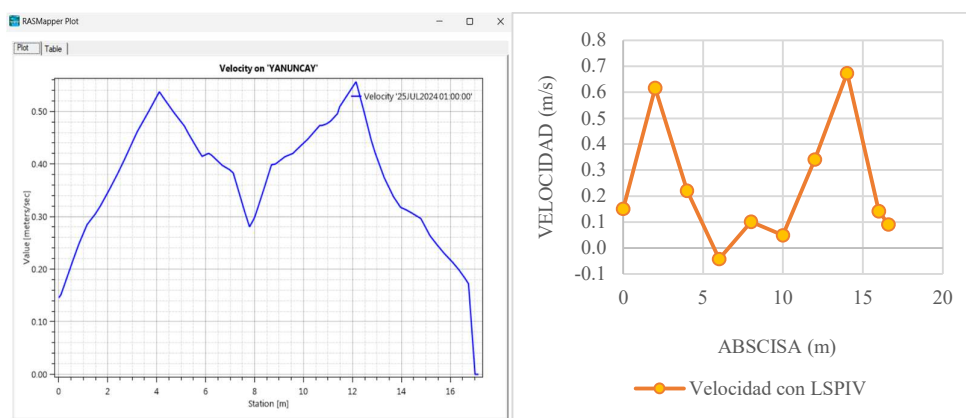


Figura 46. Velocidad de sección de control Yanuncay AJ Tarqui de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Primera Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.55041
Error Cuadrático Medio	0.075954
Desviación Media	0.109

Tabla 27. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

En la comparación del modelo hidrodinámico con LSPIV se puede observar en la figura 47 que, ambas gráficas tienen el mismo comportamiento de forma parabólica con

velocidades punta en el en la zona media del cauce con valores en el rango de 0. 65 m/s y 0.75 m/s. En esta sección la variabilidad de los datos se encuentra ajustada con un coeficiente de determinación cercano a 1 ($R^2=0.825$) y error cuadrático medio de 0.0406. como lo indica la tabla 28, evidenciando un óptimo ajuste de datos. La batimetría de la sección transversal no presenta exceso de material rocoso por lo que en material del fondo no causa alteraciones en el modelo hidrodinámico, así como en el modelo LSPIV.

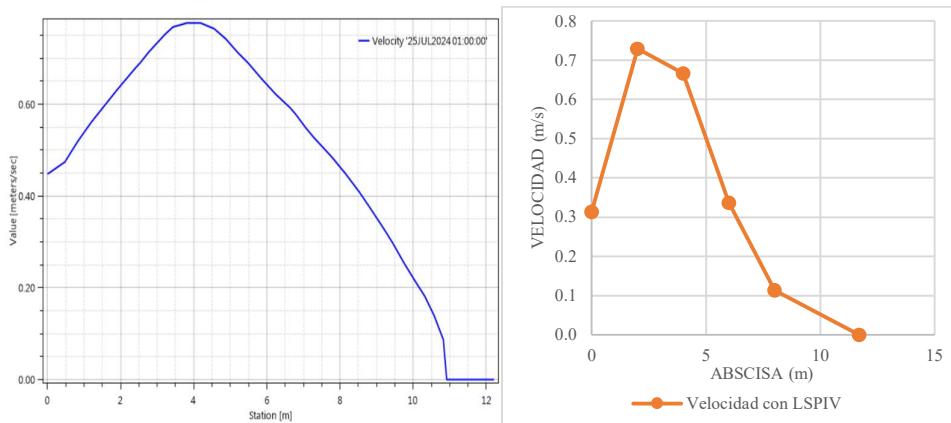


Figura 47. Velocidad de sección de control Tarquí AJ Yanuncay de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) – Primera Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.82518
Error Cuadrático Medio	0.0406
Desviación Media	2.173

Tabla 28. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

En la seccion de confluencia se tiene valores con cierta homogeneidad o casi similares. Las velocidades en la parte media de la seccion transversal se pueden aproximar a un rango de 0.2 m/s y 0.5 m/s, siendo el pico mas alto de velocidad 1.4 m/s en la grafica izquierda (modelo hidrodinamico) y de 1.25 m/s con LSPIV. Las batimetrías juegan un papel importante en el modelo hidrodinamico por la interacion del flujo del cauce con el fondo de mismo. Las velocidades tienden a tener el mismo comportamiento a lo largo de la seccion transversal como se observa en la figura 48. El ajuste de datos está en el orden de $R^2=0.605$ y error cuadrático medio de 0.36.

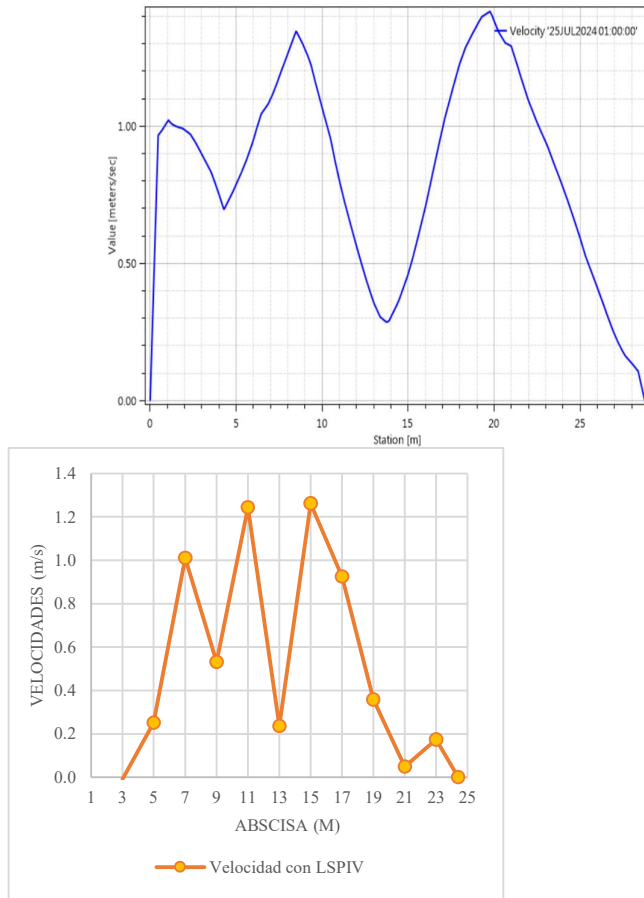


Figura 48. Velocidad de sección de control aguas abajo de la confluencia de modelo de modelación hidrodinámico (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Primera Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R²	0.60578
Error Cuadrático Medio	0.36086
Desviación Media	0.273

Tabla 29. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

En la sección de control Yanuncay AJ Tarqui se tiene valores picos en la modelación hidrodinámica para la parte media esto debido a la poca profundidad del cauce y se tiene exceso de turbulencias no solo en esta zona sino en la mayoría de la sección de control. Pese a esto, LSPIV logra aproximarse de cierta forma al comportamiento velocimetrado del cauce con velocidades máximas que se encuentran en el rango de 0.8 m/s y 0.95 m/s, tal como se parecía en la figura 49.

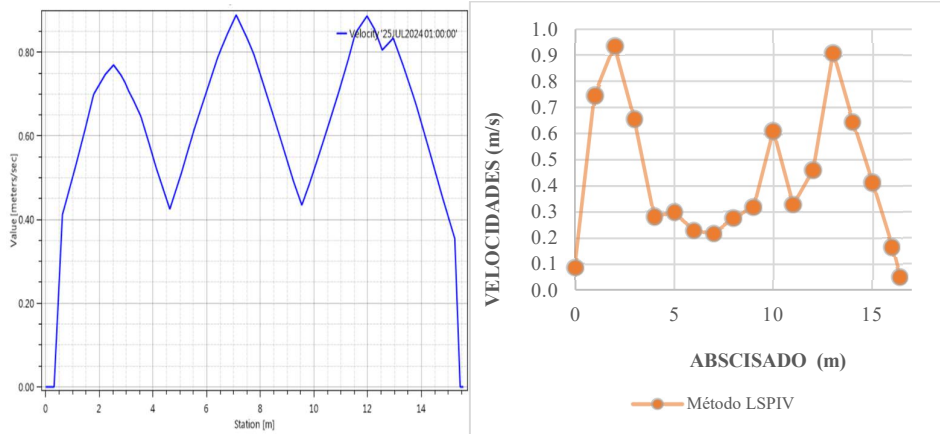


Figura 49. Velocidad de sección de control Yanuncay AJ Tarqui de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Segunda Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.54155
Error Cuadrático Medio	0.0801
Desviación Media	0.114

Tabla 30. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

Para la sección de control de Tarqui AJ Yanuncay correspondiente a la segunda campaña de medición se tiene variabilidad entre los datos del modelo hidrodinámico referente al modelo proporcionado por LSPIV. En el modelo izquierdo existe una zona de velocidades pico que debería decrecer justo al final de la sección transversal según LSPIV, pero cabe mencionar que esta pequeña zona se encuentra con exceso de material rocoso por lo que las velocidades reales serían un poco mayores. En la figura 50 se puede llegar a observar ambos modelos analizados. El ajuste del coeficiente de determinación $R^2=0.623$ y error cuadrático medio de 0.0769 muestra ajuste moderado de los datos a lo largo de la sección transversal.

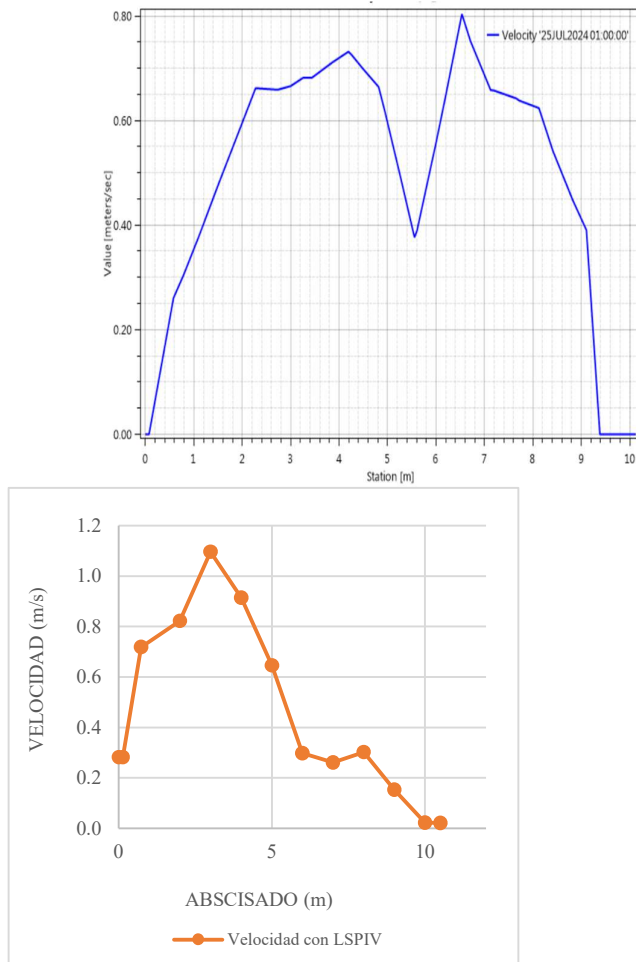


Figura 50. Velocidad de sección de control Tarqui AJ Yanuncay de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Segunda Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R²	0.623
Error Cuadrático Medio	0.07698
Desviación Media	-0.049

Tabla 31. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

Para la sección de la confluencia aguas abajo de la misma, se encuentra una zona de la sección transversal en donde las velocidades tanto del modelo hidrodinámico como del LSPIV varían de manera abrupta. Dicho comportamiento se debería a la poca profundidad de esta zona en particular y la presencia de una zona de convergencia del flujo en el cauce lo que produce que el agua recircule constantemente, en donde este fenómeno es perjudicial para LSPIV por que en el procesamiento de las velocidades en las celdas respectivas se tomarían

velocidades negativas, que al final en el promedio de velocidades se reduce su velocidad real. En el resto de la sección transversal existe una homogeneidad de los datos a partir de la zona media hasta el final de la sección transversal, en donde las velocidades oscilan los valores de 0.8 m/s y 1.2 m/s como se aprecia en la figura 51. Los datos se ajustan casi en la mayoría de datos en ambos modelos con un coeficiente de determinación de $R^2=0.599$ y un alto error cuadrático medio de 0.1429.

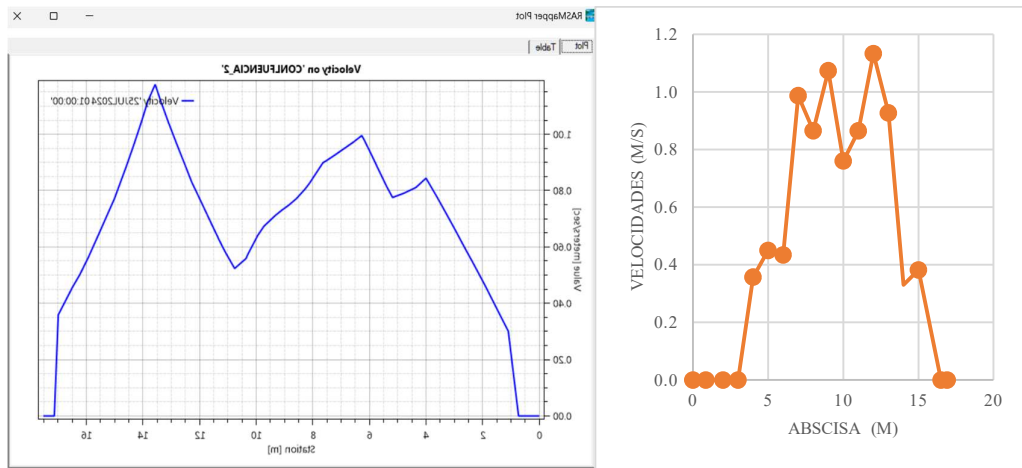


Figura 51. Velocidad de sección de control aguas abajo de la confluencia de modelo de modelación hidrodinámico (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) -Segunda Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R^2	0.59963
Error Cuadrático Medio	0.1429
Desviación Media	0.167

Tabla 32. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

La tercera campaña de medición es óptima en cuanto a los resultados de mediciones ya que tanto LSPIV como el modelo hidrodinámico arrojan velocidades similares y con el mismo comportamiento en toda la sección transversal con velocidades punta que se encuentran en el rango de 0.3 m/s y 0.5 m/s, tal como se aprecia en la figura 52. Esta tendencia y orden de datos se puede considerar ajustada en la mayoría de los puntos por el coeficiente de determinación $R^2=0.723$ y un bajo error cuadrático medio de 0.022 indicando que el ajuste está correcto.

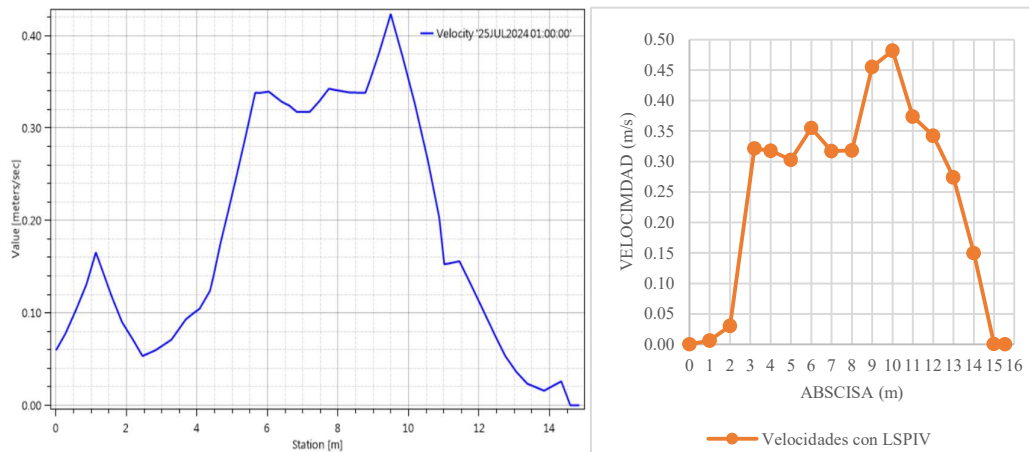


Figura 52. Velocidad de sección de control Yanuncay AJ Tarqui de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) - Tercera Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R²	0.7232
Error Cuadrático Medio	0.02265
Desviación Media	-0.082

Tabla 33. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

Como en el caso de la tercera campaña de medición se tiene picos punta con valores similares y en los mismos sectores para el modelo hidrodinámico y para LSPIV. Este fenómeno se puede validar por la selección de un nuevo punto de control que no se encuentra con flujos turbulentos, zonas de entancamiento ni convergencia en el sector de análisis. Como se presentó en los campos vectoriales proporcionados por LSPIV, los vectores de velocidad siguen el curso natural del río y aumenta la precisión de la técnica. En este sector no existe profundidades bajas por lo que las interacción entre el agua y el fondo del cauce no llega a ser crítico en el modelo hidrodinámico y arrojando resultados homogéneos de velocidad en ambas técnicas. Los valores de velocidad punta se encuentran en el rango de 0.3 m/s y 0.42 m/s en el primer sector, y en el segundo sector velocidades entre 0.2 m/s y 0.25 m/s como se aprecia en la figura 53. Este comportamiento se puede ajustar con los valores estadísticos de la tabla 34.

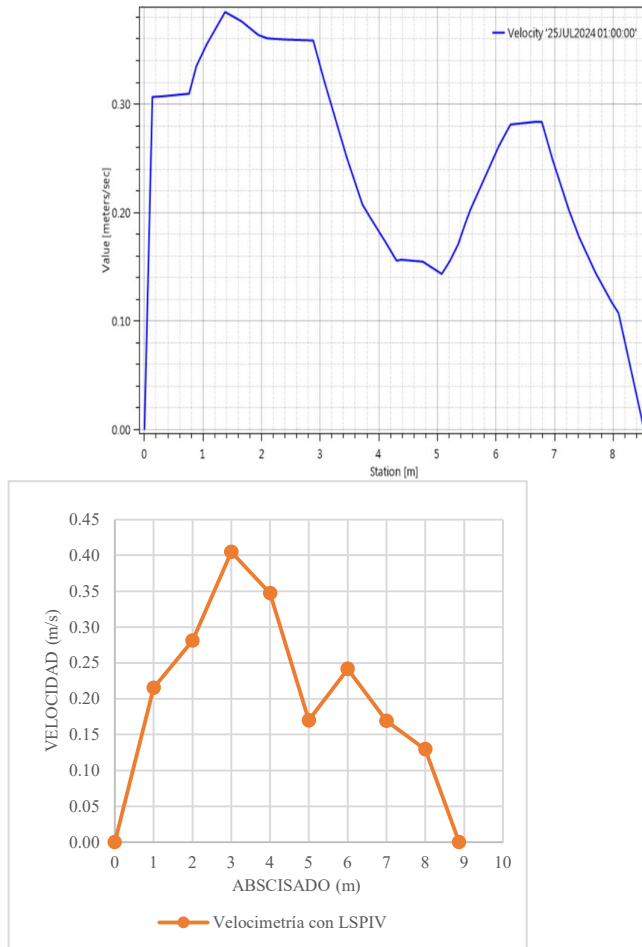


Figura 53. Velocidad de sección de control Tarqui AJ Yanuncay de modelación hidrodinámica (izquierdo) y modelo observado (LSPIV) - Cuarta Campaña

CRITERIOS DE ANALISIS ESTADISTICOS	
Coefficiente de determinación R²	0.78711
Error cuadrático Medio	0.00685
Desviación Media	0.0022

Tabla 34. Criterios estadísticos de semejanza de velocimetría hidrodinámico y medidos con LSPIV

CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

La técnica LSPIV ha demostrado ser efectiva para la medición de la velocidad superficial en los ríos Tarqui, Yanuncay y en su punto de confluencia aguas abajo. Es de vital importancia destacar que puede ser utilizado de manera efectiva en épocas de crecidas, aunque las condiciones examinadas en este estudio corresponden a períodos de aguas bajas y medias. Las imágenes de alta resolución permiten rastrear con precisión el movimiento de las partículas en la superficie del agua, y brindaron información confiable sobre la velocidad del flujo. En la zona de confluencia, las velocidades superficiales se distribuyen de manera heterogénea, según los resultados de modelación numérica 2D y comparando los resultados de campos de velocidad en los puntos de control proporcionados con LSPIV se llega a tener el mismo comportamiento, dando a entender que LSPIV es confiable para analizar condiciones hidrodinámicas (2D).

La técnica LSPIV se puede validar con gran precisión aplicando el factor de corrección (α :0.85 como dato de partida para zonas con flujo constante, y un valor de 1 para zonas de alta turbulencia), en donde se tiene que evitar zonas con profundidades muy bajas menores a 0.2 m y la presencia de rocas. Este fenómeno puede terminar en la pérdida de precisión de la técnica (para estos casos se recomienda tomar valores de α cercanos a 1). Dentro de este estudio se llegó a tener precisión 1.26% del en el río Tarqui, 2.75% en el río Yanuncay, y 1.77% en el punto de confluencia planteada en el estudio del caso, en donde los mejores datos se obtuvieron en las 2 últimas campañas de medición debido a que se eligieron zonas de control sin islas de material sedimentario, turbulencias y flujos secundarios. Es

decir, es importante la selección del sitio idóneo de muestreo como para evitar errores de vectorización de la técnica LSPIV.

Mediante la modelación hidrodinámica en ambos cauces (rio Tarqui AJ Yanuncay y rio Yanuncay AJ Tarqui) que alimentan el punto de confluencia (rio Yanuncay DJ Tarqui – puente de la UDA) se llegó a tener una descarga de $4.34 \text{ m}^3/\text{s}$ que comparado con el caudal tomado in situ mediante la técnica del molinete hidráulico se obtuvo un caudal de $4.264 \text{ m}^3/\text{s}$. En este punto es importante mencionar la precisión de la técnica experimental LSPIV para calcular valores de descarga en cauces en los puntos de confluencia en distintos ríos de montaña del país. Incluso, la modelación hidrodinámica nos muestra los campos de velocidad del flujo en el punto de confluencia y en el punto de estudio de este trabajo investigativo, en donde se llega a destacar el comportamiento del flujo en la zona media del área en estudio. Es decir, 2 caminos en donde el flujo tiene mayor fuerza o velocidad hidrodinámica, en el caso de LSPIV se enmarca de un color rojo intenso y en la modelación hidrodinámica con la misma tonalidad con rango de velocidad de 1 m/s a 1.4 m/s . Los valores están dentro del rango de precisión requerido. En las 5 secciones de control se tuvieron resultados similares entre el modelo hidrodinámico 2D y LSPIV respecto al perfil de velocidad.

Finalmente, LSPIV se puede aplicar directamente en cauces con caudales altos como inundaciones para verificar el comportamiento hidrodinámico en la confluencia como en las orillas de los cauces en donde el porcentaje de error es relativamente bajo. Los puntos de control deben estar bien definidos para aumentar la precisión de la técnica LSPIV que, se puede llegar a implementar en el país como medidas viables para analizar el comportamiento de los ríos y afluentes de difícil acceso y zonas vulnerables a inundaciones, siendo un método económico y eficaz en cuanto a protección de los equipos de medición. Los valores de n de Manning se calcularon de manera experimental en donde se llega a tener diversos valores para los ríos Tarqui, Yanuncay y Yanuncay DJ Tarqui de 0.038, 0.045 y 0.04,

respectivamente, en donde se resalta que la morfología de los cauces provoca distintos comportamientos hidrodinámicos pese a estar en una zona cercana en cada uno de los puntos de muestreo. Cabe mencionar que, el modelo hidrodinámico 2D simula de mejor manera el comportamiento hidráulico de los cauces al tomar en cuenta la pendiente y los valores de n de Manning, de esta manera se llegó a apreciar zonas con altas velocidades aun teniendo caudales bajos en los distintos sectores de los ríos Yanuncay, Tarqui y Confluencia de los mismos que, en su mayoría se encuentran en las zonas medias donde las profundidades son bajas y el flujo turbulento es evidente. En este sentido LSPIV se llega a ajustar a las exigencias de las técnicas experimentales que se manejan actualmente, y puede ser incorporado a las mediciones en campo no solo para época de estiaje y crecidas sino en todo momento, teniendo en cuenta los valores de corrección propias del método.

Bajo los análisis y criterios realizados en este trabajo se puede llegar a tener ciertas consideraciones y recomendaciones para mejorar o validar los modelos de medición de velocimetría por imágenes y cálculos de caudales de salidas en distintos cauces por el método del LSPIV.

Seleccionar secciones de cauces en donde el flujo del agua sea continuo para permitir un mayor control de las partículas de seguimiento y evitar los sitios con puntos de convergencia que produce alteraciones en la vectorización de la técnica LSPIV debido a la presencia de material rocoso, escombros o zonas de estancamiento (flujo estacionario).

La discretización de la batimetría en la sección transversal se debe procurar realizarla siguiendo la guía de la Norma ISO-748. En cuanto a las velocidades en cada abscisa, tomarlos en el orden de 20%, 60% y 80% a partir de la superficie del flujo, esto para poder utilizar cualquiera de las 3 formas de calcular la velocidad media en dichos puntos: 1 punto, 2 puntos y 3 puntos.

Los CP's o puntos de control (4 puntos) procurar que sean lo más visible a lo largo de la grabación y en lo máximo procurar que se encuentren cercanos a las orillas y cubran el área de estudio (sección transversal donde se realiza la batimetría). En cuanto al equipo de vuelo y grabación, tener buena resolución mayor a los 15 FPS (fotogramas por segundo), y prevenir realizar los vuelos en presencia de viento fuertes porque llegan a alterar los resultados de la técnica LSPIV (para corregir esta inestabilidad se requiere de programas computacionales de estabilización de videos).

En caso de implementación en el ámbito local, se recomienda el uso de cámaras fijas de grabación que evitarían todos estos inconvenientes externos a los equipos de medición y vincular proyectos experimentales que mejoren las técnicas actuales de medición y control de flujos en los cauces.

CAPITULO 6. BIBLIOGRAFIA

García, L., Sánchez, M., & Torres, P. (2010). Comparación de métodos numéricos en la modelación de flujo en ríos. *Ingeniería del Agua*, 17(4), 289-301.

Fernández, R., & Martínez, A. (2015). Evaluación de riesgos de inundación mediante modelación numérica. *Estudios de Ingeniería Civil*, 9(2), 103-120.

Rodríguez, J., Pérez, C., & Ruiz, F. (2013). Diseño y análisis de obras hidráulicas utilizando modelación numérica. *Revista de Obras Públicas*, 42(5), 67-82.

López, G. (2012). Gestión integral de recursos hídricos a través de la simulación numérica. *Revista de Recursos Hídricos*, 14(1), 33-47.

Martínez, J., & González, P. (2014). Métodos experimentales en la hidráulica fluvial: fundamentos y aplicaciones. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, 23(1), 67-75.

García, L., Herrera, P., & Sánchez, R. (2012). Aplicación de la Velocimetría por Imágenes de Partículas en estudios fluviales. *Hidráulica Aplicada*, 24(1), 45-60.

Ríos, F., & Morales, C. (2015). Uso de fotogrametría y escáner láser terrestre en estudios fluviales. *Revista de Tecnología y Medio Ambiente*, 27(2), 89-103.

López, J., & Ruiz, A. (2013). Métodos de trazadores en la investigación hidráulica fluvial. *Ingeniería y Gestión del Agua*, 21(3), 100-112.

Fernández, J., Martínez, L., & Pérez, M. (2011). Técnicas experimentales y su aplicación en la hidráulica fluvial. *Revista de Ingeniería Hidráulica*, 20(2), 150-162.

- Abel Solera, J. P. (2015, Septiembre). AQUATOOL+ Manual de Usuario. *AQUATOOL+*.
Valencia, España.
- Acuerdo Ministerial No. 097-A. (2015, Julio 30). Criterios de calidad para aguas de consumo humano y uso doméstico. 10-14. Quito, Pichincha, Ecuador.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, A. W. (1992). *MÉTODOS NORMALIZADOS PARA EL ANÁLISIS DE AGUAS POTABLES Y RESIDUALES*.
Madrid: Díaz de Santos.
- Andrade, L. (2015). *MEDICIÓN DEL FLUJO SUPERFICIAL EN CANALES A TRAVÉS DE MEDIOS VISUALES*. Mexico D,F: UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- Botelli, M., Guillén, N., García, C., Patalano, A., & Chalabe, M. (2020). *Aplicación de la técnica LSPIV en el diseño hidrológico de infraestructura hidrica*. Salta: Cuadernos de Ingeniería.
- Bruno Tassin, D. R. (2015, Julio 23). Mathematical Submodels in Water Quality Systems. *Microbial decomposition*, 220. Retrieved Agosto 18, 2022
- Cabezudo, R. (2017). *ANÁLISIS COMPARATIVO HIDROTOPOGRÁFICO EN RIOS MEDIANTE TÉCNICA MANUAL Y TELEMÉTRICAS*. Universidad de Valladolid, Valladolid.
- Castro, R., Gómez, J., & Martínez, A. (2021). Application of LSPIV in high mountain rivers: A study of the Santa River in Peru. *Journal of Hydrology*.
- Chow, V. T. (1959). *Hidráulica de los canales abiertos*. Champaign: University of Illinois.

- COMITÉ EUROPEEN DE NORMALISATION. (2007). *Hydrometry - Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats (ISO 748:2007)*. EUROPEAN STANDARD.
- De León Alicia, E. M. (2011). IMPLEMENTACION DE UN MODELO MATEMATICO PARA EVALUAR LA CALIDAD DE AGUA DEL RÍO PARANÁ DE LAS PALMAS. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente; vol. 15*, 55-62. Retrieved Septiembre 15, 2022, from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/102662>
- Delfa, J. L. (2007). Estudio estadístico de la calidad de las aguas de la cuenca hidrográfica del río Ebro. Madrid, España.
- Dias Lozada, J. M. (2019). *Avances en la Cuantificación hidrológica y caracterización hidráulica del flujo en el sistema fluvial del Río Carcarañá utilizando ADCP*. Cordova: Universidad Nacional de Cordova.
- Fernandez, D. (2019). *CALIBRACIÓN DE UN MOLINETE DE ASPAS PARA LA REALIZACIÓN DE UN AFORO POR VADEO DE UN CAUCE PEQUEÑO*. Guatemala: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.
- Franklin Torres Bejarano, H. R.-L. (2015). Validación de un modelo hidrodinámico y calidad del agua para el Río Magdalena, en el tramo adyacente a Barranquilla, Colombia. *Scielo*, 7.
- Fredy Sandro, R. F., Shirley Pamela, T. F., & Ferrer, C. R. (2020). *FLOW ESTIMATION FROM THE SPEEDOMETRY TECHNIQUE BY IMAGES OF LARGE-SCALE PARTICLES APPLIED IN FLOW TO A FREE SURFACE*. Venezuela: Gaceta Tecnica.

- Gábor, F., & Sándor, B. (2022). *LSPIV analysis of ship-induced wave wash*. RESEARCH ARTICLE.
- Israel, C. M. (2017). Balance de materia para la modelación de la calidad. *Modelación de la calidad de agua en la microcuenca del río Tabacay perteneciente a la subcuenca del río Burgay*. Cuenca, Azuay, Ecuador.
- JESSICA KARINA CARVAJAL MEJÍA, M. J. (2019, Junio). DETERMINACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DE AGUA DE LA ACEQUIA PUMAMAQUI. Quito, Pichincha, Ecuador.
- Jones, A., Williams, D., & Brown, C. (2023). Monitoring river dynamics during drought conditions using Local Particle Image Velocimetry: The Murray-Darling Basin, Australia. *Water Resources Research*, 1176-1190.
- Lorena Bracho Vargas, L. A. (2016, Noviembre 18). Definición del Qual2k. *Evaluación del software qual2k en fuentes receptoras de vertimientos de residuos líquidos en algunos puntos del río Cesar (Colombia) impactados por actividad minera*. Colombia.
- Massó, L. (2018). *Caracterización de flujos en modelos físicos y prototipos utilizando técnicas de velocimetría por imágenes (LSPIV, LSPTV y STIV)*. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Montoya, C. L. (2011). EFECTO DEL INCREMENTO EN LA TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA SOBRE LA EFICIENCIA DE PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN. *Revista EIA*, 137-148.
- Palacios, P. (2021). *Evaluación de los modelos hidrodinámicos Hec-Ras 1D y 2D, en un tramo del río Yanuncay de la ciudad de Cuenca*. Cuenca: UCACUE.

- Palatano, A. (2017). *Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional de Córdoba]*. Repositorio Digital UNC. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11086/6305>
- Palatano, A., García, C., & Scacchi, G. (2015). *Implementación de la técnica de PTV a gran escala (LSPTV) para caracterizar flujos a superficie libre en modelos físicos*. La Plata: Universidad Nacional del Litoral.
- Palatano, Antoine; García, Carlos; Rodríguez, Andrés. (2017). Rectification of Image Velocity Results (RIVeR): A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computers & Geosciences*, 109, 323-330.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>
- Paredes, J. S. (2007). *Modelo GESCAL para la simulación de la calidad del agua de recursos hídricos. Manual de usuario. Versión 1.0"*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Patalano, A. (2017). *Desarrollo e implementación en gran escala de técnicas de velocimetría por imágenes para caracterizar flujos de agua con superficie libre*. . CORDOBA : UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA .
- Pérez, V., Castro, A., & Bravo, J. (2023). Analyzing deltaic flow dynamics with LSPIV: A case study of the Paraná Delta, Argentina. *Water Resources Research*, 59(4).
- Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial-Sinincay. (2015). 1. Cuenca, Azuay, Ecuador.

- Quinn, W. L., & Bruce, L. R. (2018). LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems:. *AGUI00 ADVANCING EARTH AND SPACE SCIENCE*.
- Ramírez, C. A. (2011). *Calidad del Agua: Evaluación y diagnóstico*. Medellín: EDICIONES DE LA U.
- Rodriquez, M. (2013). Recursos para Agricultores Nitrato en el Agua Potable. *Water Boards* , 1.
- Rojas, J. A. (2009). *Calidad del Agua*. Bogota: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Rosas, F., & Tejada, S. (2020). *Método LSPIV para cálculo de la velocidad superficial en escurrimientos fluviales*. Lima: Universidad Peruana Unión.
- Sarah, V., Léa-Linh, L., Chonoski, A., Robert, E., Torchet, L., Valentin, P., & Frédérique, L. (2019). Comparison of Streamflow Estimated by Image Analysis (LSPIV) and by Hydrologic and Hydraulic Modelling on the French Riviera During November 2019 Flood. *HAL OPEN SCIENCE*.
- waterboards*. (2021, Octubre 25). Retrieved from <https://www.waterboards.ca.gov/>
- Wiley, J. (1997). *Hydrometry: Principles and Practices - Hardcover*.

7.ANEXOS

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.

Río:	Yanuncay AJ Tarqui		Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK				
Fecha:	01-02-24		Abscisa Inicial:	0.00	m			
Hora Inicial	10H10		Abscisa Final:	16.60	m			
Hora Final	10H37		Área sección:	4.13	m ²			
Nivel de referencia	80	cm	Caudal aforado:	1.72	m ³ /s			
Personal:	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea							
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m²)	Caudal (m³/s)	Observaciones
0.00	0.356	0.096	0.081	0.096	1.00	0.201	0.019	Borde Izq. Muro
2.00	0.446	0.685	0.485	0.685	2.00	0.892	0.611	
4.00	0.213	0.363	0.254	0.363	2.00	0.426	0.155	
6.00	0.121	0.402	0.337	0.402	2.00	0.242	0.097	
8.00	0.205	0.179	0.087	0.179	2.00	0.410	0.073	
10.00	0.166	0.559	0.395	0.559	2.00	0.332	0.186	
12.00	0.339	0.617	0.487	0.617	2.00	0.678	0.418	
14.00	0.307	0.721	0.941	0.721	2.00	0.614	0.443	
16.00	0.242	0.452	0.343	0.452	1.30	0.315	0.142	
16.60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.30	0.018	0.000	Borde Der.
Total						4.13	2.14	

Anexo 1. Tabla de datos de velocimetría en el río Yanuncay AJ Tarqui (primera jornada).

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.										
Río:	Tarqui AJ Yanuncay				Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK				
Fecha:	01-02-24				Abscisa Inicial:	0.00	m			
Hora Inicial:	11H18				Abscisa Final:	11.70	m			
Hora Final:	11H40				Área sección:	2.40	m ²			
Nivel Referencia:	90	cm			Caudal aforado:	1.02	m ³ /s			
Personal	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea									
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 80% (m/s)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad 20% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	Velocidad Promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m²)	Caudal (m³/s)	Observaciones
0.00	0.382	0.405	0.513	0.468	0.267	0.513	1.00	0.195	0.100	Borde Izq. Muro
2.00	0.398		0.642	0.788	0.817	0.642	2.00	0.796	0.511	
4.00	0.254		0.765		0.646	0.765	2.00	0.508	0.389	
6.00	0.201		0.492		0.420	0.492	2.00	0.402	0.198	
8.00	0.151		0.187		0.221	0.187	2.85	0.430	0.080	
11.70	0.000		0.000		0.000	0.000	1.85	0.070	0.000	Borde Der.
Total								2.40	1.28	

Anexo 2. Tabla de datos de velocimetría en el río Tarqui AJ Yanuncay (primera jornada).

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.										
Río:	Yanuncay DJ Tarqui				Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK				
Fecha:	1/02/2024				Abscisa Inicial:	3.00	m			
Hora Inicial:	08H44				Abscisa Final:	24.40	m			
Hora Final:	09H31				Área sección:	6.95	m ²			
Nivel Referencia:	cm				Caudal aforado:	3.67	m ³ /s			
Personal:	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea									
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 80% (m/s)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad 20% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	V promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m²)	Caudal (m³/s)	Observaciones
3.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.00	0.063	0.000	Borde Izq. Muro
5.00	0.253	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	2.00	0.506	0.000	Zona de Estanc.
7.00	0.321			0.740	0.629	0.740	2.00	0.642	0.475	
9.00	0.351			0.648	0.503	0.648	2.00	0.702	0.455	
11.00	0.513		0.340		0.460	0.340	2.00	1.026	0.349	
13.00	0.216		0.503		0.543	0.503	2.00	0.432	0.217	
15.00	0.373		1.105		1.353	1.105	2.00	0.746	0.824	
17.00	0.277		0.627		0.627	0.627	2.00	0.554	0.347	
19.00	0.267		1.040		1.564	1.040	2.00	0.534	0.555	
21.00	0.405		0.907		0.990	0.907	2.00	0.810	0.735	
23.00	0.501		0.467		0.326	0.467	1.70	0.852	0.398	
24.40	0.000		0.000		0.000	0.000	0.70	0.088	0.000	Borde Der.
Total								6.95	4.36	

Anexo 3. Tabla de datos de velocimetría en el río Yanuncay DJ Tarqui (primera jornada).

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.										
Río:	Yanuncay AJ Tarqui					Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK			
Fecha:	29-02-24					Abscisa Inicial:	0.00	m		
Hora Inicial:	10H10					Abscisa Final:	16.40	m		
Hora Final:	11H40					Área sección:	5.12	m ²		
Nivel Referencia:	cm					Caudal aforado:	2.60	m ³ /s		
Personal:	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea									
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 80% (m/s)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad 20% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	V promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m ²)	Caudal (m ³ /s)	Observaciones
0.00	0.529	0.029	0.104	0.000	0.098	0.104	0.50	0.139	0.014	Borde Izq. Muro
1.00	0.584	0.483	0.710	0.855	0.644	0.710	1.00	0.584	0.415	
2.00	0.432	0.189	0.801	1.112	1.200	0.801	1.00	0.432	0.346	
3.00	0.321		0.603	0.590	0.357	0.517	1.00	0.321	0.166	
4.00	0.204		0.566	0.498	0.344	0.469	1.00	0.204	0.096	
5.00	0.165		0.372	0.349	0.249	0.323	1.00	0.165	0.053	
6.00	0.170		0.500	0.413	0.279	0.397	1.00	0.170	0.068	
7.00	0.238			0.487	0.320	0.404	1.00	0.238	0.096	
8.00	0.164		0.284	0.263	0.278	0.275	1.00	0.164	0.045	
9.00	0.250		1.019	0.927	0.701	0.882	1.00	0.250	0.221	
10.00	0.305		0.239	0.187	0.210	0.212	1.00	0.305	0.065	
11.00	0.405	0.807	0.490	0.320	0.225	0.490	1.00	0.405	0.198	
12.00	0.515		0.980	0.872	0.607	0.820	1.00	0.515	0.422	
13.00	0.423	0.230	0.869	1.013	0.853	0.869	1.00	0.423	0.368	
14.00	0.226		0.895	0.768	0.557	0.740	1.00	0.226	0.167	
15.00	0.372	0.126	0.372	0.459	0.358	0.372	1.00	0.372	0.138	
16.00	0.260	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.70	0.182	0.000	Zona de Estanc.
16.40	0.220	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.20	0.024	0.000	Borde Der.
Total								5.12	2.88	

Anexo 4. Tabla de datos de velocimetría en el río Yanuncay AJ Tarqui (segunda jornada).

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.

Río:	Tarqui AJ Yanuncay			Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK					
Fecha:	29-02-24			Abscisa Inicial:	0.00	m				
Hora Inicial:	11H18			Abscisa Final:	4.00	m				
Hora Final:	11H40			Área sección:	2.72	m ²				
Nivel Referencia:	90	cm		Caudal aforado:	1.36	m ³ /s				
Personal:	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea									
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 80% (m/s)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad 20% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m ²)	Caudal (m ³ /s)	Observaciones
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.07	0.010	0.000	Borde Izquierdo Muro
0.13	0.591	0.178	0.498	0.501	0.279	0.498	0.37	0.216	0.107	
0.73	0.508	0.257	0.448	0.573	0.432	0.448	0.94	0.475	0.213	
2.00	0.398		0.469	0.577	0.719	0.588	1.14	0.452	0.266	
3.00	0.393		0.791	0.964	1.343	1.033	1.00	0.393	0.406	
4.00	0.214		0.869	0.844	0.954	0.889	1.00	0.214	0.190	
5.00	0.346		0.758	1.040	0.814	0.871	1.00	0.346	0.301	
6.00	0.113			0.395	0.339	0.367	1.00	0.113	0.041	
7.00	0.221		0.924	0.745	0.644	0.771	1.00	0.221	0.170	
8.00	0.159			0.527	0.374	0.451	1.00	0.159	0.072	
9.00	0.065				0.402	0.402	1.00	0.065	0.026	
10.00	0.065				0.133	0.133	0.75	0.049	0.006	
10.50	0.000				0.000	0.000	0.25	0.004	0.000	FLUJO SUPERFICIAL Final derecho
13.30										FLUJO SUPERFICIAL
Total								2.72	1.8	

Anexo 5. Tabla de datos de velocimetría en el río Tarqui AJ Yanuncay (segunda jornada).

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.

Río:	Yanuncay DJ Tarqui				Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK				
Fecha:	29/02/2024					Abscisa Inicial:	0.00	m		
Hora Inicial	08H15					Abscisa Final:	16.90	m		
Hora Final	09H35					Área sección:	6.61	m ²		
Nivel Referencia	cm				Caudal aforado:	3.70	m ³ /s			
Personal:	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea									
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 80% (m/s)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad 20% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	V promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m ²)	Caudal (m ³ /s)	Observaciones
0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.43	0.000	0.000	Cono referencia izquierdo
0.85	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.00	0.000	0.000	orilla izquierda
2.00	0.120		0.000	0.000	0.000	0.000	1.08	0.129	0.000	zona estancamiento
3.00	0.240		0.296	0.386	0.293	0.296	1.00	0.240	0.071	
4.00	0.390	0.304	0.280	0.270	0.249	0.280	1.00	0.390	0.109	
5.00	0.441	0.413	0.887	0.973	0.967	0.887	1.00	0.441	0.391	
6.00	0.291		0.773	0.853	0.712	0.773	1.00	0.291	0.225	
7.00	0.368	0.740	1.105	1.109	1.655	1.105	1.00	0.368	0.407	
8.00	0.420	0.473	0.627	0.603	0.415	0.627	1.00	0.420	0.263	
9.00	0.547	0.408	0.950	1.050	0.938	0.950	1.00	0.547	0.520	
10.00	0.471	0.677	0.832	0.832	0.753	0.832	1.00	0.471	0.392	
11.00	0.500	0.691	0.814	1.023	0.804	0.814	1.00	0.500	0.407	
12.00	0.565	1.050	1.190	1.201	1.170	1.190	1.00	0.565	0.672	
13.00	0.521	0.257	0.881	1.056	0.832	0.881	1.00	0.521	0.459	
14.00	0.628	0.170	0.219	0.389	0.313	0.219	1.00	0.628	0.138	
15.00	0.631	0.066	0.267	0.292	0.247	0.267	1.25	0.789	0.211	
16.50	0.249		0.000	0.000	0.000	0.000	0.95	0.237	0.000	Zona estancamiento
16.90	0.400		0.000	0.000	0.000	0.000	0.20	0.069	0.000	Borde derecho
Total								6.61	4.26	

Anexo 6. Tabla de datos de velocimetría en el río Yanuncay DJ Tarqui (segunda jornada).

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.

Río:	Yanuncay AJ Tarqui				Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK				
Fecha:	27-03-24				Abscisa Inicial:	0.00		m		
Hora Inicial:	12H05				Abscisa Final:	15.55		m		
Hora Final:	14H04				Área sección:	5.50		m ²		
Nivel Referencia	--	cm			Caudal aforado:	1.41		m ³ /s		
Personal:	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea									
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 80% (m/s)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad 20% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	V promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m²)	Caudal (m³/s)	Observaciones
0.00	0.243	--	0.167	0.203	0.225	0.167	0.50	0.049	0.008	Borde Izquierdo
1.00	0.145	--	0.151	0.165	0.188	0.151	1.00	0.145	0.022	
2.00	0.306	--	0.236	0.237	0.239	0.236	1.10	0.337	0.079	
3.20	0.265	--	0.256	0.255	0.249	0.256	1.00	0.265	0.068	
4.00	0.376	0.191	0.248	0.253	0.252	0.248	0.90	0.338	0.084	
5.00	0.442	0.108	0.272	0.287	0.255	0.272	1.00	0.442	0.120	
6.00	0.515	0.152	0.307	0.338	0.291	0.307	1.00	0.515	0.158	
7.00	0.512	0.179	0.384	0.412	0.292	0.384	1.00	0.512	0.196	
8.00	0.542	0.254	0.449	0.490	0.289	0.449	1.00	0.542	0.243	
9.00	0.517	0.322	0.471	0.502	0.358	0.471	1.00	0.517	0.243	
10.00	0.451	0.129	0.422	0.516	0.356	0.422	1.00	0.451	0.190	
11.00	0.344	0.204	0.411	0.471	0.305	0.411	1.00	0.344	0.141	
12.00	0.320	--	0.307	0.343	0.279	0.307	1.00	0.320	0.098	
13.00	0.301	--	0.206	0.238	0.251	0.206	1.00	0.301	0.062	
14.00	0.277	--	0.104	0.123	0.155	0.104	1.00	0.277	0.029	
15.00	0.168	--	0.000	0.000	0.000	0.000	0.78	0.130	0.000	
15.55	0.000	--	0.000	--	--	0.000	0.28	0.012	0.000	Borde Der.
Total								5.50	1.74	

PROYECTO: CARACTERIZACIÓN DE LOS RÍOS TOMBAMBA, YANUNCAY, TARQUI, Y MACHÁNGARA APLICANDO TÉCNICAS DE VELOCIMETRÍA CON IMÁGENES.

Río:	Tarqui AJ Yanuncay	Equipo:	MAGNA ROD - REDBACK	
-------------	--------------------	----------------	---------------------	--

Fecha:	17-04-24		Abscisa Inicial:	0.00	m					
Hora Inicial:	11H35		Abscisa Final:	8.87	m					
Hora Final:	12H50		Área sección:	5.16	m ²					
Nivel Referencia:	92	cm	Caudal aforado:	1.18	m ³ /s					
Personal:	Ing. Santiago Ochoa, Milton Tsenkush, Bryan Aldana, Fernando Sarmiento, Carolina Zea									
Abscisa (m)	Profundidad del agua (m)	Velocidad 80% (m/s)	Velocidad 60% (m/s)	Velocidad 20% (m/s)	Velocidad Superficial (m/s)	Velocidad promedio (m/s)	Ancho segmento (m)	Área segmento (m²)	Caudal (m³/s)	Observaciones
0.00	0.000	--	--		--	--	0.000	0.50	0.078	Borde Izquierdo
1.00	0.620	0.124	0.199	0.210	0.248	0.214	0.186	1.00	0.620	
2.00	0.937	0.321	0.309	0.266	0.274	0.220	0.298	1.00	0.937	
3.00	0.821	0.323	0.388	0.392	0.382	0.383	0.353	1.00	0.821	
4.00	0.852	0.319	0.335	0.376	0.381	0.351	0.350	1.00	0.852	
5.00	0.600	0.090	0.050	0.067	0.201	0.235	0.146	1.00	0.600	
6.00	0.505	0.073	0.123	0.265	0.376	0.362	0.225	1.00	0.505	
7.00	0.420	0.097	0.099	0.147	0.078	0.030	0.088	1.00	0.420	
8.00	0.310	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.94	0.290	
8.87	0.000	--	--		--	--	0.000	0.44	0.034	Borde Derecho
Total								5.16	1.22	

Anexo 8. Tabla de datos de velocimetría en el río Tarqui AJ Yanuncay (cuarta jornada).

(2) - YAMUNAY OJ TARUJI

Distancia del punto inicial en mts.	Profundidad vertical medida (m)	Distancia vertical a la superficie del agua (m)	Profundidad medida con anastre de vicaredallo (m)	Ángulo con la vertical (°)	Profundidad de la observación en mts.	Número de intervalos	Tiempo en Segund.	Velocidad m/s	OBSERVACIONES
4	0,597					41	30,6	0,938	Sup.
	0,438					45	30	1,05	80%
	0,328					41	30,2	0,95	60%
	0,109					18	31	0,408	20%
10	0,471					33	30	0,753	Sup.
	0,377					36	30,3	0,832	80%
	0,282					36	30,3	0,832	60%
	0,094					29	30	0,672	20%
11	0,5					35	30,5	0,804	Sup.
	0,4					44	30,1	1,023	60%
	0,3					35	30,1	0,819	60%
	0,1					30	30,4	0,691	20%
12	0,565					51	30,5	1,12	Sup.
	0,452					52	30,2	1,201	80%
	0,339					51	30	1,19	60%
	0,113					45	30	1,05	20%
13	0,521					36	30,3	0,832	Sup.
	0,417					46	30,5	1,056	60%
	0,312					38	30,2	0,881	60%
	0,104					11	30,2	0,257	20%
14	0,628					14	31,5	0,313	Sup.
	0,502					17	30,7	0,389	60%
	0,377					10	32,2	0,219	60%
	0,126					8	33,4	0,17	20%

Anexo 9 . Hoja de anotación de velocidades a diferente profundidad en la sección transversal (Fuente: Propia)



Anexo 10. Dispositivo de transporte del molinete para mediciones en puentes (Fuente: Propia)



Anexo 11. Modelo de molinete para medición a través de puentes (Fuente: Propia)



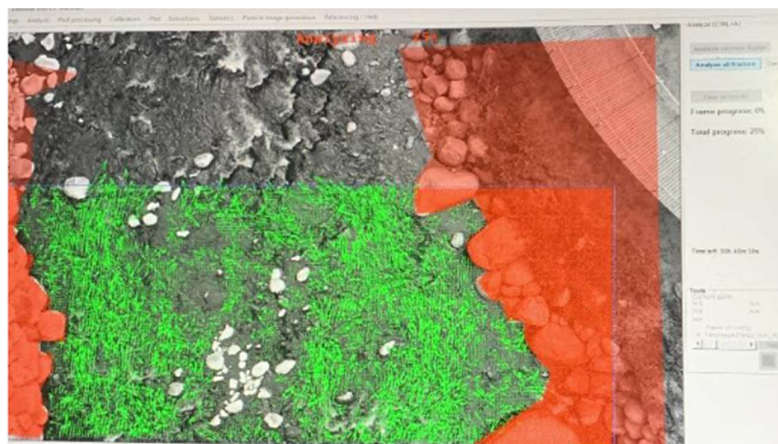
Anexo 12. Dron con calidad de grabación 15FPS (Fuente: Propia)



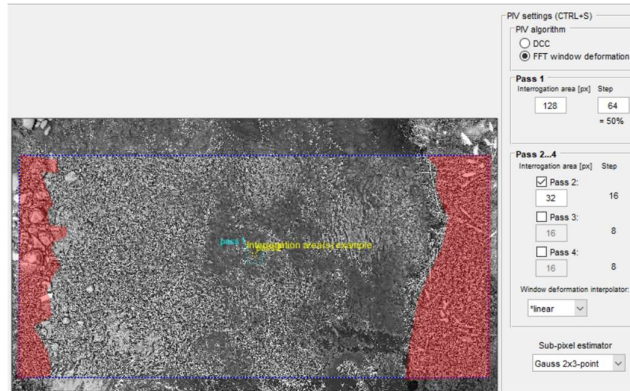
Anexo 13. Dispositivo de control del Dron (Fuente: Propia)



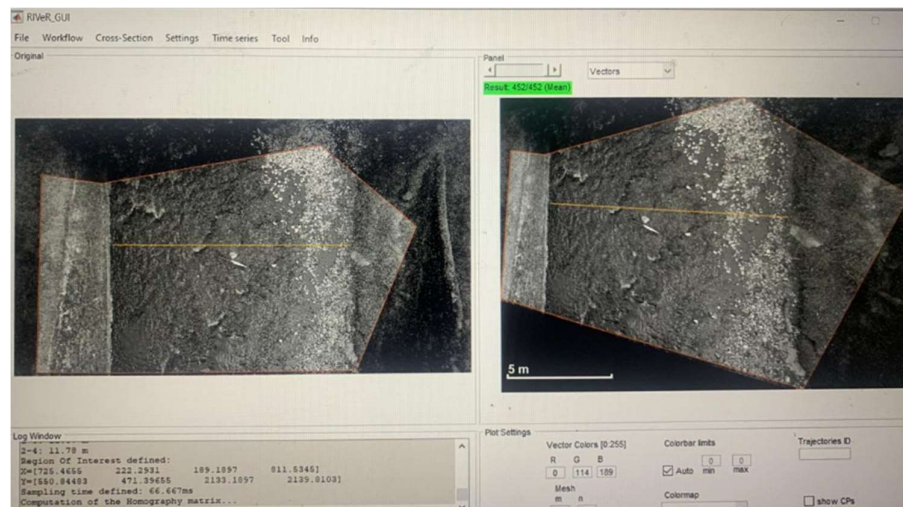
Anexo 14. Puntos de control de distancias (Fuente: Propia)



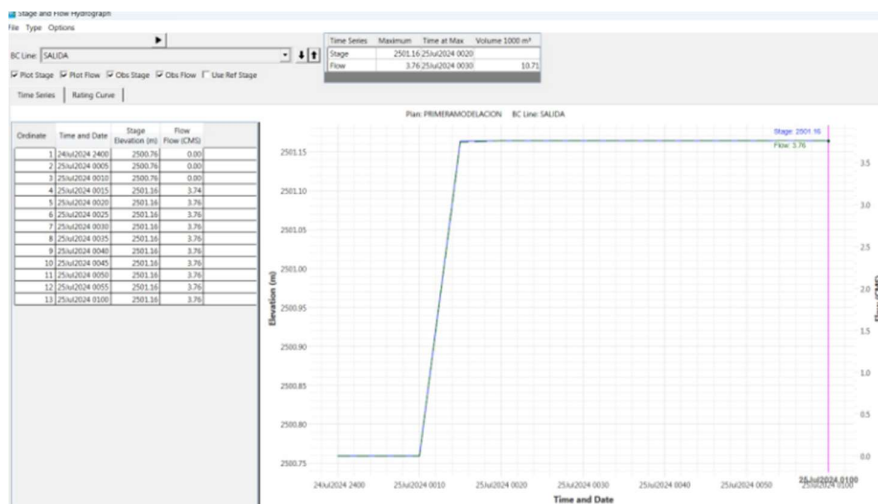
Anexo 15. Interfaz de PIV-lab (Fuente: Propia)



Anexo 16. Algoritmo de correlación de múltiples pasos FFT (Fuente: Propia)



Anexo 17. Interfaz de RIVER (Fuente: Propia)



Anexo 18. Caudal de salida en la simulación 2D aguas debajo de la confluencia (Fuente; Propia)

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Nosotros(a)s, **Bryan Steven Aldana Quizhpi y Milton Fabian Tsenkush Shakai** portadore(a)s de las cédulas de ciudadanía N.º 0106653371 y 1401132558. En calidad de autore(a)s y titulares de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación **“CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE VELOCIDAD SUPERFICIAL DE LA CONFLUENCIA DEL RIO TARQUI Y YANUNCAY APLICANDO LA TÉCNICA LSPIV”** de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconocemos a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizamos a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 4 de octubre de 2024

F: 

Bryan Steven Aldana Quizhpi
0106653371

F: 

Milton Fabian Tsenkush Shakai
1401132558