

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“ESTUDIO DEL FLUJO SECUNDARIO EN LA
CONFLUENCIA DE LOS RÍOS MARAÑÓN Y UCAYALI
MEDIANTE UN MODELO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

GERLES EDIVER MEDINA ORELLANO

ID: 0009-0009-1363-1577

ASESOR:

Dr. JULIO MARTÍN KUROIWA ZEVALLOS

ID: 0000-0003-3637-965X

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**
Medina Orellano, Gerles Ediver
gmedinao@uni.pe
+51 930644620

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi padre Guillermo Medina por haber creído en mí cuando decidí encaminarme en el sueño de estudiar en la UNI y por enseñarme que nunca será tarde para alcanzar una meta, y a mi madre Justina Orellano por todo el sacrificio que hizo para que yo pudiera llegar a Lima y pueda estudiar en la UNI. Sin ella este sueño no hubiera sido posible.

AGRADECIMIENTOS

El camino para lograr ver concluida esta tesis fue largo y sacrificado, pero gratificante. Representa el esfuerzo de los últimos tres años dedicados a la investigación. No hubiera sido posible llegar hasta aquí sin el apoyo de algunas personas e instituciones de las que estoy muy agradecido. Agradezco a la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y en especial a la Facultad de Ingeniería Civil por formarme como ingeniero durante mi carrera universitaria y por brindarme un ambiente agradable donde conocí a grandes profesores que me motivaron a continuar con mis estudios y a buenos compañeros que se convirtieron en mis grandes amigos.

Agradezco al Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CITA) de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTECH), por permitirme trabajar en el área de Modelación Numérica y Matemática como asistente de investigación y como asistente de cátedra en estos últimos años. A su vez, agradezco al Dr. Patrick Venial Zorro, director del CITA-UTECH por concederme los permisos de uso de datos de las mediciones de campo de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali para la elaboración de la presente tesis, además agradezco a la Fundación Gordon and Betty Moore por financiar las mediciones en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Además, quiero expresar mi agradecimiento al Centro de Investigación para la Computación Sostenible de la UTECH, por permitirme utilizar el clúster Khipu para el desarrollo de la simulación de los modelos numéricos desarrollados desde el inicio de mi investigación como parte del CITA-UTECH. Sin este recurso computacional no hubiera sido posible llevar a cabo la presente investigación.

Asimismo, quiero expresar un especial agradecimiento a mi asesor, el Dr. Julio Kuroiwa Zevallos, por guiarme en la presente tesis, por sus consejos y sugerencias en mejora de la presente tesis. Le agradezco también por sus consejos personales y por motivarme a continuar con mis estudios, también, por ser un profesor que se preocupa por sus alumnos.

Deseo expresar mi agradecimiento al Dr. Daniel Horna Muñoz por haberme guiado y asesorado en todo el desarrollo de mi investigación en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, su conocimiento en el área de modelamiento numérico de confluencias fluviales fue de gran ayuda para el desarrollo de mi investigación. A su vez quiero agradecer al Dr. Jorge Abad Cueva, por todo el conocimiento brindado en el área de la hidráulica fluvial, en mi paso por el CITA como investigador.

Finalmente, expreso un sincero agradecimiento a mis padres, mis hermanos, mi novia y amigos, quienes me ayudaron directamente e indirectamente desde mi paso por la UNI hasta ver concluida esta tesis, les estaré eternamente agradecido.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract	5
Prólogo	6
Lista de tablas	8
Lista de figuras	9
Lista de símbolos y siglas	14
Capítulo I Introducción	16
1.1 Generalidades	16
1.2 Descripción del problema de investigación	18
1.3 Objetivos del estudio	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Antecedentes investigativos	19
Capítulo II Marco teórico y conceptual	21
2.1 Ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido	21
2.1.1 Ecuación de conservación de masa	21
2.1.2 Ecuación de la conservación de momento	21
2.1.3 Ecuación de la conservación de la energía	22
2.2 Turbulencia	22
2.2.1 Características de un flujo turbulento	24
2.2.2 Cascada de energía	25
2.2.3 Escalas de turbulencia	25
2.3 Modelos de Turbulencia	27
2.3.1 Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)	28
2.3.2 Large Eddy Simulation (LES)	33
2.3.3 Ley de la pared	36
2.4 Modelo numérico	38
2.4.1 Método de volúmenes finitos (FVM)	39
2.5 Confluencias fluviales	40
2.5.1 Hidrodinámica de confluencias fluviales	41

2.5.2	Transporte de sedimentos en confluencias	42
2.5.3	Características morfológicas	43
2.5.4	Factores que afectan la morfodinámica	45
2.6	Flujo secundario en ríos	48
2.6.1	Flujo secundario en meandros	48
2.6.2	Flujo secundario en confluencias	50
Capítulo III Área de estudio e información		52
3.1	Área de estudio	52
3.1.1	Río Marañón	52
3.1.2	Río Ucayali	53
3.1.3	Río Amazonas	53
3.2	Mediciones de campo	53
3.2.1	Zona de medición	55
3.2.2	Equipos y Materiales	56
3.2.3	Instalación y configuración del equipo	59
3.2.4	Proceso de medición	61
3.2.5	Procesamiento de la información	62
3.3	Visualización de mediciones	65
3.3.1	Mediciones del Caso I	67
3.3.2	Mediciones del Caso II	74
Capítulo IV Modelamiento Numérico tridimensional		80
4.1	Metodología	80
4.2	Preprocesamiento	82
4.2.1	Alcance del modelo numérico	82
4.2.2	Modelo de turbulencia	83
4.2.3	Tratamiento de la rugosidad del lecho	84
4.2.4	Construcción de la malla	87
4.2.5	Calidad de Malla	95
4.2.6	Implementación del caso de simulación	96
4.3	Procesamiento	105
4.3.1	Requerimiento computacional	105
4.3.2	Inicio de la simulación	106
4.3.3	Convergencia numérica	106
4.4	Postprocesamiento	111
4.4.1	Reconstrucción del modelo descompuesto	111

4.4.2	Generación de resultados	112
4.4.3	Visualización de resultados	114
Capítulo V Calibración y validación del modelo propuesto		115
5.1	Condiciones hidráulicas del modelo	115
5.1.1	Calibración de la velocidad de ingreso para el Caso I	116
5.1.2	Calibración de la velocidad de ingreso para el Caso II	122
5.2	Distribución de la velocidad longitudinal	128
5.2.1	Resultado del Caso I	128
5.2.2	Resultado del Caso II	129
5.3	Distribución de la velocidad transversal	131
5.3.1	Validación del modelo numérico tridimensional Caso I	132
5.3.2	Validación del modelo numérico tridimensional Caso II	140
5.4	Comportamiento del flujo secundario	149
5.4.1	Desarrollo del flujo secundario en el Caso I	150
5.4.2	Desarrollo del flujo secundario en el Caso II	156
5.5	Discusión de resultados	162
5.5.1	Análisis comparativo de los casos de estudio	162
5.5.2	Rendimiento del modelo numérico tridimensional	165
Conclusiones		167
Recomendaciones		170
Referencias bibliográficas		171
Anexos		180

RESUMEN

La confluencia de los ríos Marañón y Ucayali forman el inicio del río Amazonas, considerado el río más caudaloso y largo del mundo. Estos ríos generan procesos de mezcla complejos, donde se observan flujos secundarios que impulsan la mezcla de los sedimentos. La presente investigación tuvo como objetivo estudiar el flujo secundario en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali mediante un modelo numérico tridimensional, el cual fue calibrado y validado usando información medida en campo. Se presentaron dos casos de estudio, el Caso I representa las mediciones en la temporada de vaciante y el Caso II representa las mediciones en la temporada de creciente.

Se presentó el proceso de preparación de los equipos, el procedimiento de medición y el procesamiento de la información medida en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Posteriormente, se procedió con la construcción de los modelos numéricos tridimensionales, los cuales fueron implementados dentro del OpenFOAM utilizando el modelo de turbulencia LES. La malla del modelo numérico tridimensional del Caso I presenta alrededor de 23 millones de celdas, mientras que la malla del Caso II presenta alrededor de 27 millones de celdas.

Se presentaron cinco secciones para la calibración y la validación del modelo numérico tridimensional ubicadas cerca de la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. De las cuales dos secciones se encuentran ubicadas en el río Marañón y el río Ucayali respectivamente, y las tres secciones restantes se encuentran ubicadas en la zona de la confluencia. Los resultados de los modelos numéricos tridimensionales, en ambos casos, lograron replicar la hidrodinámica medida en campo. Los resultados de los modelamientos mostraron la formación de dos flujos secundarios que giran en direcciones opuestas dentro de la zona de la confluencia en forma congruente con las mediciones realizadas en campo.

A pesar de la gran relación entre el ancho y la profundidad dentro de la zona de la confluencia, se observaron flujos secundarios de gran tamaño. Donde el modelo numérico tridimensional del Caso II presentó mayores tamaños de los flujos secundarios en comparación con el Caso I. Finalmente, del análisis de rendimiento se puede decir que el modelo del Caso I presentó un mejor ajuste con los datos medidos en campo, no obstante ambos modelos numéricos tridimensionales lograron replicar la hidrodinámica y los flujos secundarios medidos en campo.

Palabras clave: modelo numérico tridimensional, flujo secundario, OpenFOAM, LES.

ABSTRACT

The confluence of the Marañón and Ucayali rivers form the beginning of the Amazon River, considered the largest and longest river in the world. These rivers generate complex mixing processes, where secondary flows are observed that drive the mixing of sediments. The objective of this research was to study the secondary flow at the confluence of the Marañón and Ucayali rivers using a three-dimensional numerical model, which was calibrated and validated using information measured in the field. Two case studies related to field measurements were presented, where Case I represents measurements during the low water season and Case II represents measurements during the high water season.

The methodology of the measurements made in the area of the confluence of the Marañón and Ucayali rivers is presented, from the preparation of the equipment, the measurement in the study sections and the processing of the measured information. Subsequently, the information measured in the field was used to build the three-dimensional numerical models, which were implemented in OpenFOAM using the LES turbulence model. The mesh of the three-dimensional numerical model of Case I has about 23 million cells, while the mesh of Case II has about 27 million cells.

Five sections were presented for the calibration and validation of the three-dimensional numerical model located near the confluence of the Marañón and Ucayali rivers. Of which two sections are located in the Marañón and Ucayali rivers respectively, and the remaining three sections are located in the confluence zone. The results of the three-dimensional numerical models in both cases replicated the hydrodynamics measured in the field. In turn, two secondary flows rotating in opposite directions were formed within the confluence zone, the formation of these secondary flows were contrasted with the field measurements.

Despite the large width to depth ratio within the confluence zone, large secondary flows were observed. Where the three-dimensional numerical model of Case II presented larger size of secondary flows compared to Case I. Finally, from the performance analysis it can be said that the Case I model presented a better fit with the data measured in the field, however both three-dimensional numerical models were able to replicate the hydrodynamics and secondary flows measured in the field.

Keywords: three-dimensional numerical model, secondary flow, OpenFOAM, LES.

PRÓLOGO

Me es particularmente grato presentar la tesis del Sr. Bachiller Gerles Ediver Medina Orellano, que ha desarrollado un trabajo de investigación modelando el comportamiento del flujo secundario en la confluencia de dos ríos amazónicos, Marañón y Ucayali, que dan origen al río Amazonas. Además de la modelación hidráulica tridimensional, desarrollada en tres dimensiones con el soporte lógico del programa OpenFOAM y un clúster de alto rendimiento, el programa experimental ha requerido realizar mediciones in situ para poder validar el modelo presentado como parte de esta investigación. Este enorme esfuerzo sirvió para poder contar con la batimetría y topografía del cauce y las planicies de inundación, respectivamente, y que son insumos del modelo numérico.

Se ha modelado los patrones de flujo en la confluencia empleando el modelo de turbulencia LES (Large Eddy Simulation) que permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes solo para los vórtices de mayor tamaño, mientras que los vórtices mas pequeños se modelan con modelos de subgrilla. De esta manera se puede ahorrar tiempos de máquina y permitir obtener resultados razonables optimizando el uso de los recursos.

Se han considerado dos casos, de acuerdo con las mediciones realizadas in situ: uno en la temporada baja (vacante) y otro empezando la temporada de lluvias (creciente). Se ha empleado topografía, batimetría, velocidades y caudales previamente levantados mediante ADCP (Acoustic Doppler Current Profilers), es decir con medidores acústicos de perfiles de velocidad de efecto Doppler que se montaron sobre un trimarán, que es una embarcación pequeña que recorre el río de un extremo a otro, registrando el fondo del cauce, así como las velocidades a diferentes alturas y que calcula el caudal por integración.

Los patrones de velocidad implementados en el modelo LES implementado en OpenFOAM reprodujeron satisfactoriamente los patrones de velocidad, niveles de agua y el flujo secundario registrados en campo, aunque es necesario indicar que los mejores resultados se obtuvieron en el primer caso, es decir con caudales relativamente bajos.

Se espera que este trabajo de investigación permita a los profesionales del área de hidráulica a contar con mayores elementos de juicio al considerar los patrones de flujo que pueden ocurrir en las confluencias de dos ríos y, además, permitir a los modeladores familiarizarse con la metodología de los grandes vórtices (LES, Large Eddy Simulation en inglés). Un mejor conocimiento de la hidráulica de un segmento de río, particularmente donde los patrones de flujo son más complejos, permitirán ajustar los diseños o las intervenciones que se hagan en el cauce o en

las orillas con la finalidad de controlar la erosión en las márgenes, facilitar el tráfico fluvial, proyectar obras hidráulicas como puertos fluviales, etc.

ASESOR

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2.1	Modelos de turbulencia más comunes clasificados por ecuaciones de transporte adicionales.	30
Tabla N° 3.1	Parámetros hidráulicos en el río Ucayali (vaciante)	69
Tabla N° 3.2	Parámetros hidráulicos en el río Marañón (vaciante)	69
Tabla N° 3.3	Parámetros hidráulicos en el río Amazonas (vaciante)	69
Tabla N° 3.4	Parámetros hidráulicos en el río Ucayali (creciente)	75
Tabla N° 3.5	Parámetros hidráulicos en el río Marañón (creciente)	75
Tabla N° 3.6	Parámetros hidráulicos en el río Amazonas (creciente)	76
Tabla N° 4.1	Parámetros de calidad de malla	96
Tabla N° 4.2	Condiciones de borde	99
Tabla N° 4.3	Condiciones iniciales para el modelo numérico del Caso I	101
Tabla N° 4.4	Condiciones iniciales para el modelo numérico del Caso II	101
Tabla N° 4.5	Características de la cluster KHIPU	105
Tabla N° 4.6	Coordenadas del los puntos de monitoreo	107
Tabla N° 5.1	Condiciones hidráulicas del modelo	115
Tabla N° 5.2	Rendimiento del modelo	166

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1	Proceso de transición de una capa límite laminar a una turbulenta sobre una placa plana	23
Figura N° 2.2	Medición típica de velocidad puntual en flujo turbulento	24
Figura N° 2.3	Espectro de energía de flujo turbulento	26
Figura N° 2.4	Perfil típico de velocidad media cerca de un límite sólido.	36
Figura N° 2.5	Estructura de flujo en la confluencia de los ríos Huallaga y Chinchao.	42
Figura N° 2.6	Morfología de lecho en confluencias asimétricas.	44
Figura N° 2.7	Confluencia asimétrica de los ríos Acre y Espalha en Brasil.	45
Figura N° 2.8	Confluencia simétrica de los ríos Purus y Acre en Brasil.	46
Figura N° 2.9	Flujo secundario en meandros.	49
Figura N° 2.10	Flujo secundario en confluencias.	50
Figura N° 3.1	Ubicación de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali.	52
Figura N° 3.2	Metodología de medición.	54
Figura N° 3.3	Secciones de medición para el caso I.	56
Figura N° 3.4	Secciones de medición para el caso II.	57
Figura N° 3.5	Componentes del ADCP RiverRay600.	58
Figura N° 3.6	Soporte del ADCP.	60
Figura N° 3.7	Calibración del ADCP.	61
Figura N° 3.8	Visualización de mediciones en el Winriver II.	63
Figura N° 3.9	Resumen de caudales en el Winriver II.	64
Figura N° 3.10	Reporte del Winriver II.	64
Figura N° 3.11	Ventanas del VMT.	65
Figura N° 3.12	Batimetría de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali en temporada de vaciante.	68
Figura N° 3.13	Velocidad promediada en profundidad en la zona de la confluencia para la temporada de vaciante.	70
Figura N° 3.14	Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Ucayali (vaciante).	71
Figura N° 3.15	Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Marañón (vaciante).	72
Figura N° 3.16	Distribución de la velocidad del flujo en la zona de la confluencia (vaciante).	73
Figura N° 3.17	Batimetría de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali en temporada de creciente.	74

Figura N° 3.18 Velocidad promediada en profundidad en la zona de la confluencia para la temporada de creciente.	76
Figura N° 3.19 Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Ucayali (creciente).	77
Figura N° 3.20 Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Marañón (creciente).	78
Figura N° 3.21 Distribución de la velocidad del flujo en la zona de la confluencia (creciente).	79
Figura N° 4.1 Metodología de simulación.	81
Figura N° 4.2 Perfil de velocidad logarítmica sobre lecho rugoso	85
Figura N° 4.3 Limite del modelo numérico tridimensional	88
Figura N° 4.4 Nube de puntos de la batimetría	89
Figura N° 4.5 Batimetría en formato STL	90
Figura N° 4.6 Condición de borde del río Ucayali	92
Figura N° 4.7 Malla base generada mediante el blockMesh	93
Figura N° 4.8 Límites de refinamiento mediante el snappyHexMesh	94
Figura N° 4.9 Malla final del Caso I	94
Figura N° 4.10 Malla final del Caso II	95
Figura N° 4.11 Estructura del caso de simulación en OpenFOAM	97
Figura N° 4.12 Límites del modelo	98
Figura N° 4.13 Valores del número de Courant en los casos de estudio	107
Figura N° 4.14 Ubicación de los puntos de monitoreo del Caso I	108
Figura N° 4.15 Ubicación de los puntos de monitoreo del Caso II	108
Figura N° 4.16 Velocidad en los puntos de monitoreo del Caso I	109
Figura N° 4.17 Energía cinética turbulenta en los puntos de monitoreo del Caso I	109
Figura N° 4.18 Velocidad en los puntos de monitoreo del Caso II	110
Figura N° 4.19 Energía cinética turbulenta en los puntos de monitoreo del Caso II	110
Figura N° 5.1 Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección U01 del Caso I.	116
Figura N° 5.2 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $20\%H_{med}$ (Caso I).	117
Figura N° 5.3 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $40\%H_{med}$ (Caso I).	117
Figura N° 5.4 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $60\%H_{med}$ (Caso I).	118
Figura N° 5.5 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $80\%H_{med}$ (Caso I).	118

Figura N° 5.6	Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección M01 del Caso I.	119
Figura N° 5.7	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $20\%H_{med}$ (Caso I).	120
Figura N° 5.8	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $40\%H_{med}$ (Caso I).	120
Figura N° 5.9	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $60\%H_{med}$ (Caso I).	121
Figura N° 5.10	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $80\%H_{med}$ (Caso I).	121
Figura N° 5.11	Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección U01 del Caso II.	122
Figura N° 5.12	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $20\%H_{med}$ (Caso II).	123
Figura N° 5.13	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $40\%H_{med}$ (Caso II).	123
Figura N° 5.14	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $60\%H_{med}$ (Caso II).	124
Figura N° 5.15	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del $80\%H_{med}$ (Caso II).	124
Figura N° 5.16	Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección M01 del Caso II.	125
Figura N° 5.17	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $20\%H_{med}$ (Caso I).	126
Figura N° 5.18	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $40\%H_{med}$ (Caso II).	126
Figura N° 5.19	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $60\%H_{med}$ (Caso II).	127
Figura N° 5.20	Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del $80\%H_{med}$ (Caso II).	127
Figura N° 5.21	Distribución de la velocidad longitudinal en las secciones medidas en campo (Caso I).	128
Figura N° 5.22	Distribución de la Velocidad longitudinal en el modelo numérico (Caso I).	129
Figura N° 5.23	Distribución de la velocidad longitudinal en las secciones medidas en campo (Caso II).	130
Figura N° 5.24	Distribución de la Velocidad longitudinal en el modelo numérico (Caso II).	131
Figura N° 5.25	Validación de la sección A01 (Caso I).	132

Figura N° 5.26 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $25\%H_{med}$ (Caso I).	133
Figura N° 5.27 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $50\%H_{med}$ (Caso I).	133
Figura N° 5.28 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $75\%H_{med}$ (Caso I).	134
Figura N° 5.29 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $100\%H_{med}$ (Caso I).	134
Figura N° 5.30 Validación de la sección A02 (Caso I).	135
Figura N° 5.31 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $25\%H_{med}$ (Caso I).	136
Figura N° 5.32 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $50\%H_{med}$ (Caso I).	136
Figura N° 5.33 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $75\%H_{med}$ (Caso I).	137
Figura N° 5.34 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $100\%H_{med}$ (Caso I).	137
Figura N° 5.35 Validación de la sección A03 (Caso I).	138
Figura N° 5.36 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $25\%H_{med}$ (Caso I).	139
Figura N° 5.37 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $50\%H_{med}$ (Caso I).	139
Figura N° 5.38 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $75\%H_{med}$ (Caso I).	140
Figura N° 5.39 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $100\%H_{med}$ (Caso I).	140
Figura N° 5.40 Validación de la sección A01 (Caso II).	141
Figura N° 5.41 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $25\%H_{med}$ (Caso II).	142
Figura N° 5.42 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $50\%H_{med}$ (Caso II).	142
Figura N° 5.43 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $75\%H_{med}$ (Caso II).	143
Figura N° 5.44 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del $100\%H_{med}$ (Caso II).	143
Figura N° 5.45 Validación de la sección A02 (Caso II).	144
Figura N° 5.46 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $25\%H_{med}$ (Caso II).	145
Figura N° 5.47 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $50\%H_{med}$ (Caso II).	145

Figura N° 5.48 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $75\%H_{med}$ (Caso II).	146
Figura N° 5.49 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del $100\%H_{med}$ (Caso II).	146
Figura N° 5.50 Validación de la sección A03 (Caso II).	147
Figura N° 5.51 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $25\%H_{med}$ (Caso II).	148
Figura N° 5.52 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $50\%H_{med}$ (Caso II).	148
Figura N° 5.53 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $75\%H_{med}$ (Caso II).	149
Figura N° 5.54 Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del $100\%H_{med}$ (Caso II).	149
Figura N° 5.55 Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A01 (Caso I).	150
Figura N° 5.56 Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A01 (Caso I).	151
Figura N° 5.57 Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A02 (Caso I).	152
Figura N° 5.58 Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A02 (Caso I).	153
Figura N° 5.59 Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A03 (Caso I).	154
Figura N° 5.60 Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A03 (Caso I).	155
Figura N° 5.61 Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A01 (Caso II).	156
Figura N° 5.62 Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A01 (Caso II).	157
Figura N° 5.63 Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A02 (Caso II).	158
Figura N° 5.64 Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A02 (Caso II).	159
Figura N° 5.65 Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A03 (Caso II).	160
Figura N° 5.66 Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A03 (Caso II).	161
Figura N° 5.67 Comparación de los resultado de los modelos numéricos tridimensionales.	163
Figura N° 5.68 Modelos numéricos tridimensionales.	164

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

ρ	: Densidad del fluido
t	: Tiempo
U	: Velocidad del fluido
$u(t)$: Velocidad instantánea
$u'(t)$: fluctuación de la velocidad
∇	: Operador gradiente
p	: Presión del fluido
μ	: Viscosidad dinámica
μ_t	: Viscosidad turbulenta
S_{ij}	: Componente de la tasa de deformación lineal
ν	: Viscosidad cinemática
g	: Gravedad
∇^2	: Operador laplaciano
e	: Energía específica de fluido
k	: Conductividad térmica de fluido
T	: Temperatura del fluido
Φ	: Función de disipación
S_e	: Fuente de calor
$E(\kappa)$: Energía espectral
F_R	: Número de Froude
Re	: Número de Reynolds
κ	: Constante de von Kármán
λ	: Longitud de onda de los remolinos
u_τ	: Velocidad de corte
τ_w	: Esfuerzo cortante en la pared
δ	: Espesor de la capa límite
Co	: Número de Courant
θ	: Angulo de una confluencia formado por sus afluentes

SIGLAS

CFD	:	Dinámica de Fluidos Computacional
OpenFOAM	:	Open Field Operation and Manipulation
KH	:	Kelvin Helmholtz
LES	:	Simulación de Grandes Remolinos
SGS	:	Modelo a escala de Subgrilla
DES	:	Simulación de Remolinos Separados
DNS	:	Simulación Numérica Directa
RANS	:	Ecuaciones de Navier Stokes con Promedios de Reynolds
FVM	:	Método de volúmenes finitos
VOF	:	Volumen de fluido
SIMPLE	:	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
PISO	:	Pressure implicit with splitting of operator
RLM	:	Metodo de tapa rígida
UTEC	:	Universidad de Ingeniería y Tecnología
HPC	:	High performance computing
SEHINAV	:	Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía
CITA	:	Centro de Investigación y Tecnología del Agua
UTEC	:	Universidad de Ingeniería y Tecnología
ADCP	:	Acoustic Doppler Current Profiler
VMT	:	Velociy Mapping Toolbox
DIHIDRONAV	:	Dirección de Hidrografía y Navegación
RMSE	:	Error Cuadrático Medio
R^2	:	Coefficiente de Determinación

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Las confluencias son sistemas complejos donde convergen las corrientes fluviales, como resultado de esta unión forman un cauce único aguas abajo de la confluencia. Las confluencias son zonas importantes para la mezcla de los ríos afluentes, esta mezcla suele ocurrir sobre la interfaz de mezcla a lo largo de una distancia aguas abajo, dependiendo de algunos factores como el transporte de sedimento, la temperatura o transporte de sustancias químicas o sales disueltas en cada afluente (Gaudet & Roy, 1995).

La confluencia de los ríos Marañón y Ucayali es el punto donde los dos grandes ríos de la Amazonía Peruana se unen para formar el río Amazonas. Esta confluencia es un lugar importante para la biodiversidad y la economía local, ya que es una fuente importante de agua dulce para la región y un lugar de pesca y navegación.

La hidrodinámica de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, se ve afectada por la combinación de las dos corrientes de agua con diferentes velocidades y direcciones. Esto puede resultar en una disminución o aumento de la velocidad y profundidad del agua, así como en una redistribución de los sedimentos y nutrientes. Además, la topografía del fondo del río y las características de las orillas también pueden influir en la hidrodinámica.

La velocidad de mezcla puede aumentar por efectos convectivos debido a estructuras de flujo persistente a gran escala, a menudo de forma helicoidal. Estos movimientos helicoidales generan componentes de velocidades laterales y verticales que pueden ser observados en un meandro (Constantinescu et al., 2016). Se demostró que estos tienen un efecto fuerte en la mezcla de una confluencia (Lewis & Rhoads, 2015).

La dinámica del flujo secundario en las confluencias de los ríos ha recibido una atención importante, debido a que están influenciadas por la relación de la cantidad de movimiento de flujo entre los dos afluentes y la geometría del lecho (Cheng & Constantinescu, 2020). En las confluencias de grandes ríos, la evidencia empírica y el análisis teórico sugieren que la alta relación ancho-profundidad en ríos anchos pueden impedir la formación de celdas de flujo secundario del tamaño de un canal coherente (McLelland et al., 1996; McLelland et al., 1999).

La velocidad de mezcla en la confluencia depende de los efectos combinados de la difusión molecular, la difusión turbulenta y la dispersión lateral (Rutherford, 1994). La mezcla se debe primero a la interfaz de mezcla generada por los dos flujos entrantes. Este es caracterizado por estructuras turbulentas tridimensionales que

se describen como estructuras orientadas a lo largo de la corriente y estructuras orientadas verticalmente Kelvin Helmholtz (KH) (Biron et al., 2019) y esto mejora la mezcla transversal en la región del campo cercano aguas abajo de la confluencia.

Los patrones de flujo dentro de la confluencia es bastante compleja debido a la alta turbulencia y las características de flujo tridimensional. En las confluencias hay dos flujos secundarios que giran en sentido contrario, y debido a la viscosidad del fluido, estas dos flujos secundarios se desvanecen gradualmente aguas abajo (Song et al., 2012). Por lo tanto, estudiar las características de este flujo en tales áreas no es una tarea fácil y requiere de la simulación numérica (Brito et al., 2014).

Esta tesis abarca el estudio del flujo secundario en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Gracias a la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se implementó un modelo numérico de código abierto, el cual sirve para estudiar el comportamiento del flujo secundario en la zona de la confluencia, la construcción y validación del modelo se realizó con información tomada en campo, dicha información fue medida por el Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CITA-UTEC).

En el capítulo 1 se presentan la realidad problemática del estudio del flujo secundario en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Además, se presentan los objetivos y los antecedentes investigativos de los modelos numéricos que ayudan a estudiar el comportamiento del flujo secundario en la confluencia de ríos.

En el capítulo 2 describe el marco teórico y conceptual, que abarca las ecuaciones que gobiernan la mecánica de fluidos, además el estudio de la turbulencia, métodos numéricos de soluciones de modelos numéricos, los principios de la hidráulica fluvial en confluencias de ríos.

En el capítulo 3 se describe la zona de estudio de la investigación, y se presenta la información recopilada y medida en campo de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, las cuales sirvieron para validación el modelo numérico.

En el capítulo 4 se detalla la metodología para la construcción del modelo numérico dentro del OpenFOAM, además se detallan las variables de estudio. Se explica el proceso de construcción de la malla, la implementación del solver, la definición de las condiciones iniciales y de borde, las condiciones de corrida del modelo.

En el capítulo 5 se realiza una comparación de resultados obtenidos entre el modelo numérico y las mediciones de campo, así como también la importancia de la validación del modelo numérico con las mediciones hechas en campo.

Finalmente, se presentarán las conclusiones de los casos de estudio y las recomendaciones para futuras investigaciones en el área de la hidráulica fluvial, además de las referencias bibliográficas utilizadas en la presente investigación.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El río Amazonas es considerado el río más caudaloso y largo del mundo. Se forma en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, cerca de la localidad de Nauta, en el departamento de Loreto. El río Marañón presenta un canal de tipo trenzado, mientras que el río Ucayali es de tipo meándrico, la interacción de agua y sedimentos de estos grandes ríos es importante para la Reserva Peruana Pacaya-Samiria, una de las regiones con mayor biodiversidad del planeta (Abad et al., 2014).

La ubicación del nacimiento del río Amazonas depende del río Ucayali debido a su mayor dinámica de cauce, y el comportamiento morfodinámico depende del río Marañón debido a su mayor carga de sedimentos, estos ríos generan procesos de mezcla complejos aguas abajo de la confluencia, donde se observan flujos secundarios que impulsan la mezcla de sedimentos. En el caso de la cuenca amazónica, la confluencia representa un nodo crucial para la diversidad y productividad de peces, además de mantener la dinámica anual de inundaciones y sedimentos (Guerrero et al., 2019).

Las confluencias presentan una hidrodinámica compleja que es fundamental para determinar la mezcla, el transporte de sedimentos y contaminantes, el hábitat acuático y la morfodinámica tanto dentro de las confluencias como a escala de los sistemas fluviales interconectados, en los cuales las confluencias son elementos críticos (Guillén-Ludeña et al., 2016).

Los patrones de flujos generados en una confluencia originan estructuras turbulentas complejas que están controladas por diferentes variables entre las que se encuentran la descarga de flujo, incluida su pendiente y la rugosidad de fondo de ambos afluentes, el ángulo de confluencia y la batimetría de la zona de la confluencia. Por lo tanto, estudiar el flujo en dicha zona es todo un reto que requiere de una herramienta importante como es la simulación numérica (Brito et al., 2014).

Se han desarrollado herramientas computacionales para complementar las técnicas de mediciones en campo en el estudio de la hidrodinámica fluvial. La aplicación de técnicas avanzadas de modelado de turbulencia, como la simulación de grandes remolinos (LES), es el método numérico más apropiado para simular el caudal en ríos naturales, con complejas batimetrías y estructuras formadas, debido a su capacidad de proporcionar una resolución temporal y espacial adecuada para captar los remolinos dinámicos (Constantinescu , 2014).

LES tiene una serie de ventajas sobre otras técnicas tradicionales, como los modelos basados en Navier-Stokes promediados por Reynolds (RANS) para resolver las estructuras de flujo coherentes en los ríos naturales (Constantinescu , 2014).

El problema que abordará esta tesis será entender el comportamiento del flujo se-

cundario en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali mediante la construcción de un modelo numérico tridimensional utilizando el modelo de turbulencia LES.

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo General

Estudiar el comportamiento del flujo secundario en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali mediante la implementación de un modelo numérico tridimensional usando el modelo de turbulencia de grandes remolinos (LES) mediante un código abierto.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar un estudio de la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali.
- Construir el modelo numérico tridimensional de código abierto para el estudio de la hidrodinámica en confluencias de ríos.
- Calibrar y validar el modelo numérico tridimensional y analizar el comportamiento del flujo secundario dentro de la zona hidrodinámica de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali.

1.4 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

Los flujos secundarios son causados por el cambio en la dirección del flujo del río secundario cuando ingresa al río principal. La fuerza centrífuga provoca un flujo radial superficial opuesto a la desviación, así como una corriente de fondo hacia el interior. En consecuencia, aguas abajo del río principal se producen dos tipos de flujo secundario: uno de ellos es del río principal y el segundo es del río tributario. Rotan uno contra el otro y se desvanecen gradualmente aguas abajo debido a la viscosidad del fluido (Song et al., 2012).

En confluencias de ríos grandes se ha documentado el comportamiento de afluentes con diferencia de densidad, donde el flujo del río con mayor densidad tiende a ir debajo del flujo del río con menor densidad (Herrero et al., 2018). Las fuerzas de empuje generadas por la diferencia de densidad podrían reforzar o debilitar los movimientos del flujo secundario asociados con el movimiento helicoidal (Horna et al., 2020).

Algunos investigadores han realizado estudios del comportamiento del flujo secundario mediante modelos numéricos, como es el caso de Booij (2003), que realizó simulaciones numéricas mediante el uso de modelos de Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) y Large Eddy Simulation (LES) para estudiar el flujo secundario en

canales curvos y ríos levemente curvos, donde se concluyó que los modelos RANS no logran reproducir suficientemente el patrón de flujo secundario observado en las mediciones. En cambio, el modelo LES reprodujo adecuadamente los campos de velocidades de flujo principal y secundario.

Horna et al. (2020) estudiaron los efectos de la densidad de los ríos afluentes sobre el flujo secundario formado aguas abajo de la confluencia, mediante el modelo Detached Eddy Simulation (DES), que es un modelo híbrido entre los métodos de RANS–LES, que se usa comúnmente para estudiar procesos de flujo y transporte en entornos fluviales naturales.

Duguay et al. (2022) centró su investigación en estudiar la estructura turbulenta en la zona de la interfaz de mezcla en la confluencia de los ríos Mitis y Neigette en Canadá, mediante modelos de grandes remolinos (LES), donde validó su modelo numérico mediante mediciones hidrométricas y videos aéreos de las estructuras turbulentas a gran escala que hacen visibles la turbidez de la interfaz de mezcla.

De acuerdo con las fuentes consultadas, los modelos numéricos son necesarios para estudiar algunas variables hidrodinámicas en la zona de la confluencia, la presente tesis estudiará el comportamiento del flujo secundario en la confluencia de los ríos amazónicos mediante un modelo numérico de código abierto. El modelo que será utilizado es el Large Eddy Simulation (LES) que permite resolver de mejor manera los efectos turbulentos en la zona de la confluencia. La construcción y validación del modelo será realizada con información hidrométrica medida en campo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 ECUACIONES QUE GOBIERNAN EL MOVIMIENTO DEL FLUIDO

Las ecuaciones que gobiernan el movimiento del fluido son las ecuaciones de continuidad, momento y energía (Anderson, 1992); se conocen como las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas ecuaciones describen cómo un fluido se mueve en respuesta a las fuerzas que actúan sobre él.

Estas ecuaciones se pueden describir de la siguiente manera:

2.1.1 Ecuación de conservación de masa

La ecuación de conservación de masa es una ley fundamental en la mecánica de fluidos y establece que la masa total de un fluido no puede ser creada ni destruida, solo puede ser transportada de un lugar a otro en forma de flujo.

Esta ecuación se expresa matemáticamente como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido, t es el tiempo, U es la velocidad del fluido y ∇ es el operador gradiente.

La ecuación 2.1 establece que cualquier cambio en la masa del fluido en un volumen dado se debe al flujo de entrada y salida del mismo volumen.

Para fluidos incomprensibles en la ecuación 2.1 la densidad ρ será constante, en consecuencia la derivada de la densidad respecto al tiempo será igual a cero, finalmente la ecuación será la siguiente:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2.2)$$

2.1.2 Ecuación de la conservación de momento

La ecuación de conservación de momento establece que la fuerza neta aplicada a un fluido es igual a la tasa de cambio de la cantidad de movimiento del fluido en el tiempo.

Esta ecuación se expresa matemáticamente como:

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + U \cdot \nabla U \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 U + \rho g \quad (2.3)$$

Donde p es la presión del fluido, μ es su viscosidad, g es la aceleración debido a la

gravedad y ∇^2 es el operador laplaciano.

La ecuación 2.3 establece que la tasa de cambio de la cantidad de movimiento de un fluido se debe a la suma de las fuerzas de presión, viscosidad y gravedad que actúan sobre el fluido.

En consecuencia, una ecuación de transporte general para fluidos incompresibles se puede escribir de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi u) = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\Gamma_{\phi} \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (2.4)$$

Donde la variable Γ_{ϕ} representa el coeficiente de difusión molecular.

2.1.3 Ecuación de la conservación de la energía

Esta ecuación establece que la energía total en cualquier volumen de fluido no cambia con el tiempo, a menos que haya entrada o salida de energía en ese volumen.

Esta ecuación se expresa matemáticamente como:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e U) = -p \nabla \cdot U + \nabla \cdot (K \nabla T) + \Phi + S_e \quad (2.5)$$

Donde e es la energía específica del fluido (la energía por unidad de masa), k es la conductividad térmica del fluido, T es la temperatura del fluido, todos los efectos debidos a las tensiones viscosas en esta ecuación de energía interna se describen mediante la función de disipación Φ (Versteeg & Malalasekera, 2007) y el término fuente de calor es denotado por S_e .

Esta ecuación 2.5 establece que cualquier cambio en la energía total del fluido en un volumen dado se debe al trabajo realizado por las fuerzas de presión y viscosidad, el flujo de calor y la energía debida a la gravedad.

2.2 TURBULENCIA

La turbulencia en mecánica de fluidos es un fenómeno complejo y caótico que se produce cuando un fluido se mueve a alta velocidad o se somete a una perturbación. En la turbulencia, el fluido se caracteriza por una serie de vórtices, remolinos y fluctuaciones de velocidad, que se producen a diferentes escalas y que cambian de forma impredecible en el tiempo.

En la turbulencia, la dirección y la velocidad del flujo del fluido varían aleatoriamente y se caracterizan por una gran cantidad de energía cinética. La turbulencia se produce cuando la energía cinética del flujo es suficientemente alta para superar la viscosidad del fluido, lo que provoca la formación de vórtices y remolinos en

el flujo. Para caracterizar el tipo de flujo, si es considerado un flujo laminar o un flujo turbulento, se utiliza el número de Reynolds (Cable, 2009), expresada por la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{D \cdot U}{\nu} \quad (2.6)$$

En cauces fluviales D representa la profundidad hidráulica (área de la sección entre el perímetro mojado o más conocido como el radio hidráulico), U representa la velocidad media y ν la viscosidad cinemática. Cuando el Re es menor que 500 o 600, el flujo es laminar. Cuando Re se encuentra entre 500 y 2000, se dice que el flujo está en estado de transición. Si el Re es mayor que 2000, entonces el flujo es turbulento.

Uno de los orígenes de la turbulencia es la gradiente de la velocidad, donde representa la tasa a la que las capas adyacentes de un fluido se mueven unos respecto de otras. La Figura N° 2.1 nos muestra la transición de un flujo laminar entrante a un flujo turbulento completamente desarrollado. Debido a la fricción las velocidades más cercanas a la pared disminuyen y aparecen tensiones viscosas que generan energía cinética turbulenta.

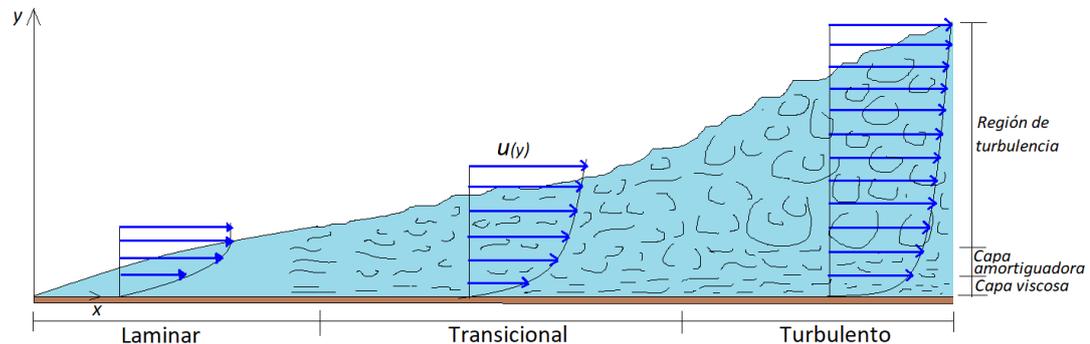


FIGURA N° 2.1: Proceso de transición de una capa límite laminar a una turbulenta sobre una placa plana. Elaboración propia

La medición típica de la velocidad de un punto dentro de un flujo turbulento, tiene el comportamiento aleatorio y caótico como muestra la Figura N° 2.2. En el flujo turbulento generalmente se divide la velocidad de la Figura N° 2.2 en una parte promediada en el tiempo U , que es independiente del tiempo (cuando el flujo medio es constante), y en una parte fluctuante $u'(t)$, de modo que se tiene la siguiente ecuación:

$$u(t) = U + u'(t) \quad (2.7)$$

A la ecuación 2.7 se la llama la descomposición de Reynolds. Ahora se puede

caracterizar un flujo turbulento en términos de los valores medios de la propiedad de flujos (U, V, W) y algunas propiedades estadísticas de sus fluctuaciones (u', v', w'), las fluctuaciones turbulentas siempre tienen un carácter espacial tridimensional del espacio (Versteeg & Malalasekera, 2007).

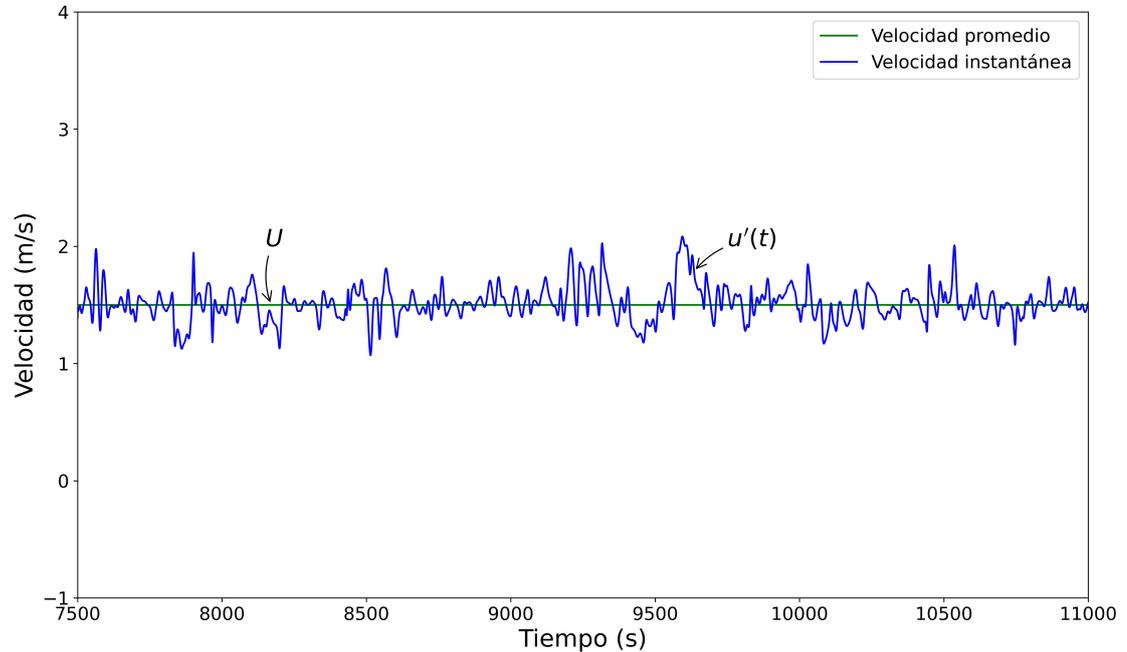


FIGURA N° 2.2: Medición típica de velocidad puntual en flujo turbulento. Elaboración propia

2.2.1 Características de un flujo turbulento

Un flujo turbulento es aquel en el que las partículas se mueven de manera caótica y aleatoria en múltiples direcciones y velocidades, lo que resulta en una mezcla y agitación intensa del fluido. No existe una definición exacta de flujo turbulento, pero presenta una serie de rasgos característicos (Tennekes et al., 1972) tales como:

- **Irregularidad:** El flujo turbulento es irregular y caótico (puede parecer tener un comportamiento aleatorio, no obstante está regido por las ecuaciones de Navier-Stokes). Además, el flujo turbulento consiste en un espectro de diferentes escalas (tamaños de remolinos). Un remolino turbulento puede existir en una determinada región del espacio por un cierto tiempo y posteriormente se puede destruir (por un proceso de disipación o cascada).
- **Difusividad:** En los flujos turbulentos la difusividad aumenta. El incremento de la difusividad genera un aumento de la resistencia (rozamiento de la pared) y la transferencia de calor en flujos internos, tales como canales y tuberías.
- **Grandes números de Reynolds:** El flujo turbulento ocurre cuando existen números de Reynolds altos.

- *Tridimensional*: El flujo turbulento es de carácter tridimensional e inestable. Sin embargo, estas ecuaciones se pueden promediar en el tiempo, y se puede tratar al flujo como bidimensional (cuando la geometría es bidimensional).
- *Disipación*: El flujo turbulento es disipativo, donde la energía cinética de los remolinos pequeños (disipadores) son transformados en energía térmica. Los remolinos ligeramente más grandes brindan energía cinética a los remolinos pequeños.
- *Continuo*: Pese a que existen pequeñas escalas turbulentas en el flujo, estos son mucho más grandes que la escala molecular; por lo tanto, se puede tratar al flujo como continuo.

2.2.2 Cascada de energía

El efecto de cascada de energía es un fenómeno muy importante en los fluidos turbulentos que describe cómo la energía cinética se transfiere de las escalas grandes a las escalas pequeñas en el flujo. En otras palabras, cuando un fluido se vuelve turbulento, se produce una transferencia de energía desde las estructuras más grandes (de mayor escala) a las estructuras más pequeñas (de menor escala) (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Este efecto se produce a través de una serie de interacciones no lineales entre los diferentes modos de onda presentes en el flujo, que crean vórtices de diferentes tamaños y frecuencias. La energía cinética se transfiere de los vórtices grandes a los vórtices más pequeños a través de este proceso de interacción, lo que resulta en una distribución de energía en diferentes escalas de longitud (Foias et al., 2001).

En general, la energía cinética del flujo se distribuye en una serie de escalas de longitud, desde las escalas más grandes (llamadas escalas integrales) hasta las escalas más pequeñas (llamadas escalas de Kolmogorov). En las escalas más pequeñas, la energía cinética se disipa en forma de calor debido a la viscosidad del fluido.

El efecto de cascada de energía es importante en la dinámica de los fluidos turbulentos, ya que determina cómo se distribuye la energía en el flujo y cómo se disipa la energía cinética a través de la viscosidad del fluido.

2.2.3 Escalas de turbulencia

Los flujos turbulentos muestran una gran variedad de vórtices o remolinos con diferentes escalas cada uno dentro del flujo, estas escalas se pueden presentar de acuerdo a la gráfica de espectro de energía turbulenta aguas abajo de una red. Todas las propiedades fluctuantes de un flujo turbulento contienen energía en un

amplio rango de frecuencias o números de onda.

La Energía espectral $E(\kappa)$ se encuentra en función del número onda $\kappa = 2\pi/\lambda$, donde λ es la longitud de onda de los remolinos. La energía espectral $E(\kappa)$ (unidades m^3/s^2) representa la energía cinética por unidad de masa y por unidad de número de onda de las fluctuaciones alrededor del número de onda κ . El diagrama de la Figura N° 2.3 muestra que el espectro de energía alcanza el punto máximo cuando los números de ondas son bajos, lo que demuestra que los remolinos más grandes disipan la mayor energía (son más energéticos).

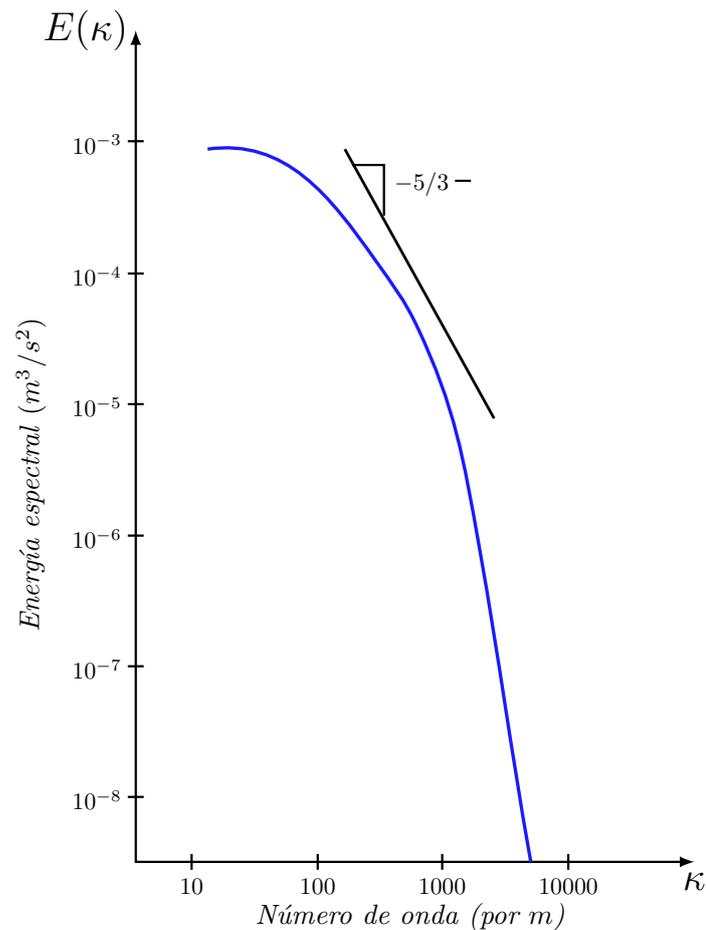


FIGURA N° 2.3: Espectro de energía de flujo turbulento. Elaboración propia basado en (Versteeg & Malalasekera, 2007)

Las escalas que presentan un movimiento más pequeño en un flujo turbulento (longitudes del orden de 0.1 a 0.01mm con frecuencias al rededor de 10 kHz en flujos turbulentos típicos) están dominados por los efectos viscosos. Estas escalas son denominadas como microescalas de Kolmogorov. En estas escalas el trabajo que realizan es en contra de la acción de las tensiones viscosas, de tal manera que la energía asociada con el movimiento de los remolinos de pequeña escala se disi-

pan y se convierten en energía térmica interna. Esta disipación da como resultado mayores pérdidas de energía asociadas con los flujos turbulentos.

Kolmogorov argumentó que para los remolinos más pequeños, su energía espectral debe depender solo de la tasa de disipación de la energía turbulenta y de la viscosidad cinemática del fluido. Los remolinos más pequeños en flujo turbulento son de carácter isotrópico (no dependen de la dirección).

Finalmente, Kolmogorov presentó los remolinos de tamaños intermedios, que son lo suficientemente grandes para que su comportamiento no sea afectado por la acción de las fuerzas viscosas (como en el caso de los remolinos grandes, pero a su vez lo suficientemente pequeños para que los detalles de su comportamiento puedan expresarse en función de la tasa de disipación de energía turbulenta como en el caso de los remolinos pequeños). La Figura N° 2.3 muestra una línea de pendiente de $-5/3$, lo que indica que para las medidas que se muestran, la separación de escala es insuficiente para un sub rango inercial claro. Alrededor de $\kappa \approx 1000$ se presenta la superposición entre los remolinos grandes y pequeños (Versteeg & Malalasekera, 2007)).

2.3 MODELOS DE TURBULENCIA

En mecánica de fluidos existen varios modelos de turbulencia que se utilizan para predecir el comportamiento de fluidos turbulentos. Estos modelos se basan en diferentes suposiciones y simplificaciones para hacer más fácil la solución matemática del problema.

En la mayoría de aplicaciones prácticas en la ingeniería los flujos presentan números de Reynolds altos donde se observa la turbulencia en estos casos los ingenieros necesitan herramientas capaces de representar el efecto de la turbulencia mediante modelos de turbulencia, y se pueden agrupar en tres categorías:

- *Modelo de turbulencia Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)*: Para estos modelos las ecuaciones de Navier-Stokes son promediadas en el tiempo y sus términos adicionales resultantes, son relacionadas con las fluctuaciones turbulentas, se resuelven mediante modelos clásicos como modelo $k - \epsilon$ y el Reynolds Stress Model (RSM).
- *Large Eddy Simulation (LES)*: Se centra en resolver las ecuaciones de Navier-Stokes solo para las escalas más grandes de la turbulencia, mientras que las escalas más pequeñas se modelan con modelos subgrilla. El modelo subgrilla se utiliza para aproximar los efectos de las escalas más pequeñas en las escalas grandes. LES es una técnica de simulación muy potente, pero también es computacionalmente intensiva y requiere una gran cantidad de

recursos informáticos para su implementación.

- *Direct Numerical Simulation (DNS)*: Se encarga de resolver la dinámica de todos los movimientos de fluidos en todas las escalas, lo que proporciona una simulación muy detallada y precisa del comportamiento del fluido. La DNS es especialmente adecuada para el estudio de flujos con alta resolución espacial y temporal, donde los efectos de las escalas más pequeñas son importantes. Sin embargo, el DNS es computacionalmente muy costosa y requiere una gran cantidad de recursos informáticos.

En esta investigación solo trataremos los dos primeros casos porque están relacionados con la presente investigación.

2.3.1 Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)

Considerando la ecuación de continuidad 2.2 la cual es para un caudal medio:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2.8)$$

Promediando en el tiempo las ecuaciones 2.3 de Navier-Stokes y reorganizando los términos adicionales de la velocidad fluctuantes, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) para un fluido incompresible.

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot (U\mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \nabla \cdot (\nabla U) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\overline{\rho u'^2})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{\rho u'v'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot (V\mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \nabla \cdot (\nabla V) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\overline{\rho u'v'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{\rho v'^2})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] \\ \frac{\partial W}{\partial t} + \nabla \cdot (W\mathbf{U}) &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla \cdot (\nabla W) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial(-\overline{\rho u'w'})}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{\rho v'w'})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] \end{aligned} \quad (2.9)$$

En las ecuaciones 2.9, tenemos que la variable ν es la viscosidad cinemática. Los términos de velocidad fluctuante están asociados al llamado esfuerzo de Reynolds, compuesto por:

- Tres esfuerzos normales:

$$\begin{aligned}\tau_{xx} &= -\overline{\rho u'^2} \\ \tau_{yy} &= -\overline{\rho v'^2} \\ \tau_{zz} &= -\overline{\rho w'^2}\end{aligned}\quad (2.10)$$

b) Tres esfuerzos cortantes:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= \tau_{yx} = -\overline{\rho u'v'} \\ \tau_{xz} &= \tau_{zx} = -\overline{\rho u'w'} \\ \tau_{yz} &= \tau_{zy} = -\overline{\rho v'w'}\end{aligned}\quad (2.11)$$

Según el supuesto de Boussinesq, las tensiones de Reynolds son proporcionales a las tasas de deformación. Usando una notación de sufijo, se puede expresar de la siguiente manera:

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} = \mu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.12)$$

Cuando $i = j$ el valor de $\delta_{ij} = 1$, y para $i \neq j$ el valor de $\delta_{ij} = 0$.

Donde la variable μ_t representa la viscosidad turbulenta, y k representa la energía cinética turbulenta.

Surgen términos de transporte turbulento adicionales similares cuando se deriva la ecuación 2.4, considerando una cantidad escalar arbitraria, $\phi(t) = \Phi + \phi'(t)$:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\phi \mathbf{U}) = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial (-\overline{\rho u' \phi'})}{\partial x} + \frac{\partial (-\overline{\rho v' \phi'})}{\partial y} + \frac{\partial (-\overline{\rho w' \phi'})}{\partial z} \right] + S_\phi \quad (2.13)$$

Entonces ahora es necesario aplicar modelos de turbulencia que puedan predecir las tensiones de Reynolds y los términos de transporte escalar y cerrar el sistema formado por las ecuaciones de flujo medio 2.8, 2.9 y 2.13.

Se realizará una explicación de los modelos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$, además del modelo LES que es utilizada en esta investigación para calcular el flujo en una confluencia. Por lo tanto, se realiza una breve descripción de cada una de ellas.

TABLA N° 2.1: Modelos de turbulencia más comunes clasificados por ecuaciones de transporte adicionales.

Nº de ecuaciones de transporte extra	Nombre
Cero	Mixing length model
Uno	Spalart-Allmaras model
Dos	$k - \varepsilon$ model
Dos	$k - \omega$ model
Dos	Algebraic stress model
Siete	Reynolds Stress Model

2.3.1.1 Modelo $k - \varepsilon$

La energía cinética instantánea $K(t)$, de un flujo turbulento, puede ser descompuesta de la siguiente manera: $K(t) = K + k$, donde la energía cinética media $K = \frac{1}{2}(U^2 + V^2 + W^2)$, y la energía cinética turbulenta puede ser expresada de la siguiente manera $k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$.

La ecuación de la energía cinética media se puede obtener multiplicando la componente de la velocidad media U, V o W por la componente x, y o z de las ecuaciones RANS Equation 2.9, respectivamente. Luego de sumar los resultados y reordenar los términos, se obtendrá la ecuación promediada en el tiempo que gobierna la energía cinética media del flujo:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho K \mathbf{U}) = \nabla \cdot (-P\mathbf{U} + 2\mu \mathbf{U} S_{ij} - \rho \overline{U u'_i u'_j}) - 2\mu S_{ij} \cdot S_{ij} + \rho \overline{u'_i u'_j} \cdot S_{ij} \quad (2.14)$$

La ecuación de la energía cinética turbulenta se obtiene a partir de la multiplicación de cada una de las ecuaciones instantáneas de Navier-Stokes 2.3 por los componentes apropiados de velocidad fluctuante (ejemplo multiplicando la componente x por la velocidad fluctuante u') y sumando todos los resultados, seguida de la repetición de este proceso en las ecuaciones RANS 2.9, luego restando las dos ecuaciones resultantes y realizando un reordenamiento, dará como resultado la ecuación de la energía cinética turbulenta “ k ” (Versteeg & Malalasekera, 2007):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot (-\overline{p' u'} + 2\mu \overline{u' s'_{ij}} - \rho \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_j u'_i u'_j}) - 2\mu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} - \rho \overline{u'_i u'_j} \cdot S_{ij} \quad (2.15)$$

La disipación de la energía cinética turbulenta es originada por el trabajo realizado por los remolinos más pequeños en contra de las tensiones viscosas. La tasa de

disipación por unidad de volumen normalmente se escribe como el producto de la densidad ρ y la tasa de disipación de energía cinética turbulenta por unidad de masa ε , entonces:

$$\varepsilon = 2\nu \overline{s'_{ij} \cdot s'_{ij}} \quad (2.16)$$

La dimension de ε es m^2/s^3 . Esta cantidad es de suma importancia dentro del estudio de la dinámica de la turbulencia. Es el término de destrucción en la ecuación de energía cinética turbulenta, con el mismo orden de magnitud al término de producción. Cuando el número de Reynolds es grande, el término del transporte viscoso en la ecuación 2.15 siempre es muy pequeño en comparación con el término de transporte turbulento y de disipación (Versteeg & Malalasekera, 2007).

El modelo $k - \varepsilon$ estándar (Launder & Spalding, 1974) fue desarrollado desde el concepto simplista de que k y ε están relacionados con una escala de velocidad ϑ y una escalada de longitud ℓ según la siguiente ecuación:

$$\vartheta = k^{1/2} \quad (2.17)$$

$$\ell = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (2.18)$$

A partir de estas ecuaciones, mediante el análisis dimensional, la viscosidad de remolino se puede escribir de la siguiente manera:

$$\mu_t = C_\mu \rho \vartheta \ell = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

Donde C_μ es una constante adimensional.

Finalmente, el modelo $k - \varepsilon$ estándar usa las siguientes ecuaciones de transporte:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.21)$$

Las ecuaciones 2.20 y 2.21 contienen algunas constantes empíricas que pueden ser ajustados a los siguientes valores:

$$C_\mu = 0.09 \quad \sigma_k = 1.00 \quad C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad (2.22)$$

El modelo $k-\varepsilon$ es el modelo más utilizado y validado, usado con una precisión razonable para un propósito general. No obstante, se tiene algunas críticas al modelo $k-\varepsilon$ estándar, debido a la producción y destrucción de la energía cinética turbulenta, lo que muestra que la tasa de disipación ε es grande donde la producción de k es grande. Este comportamiento ocurre en los flujos confinados, pero no ocurre en algunos flujos no confinados, o flujos con grandes tensiones adicionales, o flujos rotatorios.

En respuesta a esto, Yakhot et al. (1992) implementaron algunos modelos avanzados de turbulencia con dos ecuaciones, idearon las ecuaciones del modelo $k-\varepsilon$ del grupo de renormalización (RNG) para flujos con números de Reynolds altos:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\alpha_k \mu_{eff} \nabla k) + \tau_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{U}) = \nabla \cdot (\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.24)$$

Donde tenemos a continuación las variables:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.25)$$

$$C_\mu = 0.0845 \quad \alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39 \quad C_{1\varepsilon} = 1.42 \quad C_{2\varepsilon} = 1.68 \quad (2.26)$$

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad \eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2S_{ij} \cdot S_{ij}} \quad \eta_0 = 4.377 \quad \beta = 0.012 \quad (2.27)$$

Este modelo consiste en la variación de las ecuaciones del modelo $k-\varepsilon$ estándar que elimina las pequeñas escalas de movimiento de las ecuaciones gobernantes expresando sus efectos en términos de movimientos de mayor escala a una viscosidad modificada (Versteeg & Malalasekera, 2007). Se puede observar que el modelo modifica las ecuaciones de ε también al contener un término de corrección dependiente de la deformación en la constante $C_{1\varepsilon}$ del término de producción.

2.3.1.2 Modelo $k-\omega$

Una de las mejores alternativas para tratar de superar algunas de las limitaciones del modelo $k-\varepsilon$ (y variantes) es el modelo $k-\omega$, que también es un modelo de turbulencia de dos ecuaciones, que fue desarrollado por Wilcox (1988), además la variable k , utiliza como segunda variable a la frecuencia de turbulencia $\omega = \varepsilon/k$. Entonces la viscosidad turbulenta viene dada por:

$$\mu_t = \rho k / \omega \quad (2.28)$$

Las ecuaciones de transporte para k y ω para flujos turbulentos con altos números de Reynolds se desarrollan de la siguiente manera:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (2.29)$$

Donde P_k esta dada por la siguiente expresión:

$$P_k = \left(2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad (2.30)$$

Representa la tasa de producción de energía cinética turbulenta, además:

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \mathbf{U}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta_1 \rho \omega^2 \quad (2.31)$$

El valor de las constantes empíricas son las siguientes:

$$\sigma_k = 2.0 \quad \sigma_\omega = 2.0 \quad \gamma_1 = 0.553 \quad \beta_1 = 0.075 \quad \beta^* = 0.09 \quad (2.32)$$

Según la literatura no queda claro cuál de los dos modelos de turbulencia $k-\varepsilon$ o $k-\omega$ sea más adecuado para propósitos generales. Según Versteeg and Malalasekera (2007) menciona que el modelo $k-\omega$ presenta un rango similar de fortalezas y debilidades que el modelo $k-\varepsilon$ pero no incluye explicaciones de interacciones más sutiles entre las tensiones turbulentas y el flujo medio en comparación con el Reynolds Stress Model (RSM).

No obstante, en el caso del RSM los costos computacionales son superiores, debido a que es necesario resolver 7 ecuaciones de turbulencia adicionales.

2.3.2 Large Eddy Simulation (LES)

La simulación de grandes remolinos (LES) se presenta como una solución diferente para la simulación de flujos turbulentos. La idea principal es que los remolinos más grandes deben ser calculados para cada problema dependiente del tiempo.

Mediante una descomposición, una variable de flujo puede ser caracterizado como la suma de la función filtrada ($\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}, \bar{p}$, etc.) que presenta variaciones espaciales que son mayores que el ancho de corte y son resueltas mediante el cálculo de LES, más las variaciones espaciales no resueltas (u', v', w', p' , etc.) que presentan una

escala de longitud menor que el ancho de corte del filtro. En forma general podemos escribirlo:

$$\phi(x, t) = \overline{\phi}(x, t) + \phi'(x, t) \quad (2.33)$$

En lugar de promediar el tiempo (como los modelos de turbulencia RANS), LES utiliza una operación de filtrado espacial (indicada por la barra superior) con se muestra en la ecuación 2.33, para separar los remolinos más grandes de los más pequeños.

El procedimiento inicial consiste en seleccionar la función de filtrado, además de una cierta anchura de corte que separar la información relativa a los remolinos más grande (que serán resueltos) de los remolinos turbulentos más pequeños (que serán rechazados y destruidos). La función de filtrado se define como $G(x, x', \Delta)$ aplicada en la ecuación siguiente.

$$\overline{\phi}(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x', \Delta) \phi(x', t) dx'_1 dx'_2 dx'_3 \quad (2.34)$$

Donde:

$\overline{\phi}(x, t)$ = función de filtrado.

$\phi(x, t)$ = función original (sin filtrar).

Δ = ancho de corte del filtro.

El ancho de corte en las ecuaciones pretende ser una medida indicativa del tamaño de los remolinos que serán retenidos en los cálculos y aquellos remolinos que serán rechazados. La selección más habitual es tomar el ancho de corte del mismo orden que el tamaño de la grilla. En cálculos tridimensionales de celdas de diferentes longitudes tomar $\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z}$.

Mediante el filtrado de la ecuación 2.2 produce fácilmente la ecuación de continuidad para LES en flujos incompresibles:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (2.35)$$

Realizando el filtrado de la ecuación 2.3 en las tres direcciones, tenemos como resultado las ecuaciones de Navier-Stokes LES para un flujo incompresible:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{\mathbf{U}}) &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial x} + \mu\nabla \cdot (\nabla\bar{u}) - (\nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{\mathbf{U}}) - \nabla \cdot (\rho\bar{u}\bar{\mathbf{U}})) \\
 \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{\mathbf{U}}) &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu\nabla \cdot (\nabla\bar{v}) - (\nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{\mathbf{U}}) - \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{\mathbf{U}})) \\
 \frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{\mathbf{U}}) &= -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu\nabla \cdot (\nabla\bar{w}) - (\nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{\mathbf{U}}) - \nabla \cdot (\rho\bar{w}\bar{\mathbf{U}}))
 \end{aligned} \tag{2.36}$$

(I) (II) (III) (IV) (V)

Cada uno de los términos de la ecuación 2.36 según (Versteeg & Malalasekera, 2007) fueron nombrados de la siguiente manera como: (I) representa la tasa de cambio del momento en x , y , y z filtrado; (II) representa el flujo convectivo, y (IV) los flujos difusivos del momento x , y , y z filtrado; (III) son los gradientes en las direcciones de x , y , y z del campo de presión filtrado; y (V) los términos extra causados por la operación de filtrado (al igual que las tensiones de Reynolds en las ecuaciones RANS que surgen como consecuencia del promedio temporal). El último término (V) pueden considerarse como una divergencia de un conjunto de tensiones τ_{ij} escrito como:

$$\nabla \cdot (\rho\bar{u}_i\bar{\mathbf{U}} - \rho\bar{u}_i\bar{\mathbf{U}}) = \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\bar{u} - \rho\bar{u}_i\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\bar{v} - \rho\bar{u}_i\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{u}_i\bar{w} - \rho\bar{u}_i\bar{w})}{\partial z} = \frac{\partial\tau_{ij}}{\partial x_j} \tag{2.37}$$

Donde:

$$\tau_{ij} = \rho\bar{u}_i\bar{\mathbf{U}} - \rho\bar{u}_i\bar{\mathbf{U}} = \rho\bar{u}_i\bar{u}'_j - \rho\bar{u}_i\bar{u}'_j \tag{2.38}$$

Estas tensiones normalmente se denominan tensiones LES Sub-Grid-Scale (SGS). Usando la ecuación de descomposición 2.33 en la ecuación 2.38, se obtienen las tensiones SGS:

$$\tau_{ij} = \rho\bar{u}_i\bar{u}'_j - \rho\bar{u}_i\bar{u}'_j = (\rho\bar{u}_i\bar{u}'_j - \rho\bar{u}_i\bar{u}'_j) + (\rho\bar{u}_i\bar{u}'_j + \rho\bar{u}'_i\bar{u}_j) + \rho\bar{u}'_i\bar{u}'_j \tag{2.39}$$

(I) (II) (III)

Las tensiones SGS contienen tres grupos de contribuciones que son las siguientes: (I) las tensiones de Leonard que son debido a los efectos a escala resuelta; (II) las tensiones cruzadas, debido a las interacciones entre los remolinos SGS y el flujo resuelto; (III) las tensiones de Reynolds, causadas por la transferencia de momento

convectivo debido a las interacciones de los remolinos SGS.

De la misma manera que las tensiones de Reynolds en las ecuaciones RANS, las tensiones SGS ecuación 2.39 deben modelarse. Información más detallada sobre estos modelos se presentan en (Chai & Mahesh, 2012) o en (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Debido a que LES resuelva ecuaciones inestables, le hace mucho más costoso computacionalmente que los modelos de turbulencia de dos ecuaciones. Sin embargo, si lo comparamos con el modelo RSM, esta diferencia es muy modesta. Para algunos casos en los que los vórtices persisten a gran escala, presenta una influencia sustancial en el desarrollo del flujo, como es el caso de las confluencias fluviales, la precisión de un modelo LES y su capacidad de reproducir algunas características dependientes del tiempo generan mejores resultados.

2.3.3 Ley de la pared

El comportamiento del flujo y su estructura turbulenta cerca de las paredes sólidas es considerablemente diferente a los flujos turbulentos libres. El flujo turbulento cerca del límite de las paredes sólidas está compuesta por cuatro regiones específicas en la Figura N° 2.4, donde δ representa el espesor de la capa límite.

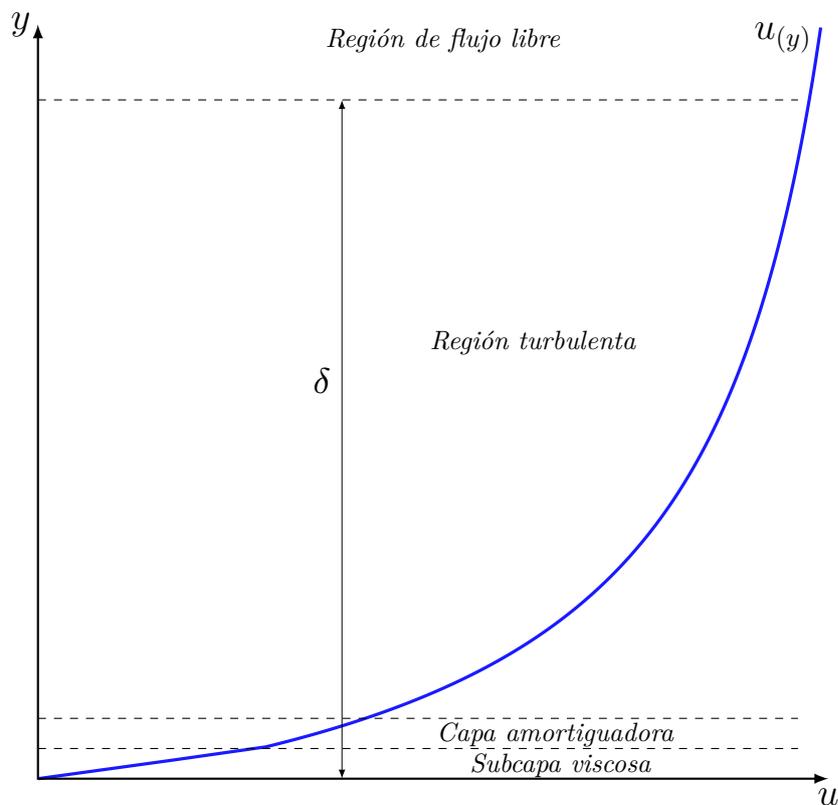


FIGURA N° 2.4: Perfil típico de velocidad media cerca de un límite sólido. Elaboración propia

- **Subcapa viscosa:** Es una capa muy delgada cerca de la pared donde dominan las fuerzas viscosas y la velocidad varía linealmente con la distancia a la pared, iniciando desde cero en la pared.
- **Capa amortiguadora:** Es una región delgada donde el flujo pasa a ser un flujo turbulento.
- **Región turbulenta:** Es una región completamente turbulenta donde la velocidad promedio está relacionada con el logaritmo de la distancia a la pared.
- **Región de flujo libre:** Es una región turbulenta donde la gradiente de la velocidad promedio es cero.

Es necesario definir la velocidad adimensional u^+ , y la distancia adimensional hacia la pared y^+ , para poder representar el comportamiento del flujo en estas capas.

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} = f(y^+) \quad y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \quad (2.40)$$

Donde:

U = velocidad media

u_τ = velocidad cortante = $\sqrt{\tau_w / \rho}$

τ_w = esfuerzo cortante en la pared = $\mu \frac{\partial U}{\partial y}$

La subcapa viscosa es extremadamente delgada en la práctica, está ubicada aproximadamente en $y^+ < 5$. Luego integrando el esfuerzo cortante τ_w con respecto a y seguido aplicando la condición de límite $U = 0$ si $y = 0$, se obtiene una relación lineal entre la velocidad media y la distancia a la pared (Versteeg & Malalasekera, 2007):

$$U = \frac{\tau_w y}{\mu} \quad (2.41)$$

Luego de unas operaciones algebraicas simples y haciendo uso de las definiciones de u^+ a su vez de y^+ se llega:

$$u^+ = y^+ \quad (2.42)$$

Debido a la relación lineal entre la velocidad y la distancia desde la pared, esta capa también es conocida como la subcapa lineal. Mientras que la capa amortiguadora se encuentra entre $5 < y^+ < 30$.

Para la capa de la ley logarítmica tenemos que y^+ se encuentra entre $30 < y^+ < 500$

(Versteeg & Malalasekera, 2007), se deriva otra relación entre u^+ e y^+ :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2.43)$$

Donde:

$\kappa \approx 0.4$: constante de von Kármán

$E \approx 9.8$: constante aditiva (para paredes lisas)

Se puede calcular el campo de flujo en estos cuatro regímenes. No obstante, para evitar tener que usar mallas muy finas cerca de la pared, los modelos de turbulencia RANS y LES usan funciones de pared, donde relacionan el esfuerzo cortante local de la pared con la velocidad media, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación.

2.4 MODELO NUMÉRICO

Un modelo numérico es una herramienta matemática que permite simular el comportamiento de sistemas complejos a través de la resolución de ecuaciones numéricas. Este es usado por la Dinámica de Fluidos computacional (CFD) para estudiar y predecir el comportamiento del fluido en movimiento. Estos modelos son soluciones aproximadas de las ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos, que a menudo son difíciles o imposibles de resolver de manera analíticamente.

La dinámica de fluidos computacional se basa en la solución numérica de las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de los fluidos, como las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales describen la conservación de la masa, el momento y la energía. Estas ecuaciones son discretizadas y resueltas utilizando métodos numéricos como los métodos de volúmenes finitos, los métodos de elementos finitos y los métodos de diferencias finitas. Además, se utilizan modelos matemáticos y empíricos para describir fenómenos complejos como la turbulencia y la transferencia de calor (Ferziger et al., 2002).

En la dinámica de fluidos computacional, existen varios modelos numéricos que gracias a los métodos de discretización pueden resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el comportamiento de los fluidos en movimiento. Algunos de los modelos numéricos más comunes son:

- **Modelos de diferencias finitas:** En este enfoque, el dominio del fluido se divide en una malla de puntos discretos, y las ecuaciones diferenciales que describen el flujo se aproximan mediante diferencias finitas. Este método es relativamente simple y fácil de implementar, pero puede ser numéricamente

inestable en algunos casos.

- *Modelos de elementos finitos*: En este enfoque, el dominio del fluido se divide en elementos finitos, y las ecuaciones diferenciales se aproximan mediante funciones de forma para cada elemento. Este método es más preciso que el método de diferencias finitas, pero también es más complejo y computacionalmente intensivo.
- *Modelos de volúmenes finitos*: En este enfoque, el dominio del fluido se divide en celdas o volúmenes finitos, y las ecuaciones diferenciales se resuelven en cada celda. Este método es muy utilizado en la industria debido a su precisión y robustez.
- *Modelos de Lattice Boltzmann*: Este es un método relativamente nuevo que simula el flujo mediante el movimiento de partículas ficticias. Es muy eficiente computacionalmente y puede manejar geometrías complejas, pero su precisión puede ser limitada en algunos casos.
- *Modelos de simulación de partículas*: Este enfoque simula el flujo a nivel de partículas individuales. Es muy preciso, pero también muy intensivo en recursos computacionales y limitado a problemas de flujo de partículas discretas.

Cada modelo numérico tiene sus ventajas y desventajas y la elección del método adecuado depende de la aplicación y de la disponibilidad de recursos computacionales.

Vamos a profundizar en el método de discretización de volúmenes finitos porque es el método usado en los modelos de la presente investigación.

2.4.1 Método de volúmenes finitos (FVM)

Es un método numérico utilizado para resolver ecuaciones diferenciales parciales que describen el comportamiento de los fluidos. En este método, el dominio se divide en pequeños Volúmenes de Control (VCs), y se integran las ecuaciones de conservación sobre cada una de VCs. El objetivo es aproximar la solución en cada VCs y obtener una solución global para todo el dominio.

En el FVM, las ecuaciones de conservación se expresan en forma integral sobre cada VCs, lo que permite obtener una ecuación de balance para cada VCs, relacionando las entradas y salidas de masa, cantidad de movimiento y energía. En este proceso, el teorema de la divergencia de Gauss es usado para convertir integrales de volumen sobre operadores de divergencia y gradiente a integrales de superficie. Tenemos la ecuación 2.4 de transporte general:

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (2.44)$$

Aplicando el teorema:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho u \phi \cdot dA = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_{\phi} dV \quad (2.45)$$

De las ecuaciones 2.44 y 2.45 tenemos que ϕ representa la variable transportada a través de un medio de densidad ρ , y con constante de difusión Γ que se mueve a una velocidad u con un término fuente S_{ϕ} .

Para el cálculo siguiente del sistema algebraico de ecuaciones, las integrales son aproximadas, para las volumétricas, realizando un cálculo simple basado en las variables nodales, y en caso de las superficiales, aproximándolas por los balances a través de las caras de los VCs. Las aproximaciones de las variables en las caras y de los gradientes son realizadas en función de las variables nodales como muestra la ecuación 2.46:

$$V_{cell} \cdot \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f u_f \phi_f \cdot A_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi} \nabla \phi_f \cdot A_f + S_{\phi} \cdot V_{cell} \quad (2.46)$$

Los nodos, donde se guarda las variables a resolver, se ubican en los vértices de las mallas o en el centro de los volúmenes. Estas ecuaciones se resuelven simultáneamente para todas los VCs, y se obtienen las soluciones en cada nodo del dominio. Finalmente, el sistema de ecuaciones es resuelto a través de métodos acoplados o segregados, un aspecto fundamental de estos algoritmos de solución es el proceso de inversión de matrices.

2.5 CONFLUENCIAS FLUVIALES

Las confluencias fluviales presentan ambientes hidrodinámicos complejos que cumplen un papel importante en el control del transporte de sedimentos, el hábitat acuático y la morfodinámica a través de los sistemas fluviales (Riley et al., 2015). En la confluencia se producen cambios significativos, donde los caudales y los sedimentos de los afluentes se combinan y se ajustan a la morfología del lecho de río posterior a la confluencia.

Las confluencias fluviales comprenden un río principal en el que desembocan uno o más afluentes. Dentro de la red fluvial, se consideran puntos de conexión importantes que contribuyen al ecosistema fluvial porque proporcionan conectividad ecológica y heterogeneidad en el caudal, la calidad del agua y el sustrato de lecho (Leite et al., 2016).

Las confluencias podrían clasificarse con relación a su ancho y profundidad mediante la siguiente escala; como pequeña ($W/H < 10$), mediana ($10 < W/H < 50$) y grande ($W/H > 50$) esto de acuerdo con la investigación de Yuan et al. (2021).

2.5.1 Hidrodinámica de confluencias fluviales

Se ha observado que la distancia de mezcla en la confluencia de dos ríos puede tomar una distancia significativa aguas abajo para mezclarse por completo (Bouchez et al., 2010). Para el caso de grandes ríos, con anchos mayores a los 0.5 km, esta distancia puede ser del orden de magnitud de 10 hasta 100 veces el ancho del río (Laraque et al., 2009). Sin embargo, los ríos grandes pueden mezclarse mucho más rápido que los ríos pequeños.

En la confluencia de ríos, la dinámica del flujo y los sedimentos se caracterizan por patrones tridimensionales complejos. Gracias a estos patrones que la dinámica de flujo y la morfología del lecho interactúan para adaptarse a los cambios en el flujo y el transporte de sedimentos que ocurre en la confluencia (Gutierrez et al., 2014).

Las confluencias son sitios de intensa mezcla turbulenta en los sistemas fluviales. Se ha propuesto que la estructura turbulenta a gran escala responsable en gran medida de esta mezcla se divide en tres clases principales: vórtices orientados verticalmente (kelvin-Helmholtz), celdas helicoidales de flujo secundario y vórtices orientados en sentido de la corriente más pequeños y fuertemente coherentes (Duguay et al., 2022). Esta mezcla ocurre a lo largo de la interfaz de mezcla vertical (MI) dentro de la zona hidrodinámica de la confluencia (CHZ) (Rhoads & Kenworthy, 1995).

La zona hidrodinámica de la confluencia generalmente incluye una zona de estancamiento del flujo cerca de la esquina en la unión aguas arriba, un área de desviación de flujo ocasionada por el ingreso del afluente a la confluencia, una capa de corte o una interfaz de mezcla generada por los flujos convergentes, además de una zona de separación de mezcla aguas abajo, posteriormente una aceleración del flujo dentro del canal posterior a la confluencia y a continuación una recuperación de flujo aguas abajo de la zona de interfaz de mezcla (Best, 1987).

En la Figura N° 2.5 podemos observar la confluencia de los ríos Huallaga y Chinchao, además de su estructura de flujo enumerado, (1) representa la zona de estancamiento de flujo, (2) representa la zona de desviación de flujo, (3) representa una zona donde el flujo presenta una aceleración, (4) representa la zona de recuperación del flujo y (5) representa una zona de separación de flujo. Además, podemos notar la interfaz de mezcla dentro de la confluencia cerca de la línea discontinua de color azul.

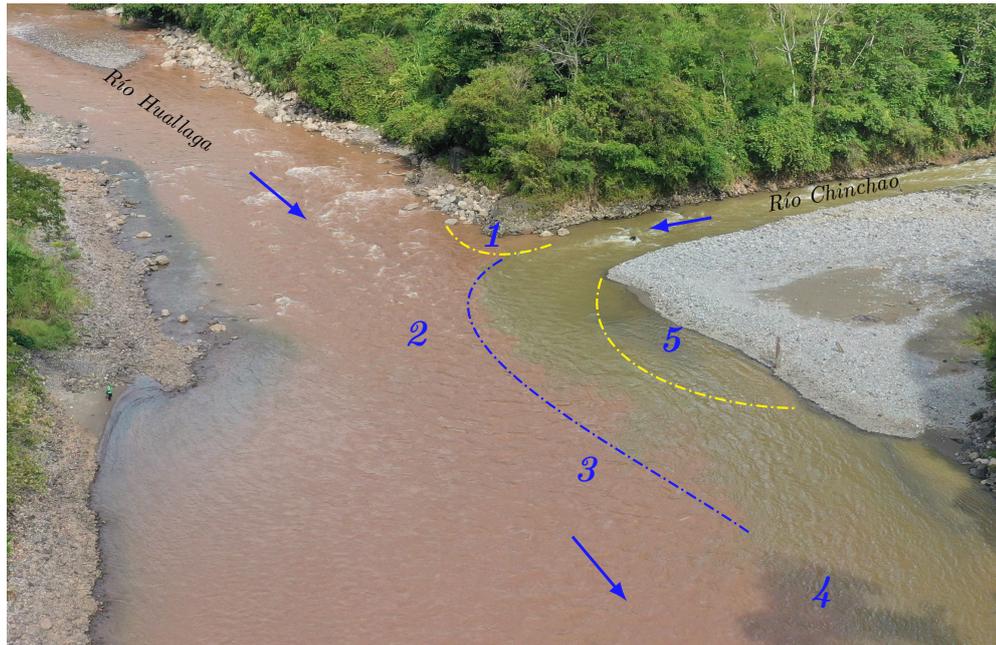


FIGURA N° 2.5: Estructura de flujo en la confluencia de los ríos Huallaga y Chinchao. Elaboración propia

2.5.2 Transporte de sedimentos en confluencias

Muchos estudios destacan el papel que cumple la turbulencia en el transporte de carga de fondo en la zona de la confluencia. Las estructuras turbulentas formadas en la zona de mezcla se consideran importantes para el posible arrastre y transporte de partículas de fondo (Biron et al., 1996). La investigación realizada por Boyer et al. (2006) en la confluencia de Bayonne-Berthier descubrieron que los valores máximos de transporte de carga de lecho se encuentran en el borde de la capa de corte (interfaz de mezcla), en lugar de la zona de máxima turbulencia.

Rara vez se ha podido cuantificar el transporte de carga suspendida y disuelta en confluencias fluviales. Este problema se ha abordado más a menudo desde la perspectiva del cambio de mezcla aguas abajo de la confluencia. Las investigaciones previas mencionan que las distancias de mezcla aguas abajo de la confluencias pueden ser del orden de 100 veces el ancho del río formado (Smith & Daish, 1991).

De acuerdo a Jirka (2004) se puede aplicar las siguientes reglas generales para las propiedades de mezcla en las confluencias de ríos: (1) la mezcla vertical completa es un proceso rápido que se da como máximo en la profundidad de la confluencia. (2) La mezcla lateral completa requiere de grandes distancias aguas abajo. Para la morfología típica de un río con una relación de $B/h = 10$ a 100 (donde B representa el ancho y h su profundidad del río), para su mezcla completa será necesario una

distancia aguas abajo de 100 a 1000 veces el ancho del río.

Actualmente, no tenemos una clara comprensión del comportamiento de la mezcla de grandes ríos. Los estudios realizados en campo forman una base para el estudio de grandes ríos. Lane et al. (2008) presentó una situación donde la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay (ancho de cauce de 2.8 km posterior a la confluencia), les toma más de 400 km para poder mezclarse aguas abajo. No se encontró evidencia de una circulación helicoidal que era un requisito necesario para una mezcla rápida en confluencias de grandes ríos.

Laraque et al. (2009) observaron el desarrollo de las aguas del río Solimões bajo las del río Negro, este fenómeno se le atribuye a la mayor velocidad, caudal y densidad del río Solimões. La presencia de mayor densidad en el río Solimões es debido a la mayor carga de sedimento suspendido y una temperatura ligeramente más fría debido a la diferencia de albedo en comparación al color oscuro del río Negro, esto podría explicar por qué este río se desliza bajo el río Negro. Las inestabilidades de Kelvin-Helmholtz en la interfaz de mezcla puede ser amplificada debido a la diferencia de densidad.

Lane et al. (2008) también investigaron un caso donde la confluencia de los ríos Paraná y Paraguay produjeron una mezcla en solo 8 km aguas abajo. Esto se debió a la combinación de la discordancia del lecho (diferencia de tirantes entre los afluentes) y la relación de momento angular tributario, que dio como resultado la formación de una circulación a escala de un canal que fue lo suficiente para transferir el agua más turbia del río Paraguay a través de todo el ancho del río aguas abajo de la confluencia.

2.5.3 Características morfológicas

La fosa de erosión (scour hole) es una característica morfológica común en las confluencias fluviales, como se puede apreciar en la Figura N° 2.6. Mosley (1976) inicio su investigación al discutir sus características y cambios morfológicos en las confluencias fluviales. Además, se encontró la posibilidad de que existen fosas de erosión en confluencias con θ (ángulo entre los dos afluentes) grandes, fuerte turbulencia y descargas iguales.

Wallis et al. (2008) realizaron una investigación en ocho confluencias y encontró la existencia de fosas de erosión solo en cinco de ellas. La discordancia de lecho es considerado como un factor importante en la ausencia o reducción del tamaño de las fosas de erosión (Biron et al., 1993). En la actualidad todavía no es muy claro como el comportamiento del flujo y la dinámica de los sedimentos pueden influir en las características de las fosas de erosión.

Existen muchas hipótesis para la formación de fosas de erosión, como son la gran

velocidad del flujo, la fuerte turbulencia, el efecto de la interfaz de mezcla (capa de corte) o la circulación helicoidal inducida por la curvatura (Rhoads et al., 2009). De acuerdo con Yuan et al. (2018) el flujo descendente y el flujo ascendente implicados en los movimientos helicoidales, asociados al intenso corte de lecho, son responsables del arrastre y socavación de sedimentos, generando así la fosa de erosión.

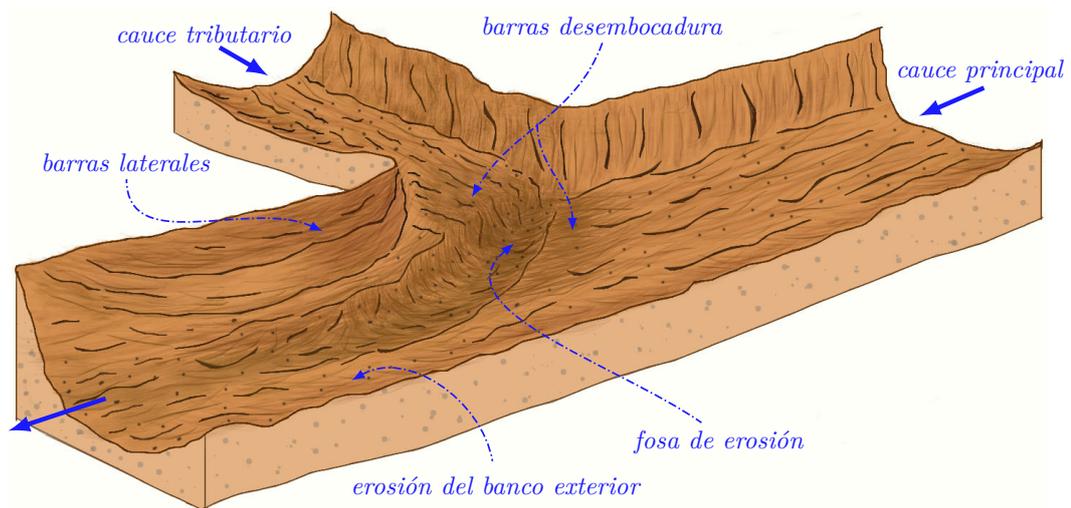


FIGURA N° 2.6: Morfología de lecho en confluencias asimétricas. Elaboración propia

La barra formada en medio del canal (mid-channel bars), surgió de las tasas de transporte de sedimentos de ambos lados de la fosa de erosión que luego se unían aguas abajo en una área de deposición. Esta formación ocurrió en tramos de confluencias simétricas con ángulos altos ($\theta > 60^\circ$) (Mosley, 1976). Se considera que la simetría de la confluencia es un factor importante para determinar si se formará la barra en el medio del canal debido a su influencia en la divergencia del flujo aguas abajo de la fosa de erosión (Parsons et al., 2008).

Las barras laterales (bank-attached bars) son características más comunes en las confluencias asimétricas (Figura N° 2.7) donde existe una separación de flujo en la esquina ubicada aguas abajo de la confluencia (Parsons et al., 2008), como se muestra en la Figura N° 2.6. Se conoce que la zona de separación de flujo es una área de menor presión y flujo recirculante, lo que favorece a la deposición de sedimentos (Leite et al., 2012). Ocurre lo mismo para las velocidades más bajas en la zona de estancamiento de flujo en la esquina aguas arriba de muchas confluencias. Sin embargo, aún no está claro con que frecuencia las barras laterales están presentes en confluencias asimétricas y como pueden evolucionar de acuerdo a las condiciones de flujo.



FIGURA N° 2.7: Confluencia asimétrica de los ríos Acre y Espalha en Brasil. Elaboración propia

2.5.4 Factores que afectan la morfodinámica

Las confluencias fluviales presentan formas simétricas como se muestra la Figura N° 2.8 y asimétricas como se muestra en la Figura N° 2.7, la principal diferencia es el ángulo θ que formaban sus afluentes. Una confluencia es descrita como simétrica si tiene una forma de “Y” (Best, 1986). En caso contrario se considera asimétrica donde favorece el desarrollo de una celda de circulación helicoidal más fuerte en su afluente, en lugar de producirse en la confluencia. Las formas de la confluencia simétricas o asimétricas generan un efecto significativo en las características hidrodinámicas y morfodinámicas (Riley et al., 2015).

Se piensa que la estructura de celdas helicoidales contra rotativas es menos representativa en el campo del flujo a medida que aumenta la asimétrica en la confluencia (Bradbrook et al., 2000). La forma de la confluencia con respecto a su ángulo θ , es un factor importante en la fuerza del flujo secundario. Mosley (1976) observó que



FIGURA N° 2.8: Confluencia simétrica de los ríos Purus y Acre en Brasil. Elaboración propia

un θ grande en la confluencia genera un aumento en la turbulencia debido a una mezcla más intensa ocasionado por los flujos desviados de cada afluente.

En confluencias fluviales es común que el patrón de flujo de uno de los afluentes esté dominado por el otro debido a la diferencia de caudal, velocidad y cantidad de movimiento. Estas relaciones dan lugar a características morfodinámicas no idénticas. Entonces el comportamiento está definido por la relación de velocidad V_r (Constantinescu et al., 2012), la relación de descarga Q_r y la relación de cantidad de movimiento M_r (Guillén-Ludeña et al., 2016), expresadas como:

$$V_r = \frac{V_t}{V_p} \quad (2.47)$$

$$Q_r = \frac{Q_t}{Q_p} \quad (2.48)$$

$$M_r = \frac{\rho_t Q_t V_t}{\rho_p Q_p V_p} \quad (2.49)$$

Donde el subíndice “*t*” y “*p*” indican cauce tributario y principal respectivamente, ρ (kg/m^3) es la densidad de cada afluente. Cuando V_r es mucho mayor o mucho menos que 1, esto afecta más al campo de flujo en comparación con el ángulo θ de la confluencia, especialmente cuando $\theta > 30^\circ$ (Bradbrook et al., 2001). En consecuencia, la medida en que puede afectar el V_r al campo de flujo depende de la forma que tenga la confluencia.

El Q_r de los afluentes tiene un papel importante en la determinación de la ubicación y la intensidad de las circulaciones secundarias (Bradbrook et al., 1998), además influye en la posición de la interfaz de mezcla (Rhoads & Kenworthy, 1995) y su zona asociada con mayor turbulencia y esfuerzo cortante (Constantinescu et al., 2012). La fosa de erosión está influenciada por la variación del Q_r . Cuando domina la descarga de un afluente, se espera que la fosa de erosión migre para poder alinearse con el afluente dominante (Ashmore & Parker, 1983). El Q_r es importante no solo para dar forma a la hidrodinámica del flujo (Schindfessel et al., 2015), sino que también influye en la entrega de sedimentos y en su morfología (Tang et al., 2018).

El M_r también es considerado importante sobre la hidrodinámica de la confluencia. Su efecto debe tenerse en cuenta a la hora de evaluar la formación, duración e intensidad de las celdas helicoidales (Constantinescu et al., 2011). Este efecto es analizado en la investigación de (Rhoads & Kenworthy, 1995) para la confluencia de Kaskaskia River y Copper Slough, donde la circulación secundaria dentro de la confluencia aguas abajo es caracterizada por una sola celda helicoidal grande cuando $M_r > 1$ en el lado tributario (muy parecido a una curva de meandro). Cuando $M_r < 1$ se forman celdas helicoidales débiles convergentes en la superficie en los lados opuestos de la interfaz de mezcla.

En cauces fluviales toma importancia el Número de Froude (F_R), que representa un número adimensional que relaciona los efectos de las fuerzas de inercia y las fuerzas de gravedad que actúan sobre un fluido y que está expresada por la siguiente ecuación:

$$F_R = \frac{U}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (2.50)$$

Donde U representa la velocidad media, g es la gravedad y D representa la profundidad media hidráulica. En caso de las confluencias fluviales con una diferencia de densidad en cada afluente, se introduce el concepto del Número Densimétrico de Froude (F_{Rd}) (Cheng & Constantinescu, 2020), se encuentra expresada por la

siguiente ecuación:

$$F_{Rd} = \frac{U}{\sqrt{g' \cdot D}} \quad (2.51)$$

Donde $(g' = \frac{\Delta\rho}{\rho_0} \cdot g)$ representa la gravedad reducida, g es la gravedad, $\Delta\rho$ representa la diferencia de densidad de los afluentes y ρ_0 representa la densidad promedio de los dos afluentes. F_{Rd} caracteriza la interacción de las fuerzas de flotabilidad y las fuerzas de inercia, cuando $F_{Rd} > 1$ dominan las fuerzas de inercia, cuando $F_{Rd} < 1$ domina las fuerzas de flotación y cuando $F_{Rd} = 1$ las dos fuerzas son iguales (Ramón et al., 2013).

Cuando dos afluentes tiene una misma elevación de lecho se denomina confluencia concordante, caso contrario se le denomina confluencia discordante. La discordancia de lecho en una confluencia de canal fue estudiada por primera vez por (Best & Roy, 1991) donde observaron que el flujo se separa sobre el escalón, interrumpiendo la interfaz de mezcla y provocando una mezcla mucho más rápida en el afluente poco profundo.

2.6 FLUJO SECUNDARIO EN RÍOS

En las investigaciones de (Einstein & Shen, 1964) se demostró que se puede producir un thalweg meandriforme en el lecho de un canal recto de laboratorio por la acción de celdas helicoidales convergentes en la superficie que forman el flujo secundario, inducidos puramente por la turbulencia en la pared. Keller (1972) sugirió que el patrón regular de socavación y deposición requerido para la formación de meandros puede ser proporcionado por una alternancia de patrones de flujos convergentes y divergentes a lo largo de un canal. Tales condiciones pueden ser inducidas, incluso en canales rectos.

2.6.1 Flujo secundario en meandros

Las partículas de los fluidos presentan trayectorias helicoidales inducidas por la morfología del lecho, en lugar de moverse en forma aproximadamente paralela al eje del canal (Kalkwijk & De Vriend, 1980). La dinámica del flujo generado en los meandros está controlada en gran medida por las fuerzas centrífugas y los gradientes de presión inducidas por la curvatura que producen variaciones transversales en la topografía de lecho, las cuales, a su vez, tienen un efecto de retroalimentación en el movimiento del fluido a través del meandro.

Las corrientes secundarias se definen como “corrientes que ocurren en un plano normal al eje del flujo primario” (Bathurst et al., 1977). La fuerza del gradiente de presión originado por la superficie del agua sobreelevada en el banco exterior

redirige el flujo hacia el banco interior cerca del lecho, donde los efectos centrífugos y la velocidad son más bajos, como se muestra en la Figura N° 2.9. El desequilibrio local entre las fuerzas centrífugas y la gradiente de presión sobre la profundidad, se produce debido a la variación vertical de la velocidad del flujo primario que provoca el flujo secundario, lo que resulta en un movimiento hacia afuera del flujo cerca de la superficie y un flujo hacia adentro dirigido cerca del lecho (Thorne et al., 1985).

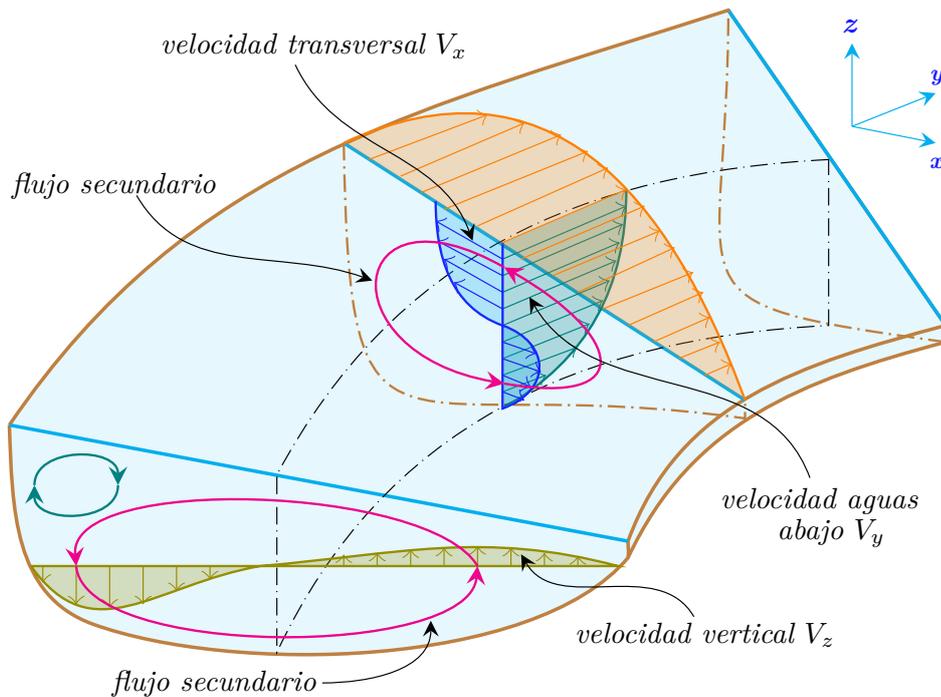


FIGURA N° 2.9: Flujo secundario en meandros. Elaboración propia basado en (Song et al., 2012).

El flujo secundario se presenta en la estructura de flujo tridimensional caracterizado por un movimiento helicoidal, donde se mueve en un camino hacia la pared exterior cerca de la superficie del agua y hacia la pared interior cerca del lecho. Además, una pequeña celda helicoidal contrarrotante puede desarrollarse a lo largo de la orilla exterior de la curva, posiblemente debido a la aspereza del límite o el estancamiento del flujo (Bathurst et al., 1979).

La aceleración del flujo inducida por la curvatura del meandro dirige el agua superficial hacia el banco exterior, originando una zona de velocidad más baja a lo largo de la orilla del banco interior. El esfuerzo cortante sobre el lecho disminuye en esta zona de flujo poco profundo y de baja velocidad, donde se genera la convergencia del flujo de sedimentos e impulsa su deposición (Nelson & Smith, 1989). Por el contrario, la ubicación de la máxima velocidad cerca al banco exterior y la sobreelevación de la superficie del agua a lo largo de la orilla, aumentan el esfuerzo cortante límite, provocado la divergencia del flujo de sedimentos y promoviendo la

socavación del lecho y la erosión del banco exterior (Nelson & Smith, 1989).

2.6.2 Flujo secundario en confluencias

El flujo secundario en las confluencias de ríos puede tener importantes implicaciones para la morfología del río, la dinámica del sedimento y la ecología acuática. Los patrones de flujo secundario pueden influir en la erosión y sedimentación en la zona de la confluencia, y pueden crear hábitats acuáticos diversos (Guillén-Ludeña et al., 2016). Además, el flujo secundario también puede afectar la calidad del agua y la distribución de nutrientes y contaminantes en la zona de la confluencia (Rhoads et al., 2009).

El flujo en confluencias de canal se caracteriza no solo por una aceleración general del flujo, sino también, en muchos casos, por dos celdas de flujo helicoidal en sentido de la corriente que giran en sentido contrario (Mosley, 1976) que son convergentes en la superficie (cerca de la interfaz de mezcla), y descienden sobre el centro del canal (región de socavación), divergen en el lecho y ascienden en los márgenes del canal como se muestra en la Figura N° 2.10. Estas celdas de flujo han sido identificadas en un número de casos estudiados en campo, especialmente cuando la confluencia es concordante (Ashmore et al., 1992), y normalmente se ha comprobado que ocupan casi todo el ancho del cauce de la confluencia.

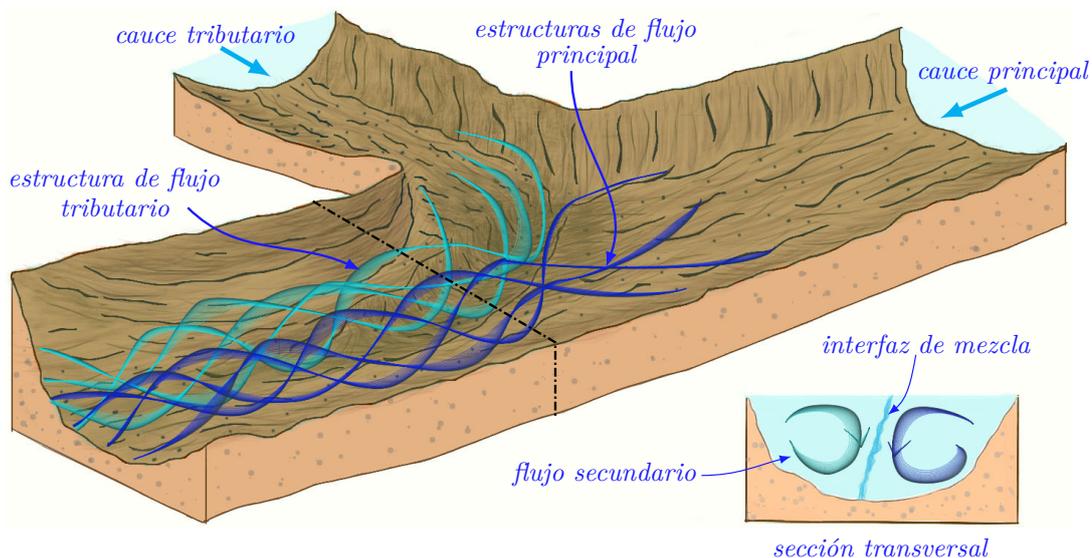


FIGURA N° 2.10: Flujo secundario en confluencias. Elaboración propia

Investigaciones previas de flujo secundario en grandes ríos indicaron que pueden ocupar gran parte del ancho del cauce (Riley et al., 2015). Aunque existen casos que han cuestionado su existencia en grandes ríos como el caso de Parsons et al. (2007) que presentaron los resultados de la confluencia y difluencia en el río

Paraná. Los autores no encontraron evidencia de la clásica circulación helicoidal contrarrotantes. En el caso estudiado por Szupiany et al. (2009) se investigó dos confluencias de barras trenzadas aguas abajo del río Paraná (Argentina), donde se identificaron celdas de flujo helicoidales que giran en sentido contrario y convergen en la superficie. La extensión espacial de estas celdas secundarias solo se limitó a una pequeña porción del ancho total del cauce (menor al 25%).

Rhoads et al. (2009) señalaron que el flujo helicoidal, la turbulencia de la interfaz de mezcla y la aceleración del flujo ayudan a mantener la forma de las fosas de erosión asegurando que sea una zona de alta tensión de corte en el lecho. Constantinescu et al. (2011) argumentaron que el flujo secundario en forma de celdas helicoidales son las más importantes para mantener la socavación, aunque admitieron que esto podría cambiar si la zona de mezcla produce la inestabilidad de Kelvin Helmholtz.

CAPÍTULO III: ÁREA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio de la presente investigación se encuentra en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, ubicada al norte de Sudamérica, en Perú, en el departamento de Loreto, provincia de Loreto, distrito de Nauta, dentro de las coordenadas geográficas 4°26'43" latitud Sur y 73°27'6" latitud Oeste (Figura N° 3.1). Limita por el norte con la comunidad Hipólito Unanue, por el sur con la Reserva Nacional Pacaya Samiria, por el este con el pueblo Mariscal Ramón Castilla y al oeste con el poblado Payorote.



FIGURA N° 3.1: Ubicación de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Elaboración propia

Esta confluencia da origen al río más grande del mundo, el río Amazonas, el cual drena aproximadamente 7 millones de km^2 (Nittrouer & DeMaster, 1986) y que desemboca en el Océano Atlántico. El río Amazonas representa aproximadamente el 20% de la descarga fluvial global al océano, con una descarga de $120 \times 10^3 m^3 \cdot s^{-1}$ en diciembre y $300 \times 10^3 m^3 \cdot s^{-1}$ en mayo (Ward et al., 2015).

3.1.1 Río Marañón

EL río Marañón es un río anabranching (multicanal) (Abad et al., 2013), el cual drena 350 000 km^2 , de los cuales 189 000 km^2 son zonas montañosas de las

partes norte y central de la Cordillera de los Andes Peruanos (Villar et al., 2012). Su época de creciente ocurre entre los meses de noviembre a mayo, siendo la máxima creciente de marzo a mayo, la época vaciante se presenta en los meses de junio a octubre, llegando al mínimo en de agosto a octubre (Paredes Riveros, 2016). Presentando una variación de nivel de 8.5 metros, según el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía (SEHINAV), de la Dirección de Hidrografía y Navegación (DIHIDRONAV) de la Marina de Guerra del Perú.

3.1.2 Río Ucayali

El río Ucayali es un río meandrónico es uno de los ríos más dinámicos del mundo (Abad et al., 2022), el cual drena una área de 360 000 km^2 (Guyot et al., 2007), de los cuales 198 000 km^2 son zonas montañosas de los Andes de la parte sur del país (Villar et al., 2012). Transporta una de las cargas de sedimentos en suspensión más altas que cualquier otro afluente del río Amazonas (Puhakka et al., 1992). Su creciente es de noviembre a abril, alcanzando el pico máximo entre febrero a abril. La vaciante suele ocurrir desde mayo a octubre, alcanzando su mínimo entre julio y setiembre (Paredes Riveros, 2016). La variación del nivel de sus aguas entre creciente y vaciantes es de 11.2 metros, según el SEHINAV.

3.1.3 Río Amazonas

La cuenca Amazónica drena el 76 % del territorio peruano (977 900 km^2) y representa el 98 % de todos los recursos hídricos peruanos (Villar et al., 2012). El río Amazonas es un río anabranching y presenta un curso predominante hacia el este, con amplios meandros y numerosas islas, el ancho del cauce varía entre los 1000 a 4000 metros en el territorio peruano. Su profundidad en el territorio peruano varía entre los 10 a 30 metros. Su creciente ocurre entre los meses de noviembre y mayo, alcanzando su punto máximo entre los meses de marzo, abril y mayo. Su vaciante se presenta desde junio hasta octubre, con su punto mínimo entre agosto, setiembre y octubre (Paredes Riveros, 2016). La variación máxima del nivel del agua entre creciente y vaciante es de 13.6 m de acuerdo con el SEHINAV.

3.2 MEDICIONES DE CAMPO

Se realizaron dos mediciones de campo en diferentes temporadas, la primera medición fue en octubre del año 2017 para la temporada de vaciante. La segunda medición fue en febrero del año 2019 para la temporada de creciente. Estas mediciones estuvieron a cargo del equipo de medición de campo del Centro de Investigación y Tecnología del Agua (CITA) de la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC) y financiada por La Fundación Gordon y Betty Moore.

La Figura N° 3.2 muestra la metodología seguida en la medición de campo realizado. Con el objetivo de caracterizar la hidrodinámica de los ríos Marañón y Ucayali, además de la zona de la confluencia que forman estos ríos, donde los principales parámetros de análisis son el caudal y el comportamiento del patrón de las velocidades.

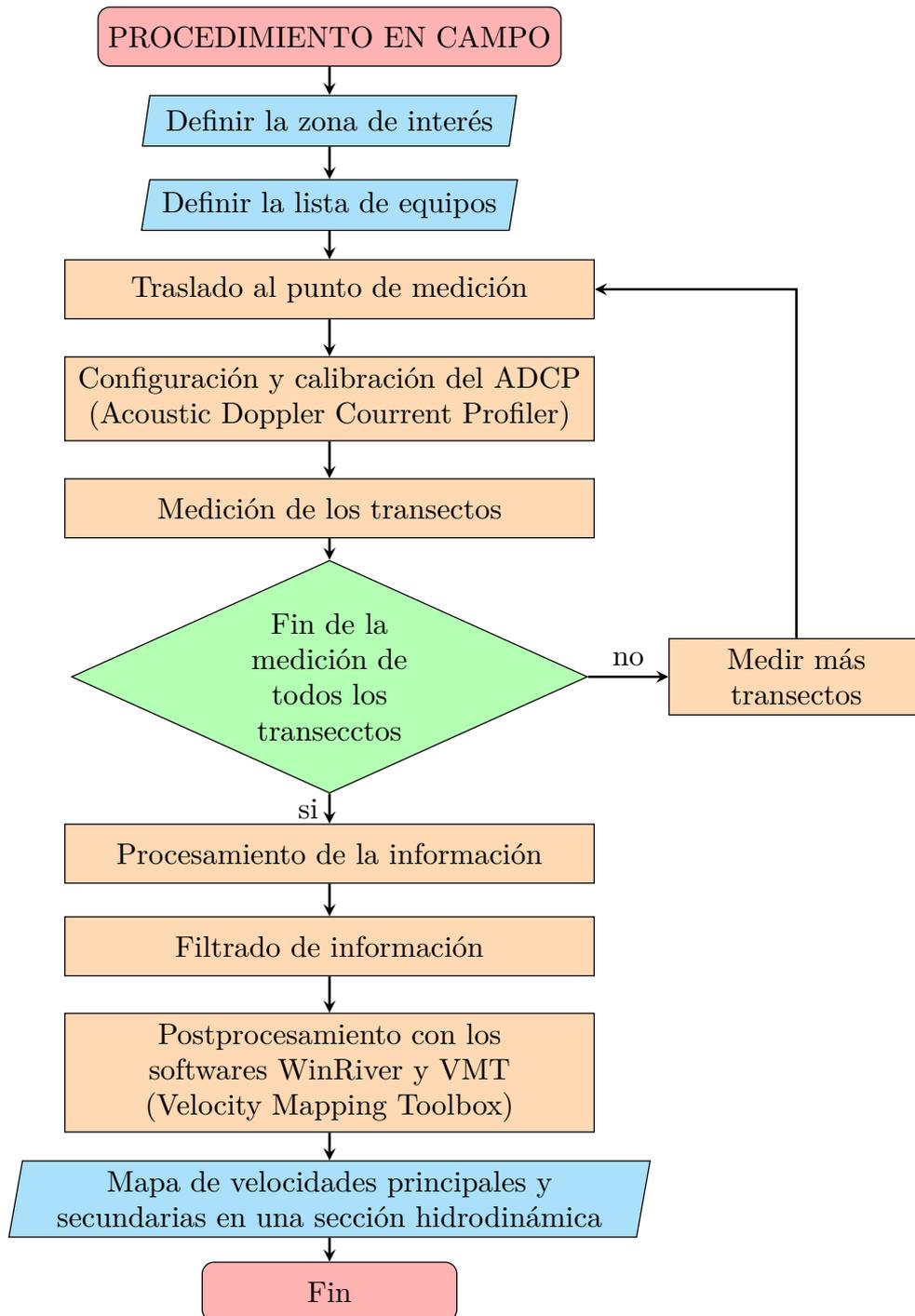


FIGURA N° 3.2: Metodología de medición. Elaboración propia

3.2.1 Zona de medición

La elección de la ubicación y el número de secciones a medir se realizó sobre la base de la obtención de información necesaria para caracterizar la hidrodinámica de los ríos Marañón y Ucayali aguas arriba de su confluencia y aguas abajo de su confluencia. La información obtenida en cada sección de estudio sirvió para determinar la cantidad de caudal que pasa por cada sección transversal del río. Además de obtener los patrones principales y secundarios de flujo, y conocer los parámetros geométricos de las secciones transversales (ancho y profundidad).

Una vez definidas las secciones de medición se realizó la codificación del nombre de cada sección, donde el nombre de cada sección incluye información del río y su numeración indica que tan cerca o lejos de la confluencia se encuentra esta sección. La codificación del nombre de la sección fue de la siguiente manera:

- Para el río Marañón como M01, M02, M03...,etc.
- Para el río Ucayali como U01, U02, U03.., etc.
- Para el río Amazonas como A01, A02,A03.., etc.

Donde la numeración indica la proximidad de la sección a la zona de la confluencia. Por ejemplo, la sección M01 está más cerca de la confluencia que la sección M02, porque su numeración continua aguas arriba de la confluencia en el caso de los ríos Ucayali y Marañón, mientras que la numeración del Amazonas continua aguas abajo de la confluencia. A continuación mostramos las secciones definidas para las dos temporadas de mediciones realizadas.

3.2.1.1 Caso I

En el caso I se presenta la medición realizada en la temporada de vaciante y que se desarrolló entre el 17 al 19 de octubre del año 2017. Se propuso un total de 14 secciones transversales para los afluentes, la confluencia y aguas abajo de la confluencia, como se muestra en la Figura N° 3.3. Se elaboró un mapa de la ubicación de las secciones transversales mediante el programa QGIS y se utilizaron imágenes satelitales cercanas a la fecha de medición. Las coordenadas de estas secciones fueron exportadas a un dispositivo de GPS de navegación, el cual permitió llegar a la ubicación de la sección de medición y realizar el trabajo de campo.

3.2.1.2 Caso II

En el caso II se presenta la medición realizada en la temporada de creciente, y que se llevó a cabo entre el 14 al 18 de enero del año 2019. Se propuso un total de

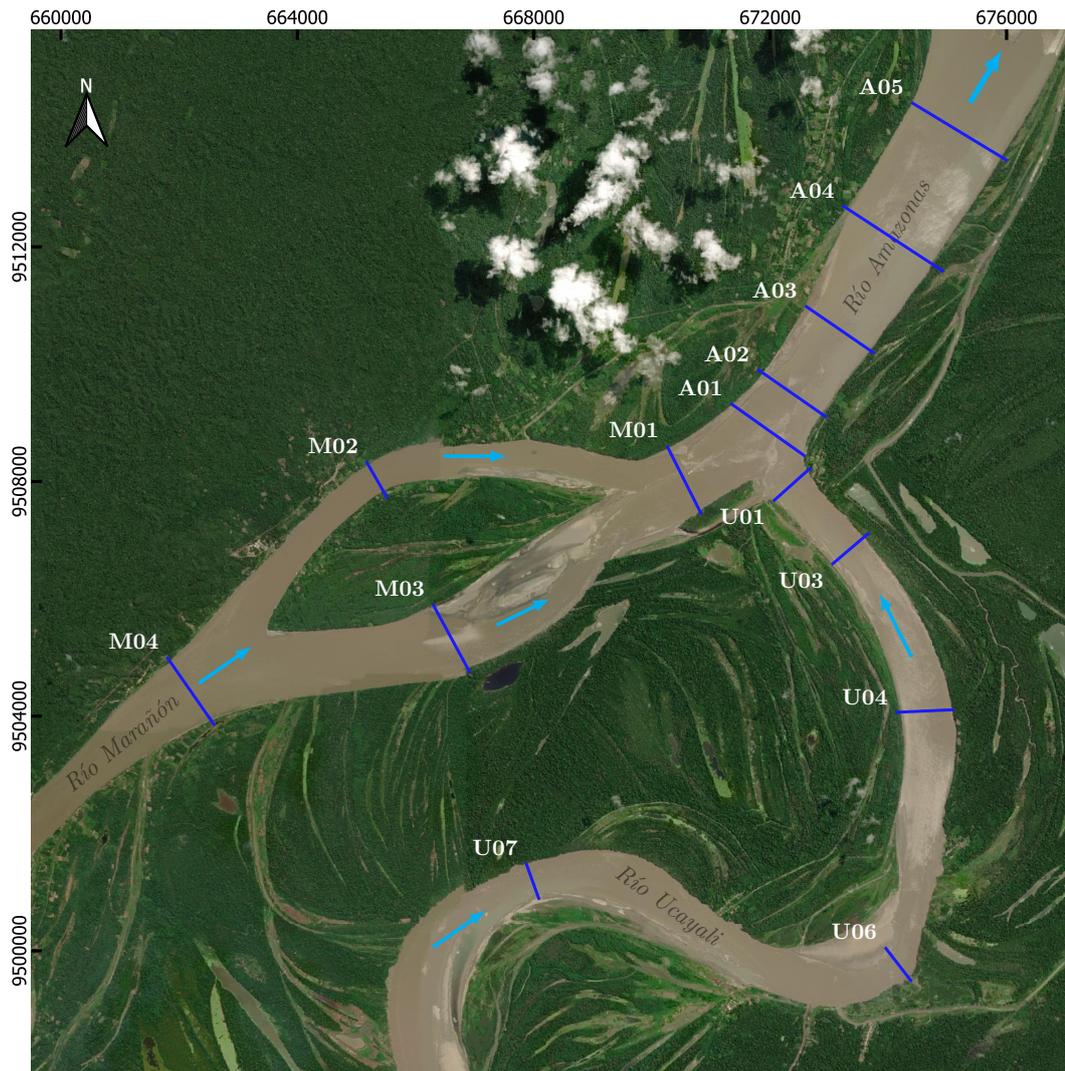


FIGURA N° 3.3: Secciones de medición para el caso I. Elaboración propia

16 secciones transversales para los afluentes, la confluencia y aguas abajo de la confluencia, como se muestra en la Figura N° 3.4.

3.2.2 Equipos y Materiales

Para realizar las mediciones en campo, se empleó el equipo RiverReay600, que es un tipo de Perfilador de Corriente Acustico Doppler (ADCP), el cual es un instrumento hidroacústico que se utiliza para medir velocidad y corriente del agua en un rango determinado de profundidad, desde un montaje temporal o permanente en un bote.

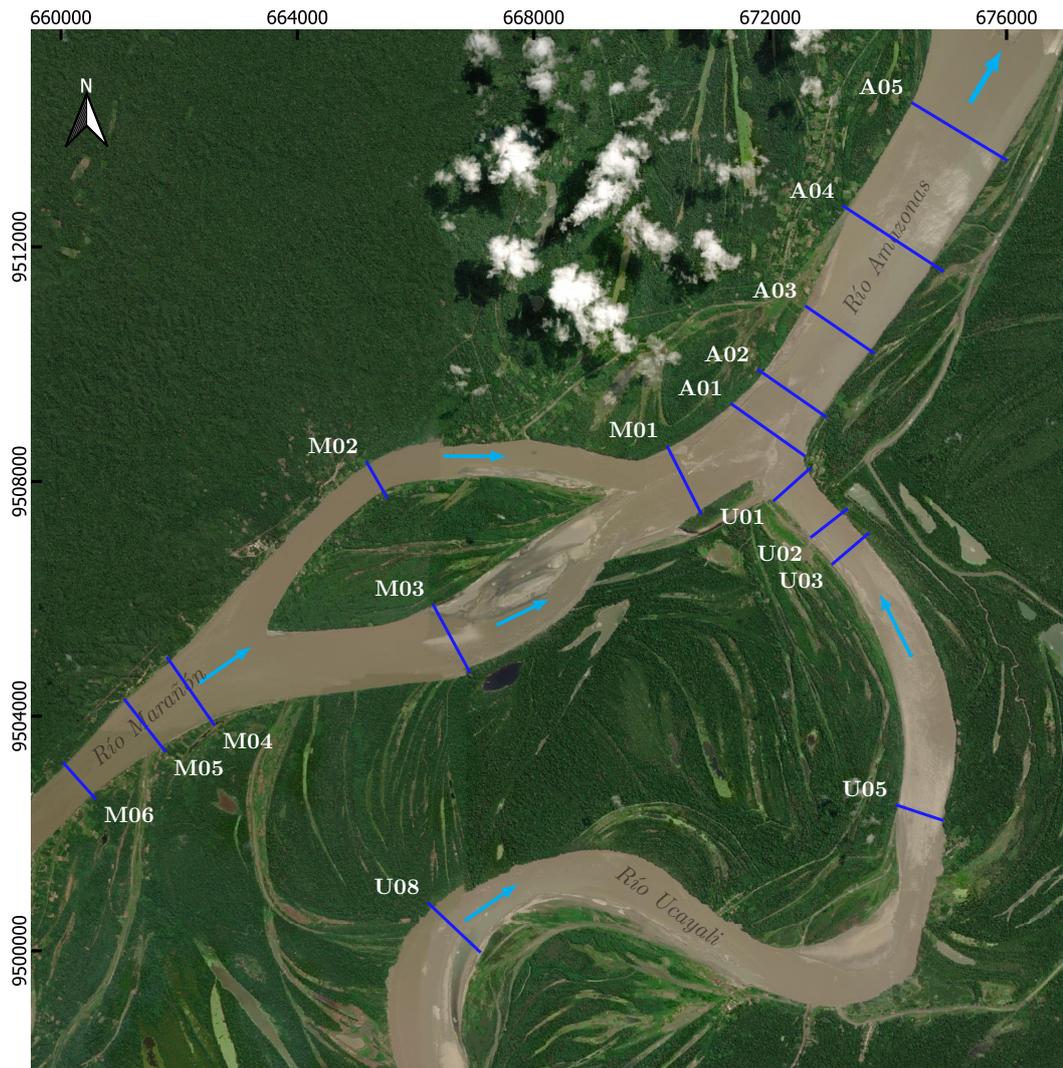


FIGURA N° 3.4: Secciones de medición para el caso II. Elaboración propia

3.2.2.1 Elementos del ADCP

Para la medición de transectos con velocidades moderadas de 1 a 2.5 m/s de flujo y con fondos móviles del orden de 10 a 30 m/día es necesario que las mediciones tenga una precisión submétrica, por esta razón, es necesario usar un GPS externo asociado al ADCP RiverRay600 (CITA, 2022). Las partes del ADCP son las siguientes:

- **Trimarán:** representa el flotador principal y los dos laterales del ADCP. Como se muestra en la Figura N° 3.5, además, contiene el interruptor de encendido, el plato de cubierta (protege la batería interna 12V del agua), la barra de cruce y las dos aletas.

- **ADCP y componentes:** la Figura N° 3.5 muestra los componentes más importantes como: cables de entrada y salida que conecta el ADCP a la computadora y a la fuente de alimentación o batería externa. Además, se presenta el montaje del GPS, transductor RiverRay600 (ADCP) y el disco de montaje.
- **GPS:** se utilizó el GPS diferencial Hemisphere Atlas Link que es una herramienta que recibe correcciones del servicio de corrección global Atlas GNSS. Junto al RiverRay600, ayudaron a mejorar la precisión de las mediciones realizadas. Como muestra la Figura N° 3.5 este GPS es montado sobre la parte superior del disco de montaje, para luego ser enroscado, además se puede observar el cable de poder del GPS.

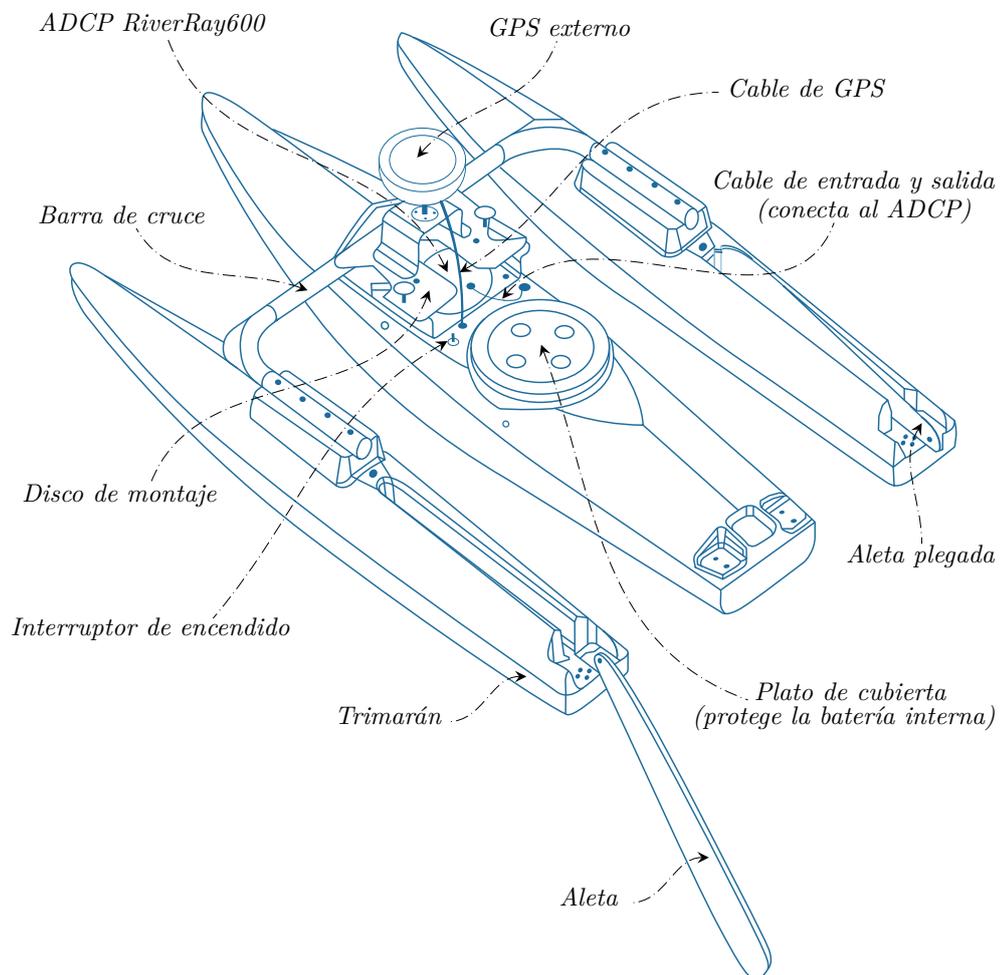


FIGURA N° 3.5: Componentes del ADCP RiverRay600. Elaboración propia basado en el manual RiverRay ADCP

3.2.2.2 Softwares

Los software utilizados en el proceso de la planificación, medición y procesamiento de información tomada en campo fueron los siguientes:

- **Planificación:** en la etapa de planificación se usó el software libre “QGIS” en la versión 3.20. Fue usado para graficar las secciones de medición en campo. Posteriormente, estas secciones fueron exportadas y almacenadas en “Google Earth”, “MyMaps” para realizar las mediciones en campo.
- **Medición:** En la etapa de campo se usaron los softwares “WinRiver II”, “BBTalk” y “ParaniWin” que funcionan en conjunto con el ADCP RiverRay600. Son necesarios para el adecuado funcionamiento del equipo y la correcta lectura de los datos medidos.
- **Procesamiento:** para el procesamiento, visualización y verificación de los datos medidos en campo se utilizó el software Velocity Mapping Toolbox (VMT).

3.2.2.3 Equipos y materiales adicionales

Para el proceso de medición se utilizó una embarcación de aluminio, con baranda en la proa, y timón delantero con un motor de 60 HP de potencia. Es necesario un listón de madera, colocada en la parte delantera del bote, de tal manera que sobresalga al costado del bote una longitud de 1 a 2 metros. Este cumplirá la función de brazo para el soporte del ADCP al momento de la medición. Es necesario una cuerda de 1.5 m que une la línea de seguridad del ADCP al listón de madera.

Se requiere algunos equipos complementarios necesarios como una laptop, la cual servirá para configurar, medir y procesar los resultados medidos. Además, son necesarios un termómetro, telémetro láser, GPS navegador, multímetro, batería y cargador de 12 voltios, inversor de 12v a 220v, USB bluetooth y un mosquetón el cual va sujeto a la línea de seguridad del ADCP.

3.2.3 Instalación y configuración del equipo

3.2.3.1 Instalación del soporte de medición

Se montó el transductor ADCP y el GPS Atlas Link en el trimarán conectando los respectivos cables de cada equipo. El listón de madera debe estar asegurado en la parte de la proa de la embarcación, de tal manera que pueda sobresalir una distancia de 1 a 2 metros de la parte lateral de la embarcación. Esto servirá de brazo de soporte para el ADCP, el cual estará sujeto mediante una cuerda desde la parte del listón de madera hacia el mosquetón de la línea de seguridad del ADCP como muestra la Figura N° 3.6.



FIGURA N° 3.6: Soporte del ADCP. Elaboración propia

3.2.3.2 Configuración del equipo

Una vez montado el transductor ADCP y el GPS sobre el trimarán junto con el soporte de madera, el trimarán debe ser colocado sobre el agua, desplegando sus aletas. Debe conectar a la laptop el Bluetooth USB (dispositivo de conexión inalámbrica entre la laptop y el ADCP tipo Parani-SD1000U), seguidamente encender el ADCP mediante el interruptor de encendido sobre el trimarán. Mediante el Parani-SD1000U Bluetooth USB vincular el ADCP con el programa ParaniWin, además revisar la conexión del ADCP y el GPS Atlas Link mediante el programa BBTalk.

Mediante el software Winriver II se debe crear un nuevo archivo de medición, teniendo en cuenta los datos del nombre de la sección, variación magnética de la zona (puede ser obtenida mediante la aplicación "CrowdMag" en función a la ubicación geográfica), velocidad del bote y el río. Asimismo, se debe configurar el reloj del ADCP, verificar el estado de la batería y las conexiones.

3.2.3.3 Verificación del ADCP

El ADCP deberá estar colocado sobre el agua, de preferencia en un margen de aguas tranquilas. Mediante el software Winriver II se podrá ejecutar un test de prueba del ADCP, donde se mostrara todos los parámetros medidos en la pantalla del laptop, cuando la impresión de información supera la cantidad 6 resultados puede parar la ventana del test de prueba. En este test se deberá verificar el funcionamiento del GPS interno, el estado de la batería, el correcto funcionamiento de los sensores. Además, el valor de la temperatura deberá ser verificada con la lectura de un termómetro digital externo.

3.2.3.4 Calibración del ADCP

Para calibrar la brújula del ADCP se deberá escoger una zona tranquila del cauce donde las velocidades sean bajas. La calibración del compás se realiza mediante el software Winriver II, consiste en la rotación del ADCP en sentido horario o anti-horario de manera lenta y pausada, debiendo mantener la embarcación estable y solo girando el trimarán (Figura N° 3.7) o de otro modo, girando el bote y el trimarán al mismo tiempo. Se debe rotar al menos dos veces, el grado final de calibración deberá ser menor que 1° de preferencia menor a 0.5° , en caso contrario repetir el proceso.



FIGURA N° 3.7: Calibración del ADCP. Elaboración propia

3.2.4 Proceso de medición

Con el GPS navegador el trimarán deberá ubicarse en uno de los márgenes (derecha o izquierda) de la primera línea de sección que va a ser medido. A su vez, posicionar la embarcación a 1 m de profundidad para evitar encallar la embarcación. Una vez ubicados dentro del programa Winriver II presionar “F4”, “Star Pinging” (inicia la conexión al ADCP).

En este mismo punto se registrará la temperatura con el termómetro que es el margen de inicio. El paso siguiente es presionar “F5”, “Start Transect”, que es el comando para iniciar la primera medición. Aparecerá una ventada emergente del Start Transect que solicitará la introducción de información adicional, como la distancia de separación entre los márgenes (medido con el telémetro) y la especificación del margen de inicio (si es izquierdo o derecho). Estos pasos son simultáneos para

iniciar la medición de un transecto (una medición realizada en una sección).

A la llegada del margen opuesto, deberá registrarse nuevamente la temperatura de agua y seguidamente presionar el “F4” que finalizará con la medición del primer transecto. De esta manera volverá aparecer la ventana del Start Transect y se ingresará la información requerida una vez más, dando el inicio de la medición del segundo transecto. Este proceso se volverá a repetir hasta tener la medición de 4 transectos para una sola sección de estudio, con el fin de obtener un valor de caudal representativo.

En el caso de estudios de flujo secundario en ríos grandes se debería tomar 5 transectos que dan resultados razonables (Szupiany et al., 2007). Pero como los transectos deben ser medidos en cantidades pares, se tomaron como mínimo 6 transectos en la zona de estudio de flujo secundario. Para estas mediciones la velocidad de la embarcación fue de 2 m/s que fue un valor cercano a la velocidad de la corriente. Durante este proceso se deberá registrar la trayectoria de cada transecto en el GPS navegador, con la finalidad de que los siguientes transectos sigan la misma ruta lo más cercano y recto posible. Esto ayuda a tener un mejor resultado de la información medida.

En cada transecto se verificaron las medidas de los caudales obtenidos para una misma sección de estudio. Los resultados de los caudales en cada transecto debería tener una desviación estándar máxima del 5%, en caso contrario se realizaron la medición de 4 transectos más. Durante el proceso de medición fue necesario realizar un monitoreo constante del ADCP, por ejemplo, evitando que se genere pérdida de conexión, por cabeceo, balanceo o que la velocidad de la embarcación sea mayor a la velocidad de la corriente.

3.2.5 Procesamiento de la información

La medición realizada por el ADCP en cada sección generó una carpeta de datos, la cual consta de un archivo patrón de extensión “.mmt”, y otros archivos de extensión “.PDO” que pertenecen a los transectos medidos en dicha sección. El archivo patrón de extensión “.mmt” sirve para cargar la información al Winriver II de todos los transectos medidos en una sección. Mientras que los archivos de extensión “.PDO” contienen todos los datos de cada uno de los transectos medidos mediante el ADCP.

Una vez cargada la información de los transectos de una sección en el Winriver II, se mostrarán las diferentes ventanas de resultados de dicha sección medida. Las ventanas que se muestran en la Figura N° 3.8 se describen a continuación :

- **MeasurementCtrl:** se presentan los transectos medidos para poder ser ha-

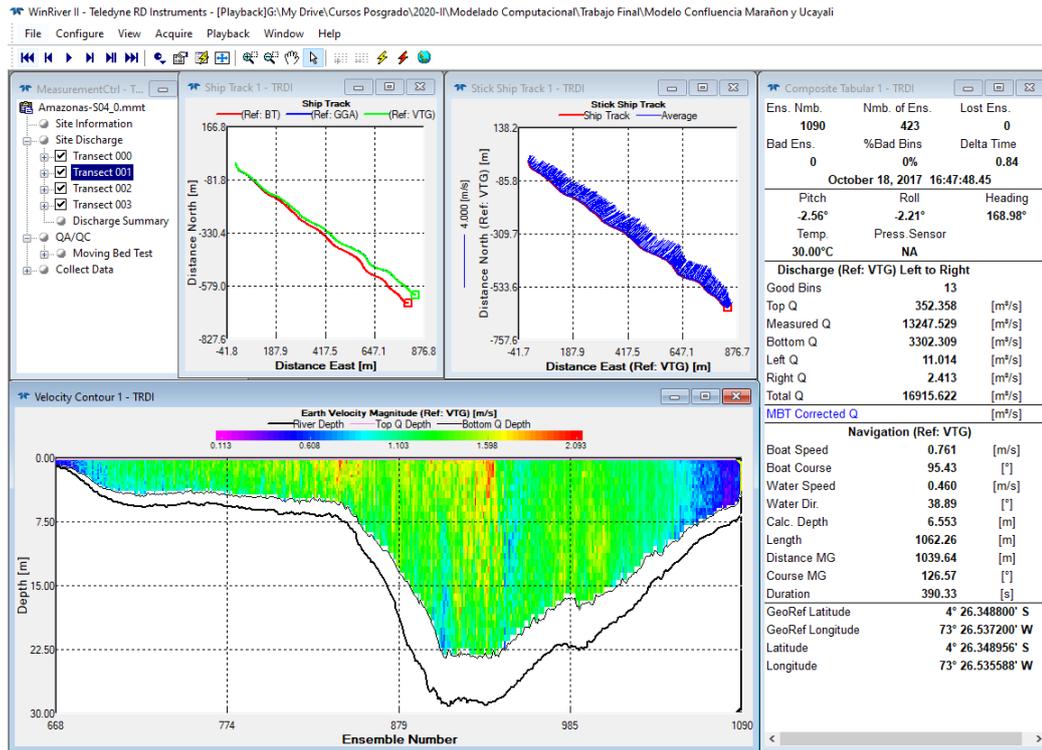


FIGURA N° 3.8: Visualización de mediciones en el Winriver II. Elaboración propia

bilitados o deshabilitados para su procesamiento.

- **Ship Track:** indica la posición relativa de la embarcación y representa la correcta calibración del brújula del ADCP con el GPS externo.
- **Stick Ship Track:** son gráficas de series temporales de la posición relativa de la embarcación, se presentan vectores perpendiculares a la trayectoria de la embarcación que representa la magnitud de la velocidad del flujo promediada en la profundidad.
- **Velocity Contour:** muestra la velocidad del flujo para toda la sección medida junto a referencias terrestres.
- **Composite Tabular:** en esta ventana se muestra los caudales registrados en cada sección, y sus respectivos parámetros de navegación.

El Winriver II puede exportar un resumen de los caudales generados por los transectos medidos para una sección determinada. La venta de “Discharge Summary” mostrará cada uno de los caudales registrados en cada transecto. Este valor se muestra en la columna de “Total Q” (caudal total), en la misma columna se puede observar el caudal promedio de todos los transectos válidos. La columna “Delta Q” indica la desviación estándar de los valores del caudal de cada transecto, se debe

notar que el valor aceptable del programa es del 5% del promedio de los transectos. En la Figura N° 3.9 se puede mostrar que el error es aceptable porque es menor al 5% como sugiere el programa.

Transect	Start Bank	# Ens.	Start Time	Total Q m ³ /s	Delta Q %	Top Q m ³ /s	Meas. Q m ³ /s	Bottom Q m ³ /s	Left Q m ³ /s
Amazonas-S04000	Right	528	16:32:00	17419.287	1.98	369.845	13782.317	3255.232	8.643
Amazonas-S04001	Left	423	16:41:18	16915.622	-0.97	352.358	13247.529	3302.309	11.014
Amazonas-S04002	Right	484	16:48:40	17184.132	0.60	362.575	13218.523	3590.549	7.694
Amazonas-S04003	Left	437	16:57:00	16808.298	-1.60	351.048	13325.266	3133.934	-8.228
Average		468		17081.835	-0.00	358.956	13393.409	3320.506	4.781
Std Dev.		48		274.947	1.61	8.902	263.160	193.498	8.784
Std.J Avg.]		0.10		0.02	0.00	0.02	0.02	0.06	1.84

FIGURA N° 3.9: Resumen de caudales en el Winriver II. Elaboración propia

Station Number: 04

Meas. No: 0

Station Name: Amazonas-S04

Date: 10/18/2017

Party:	Width: 1108.4 m	Processed by:
Boat/Motor:	Area: 14427.5 m ²	Mean Velocity: 1.18 m/s
Gage Height: 0.000 m	G.H.Change: 0.000 m	Discharge: 17,100 m ³ /s

Area Method: Avg. Course	ADCP Depth: 0.060 m	Index Vel.: 0.00 m/s	Rating No.: 1
Nav. Method: DGPS	Shore Ens.: 10	Adj. Mean Vel.: 0.00 m/s	Qm Rating: U
MagVar Method: None (-6.3°)	Bottom Est: Power (0.1667)	Rated Area: 0.000 m ²	Diff.: 0.000%
Depth: Composite (BT)	Top Est: Power (0.1667)	Control1: Unspecified	Control2: Unspecified
		Control3: Unspecified	

Screening Thresholds:	ADCP:
BT 3-Beam Solution: YES	Type/Freq.: RiverRay / 600 kHz
WT 3-Beam Solution: YES	Serial #: 10191 Firmware: 44.19
BT Error Vel.: 1.00 m/s	Bin Size: 10 cm Blank: 16 cm
WT Error Vel.: 10.00 m/s	BT Mode: Auto BT Pings: Dyn
BT Up Vel.: 10.00 m/s	WT Mode: Auto WT Pings: Dyn
WT Up Vel.: 10.00 m/s	WZ : 5
Use Weighted Mean Depth: YES	
Max. Vel.: 2.87 m/s	
Max. Depth: 29.4 m	
Mean Depth: 13.0 m	
% Meas.: 78.41	
Water Temp.: None	
ADCP Temp.: 29.4 °C	

Performed Diag. Test: NO

Project Name: Amazonas-S04_0.mmt

Performed Moving Bed Test: NO

Software: 2.18

Performed Compass Calibration: NO Evaluation: NO

Meas. Location:

Tr.#	Edge Distance		#Ens.	Discharge						Width	Area	Time		Mean Vel.		% Bad		
	L	R		Top	Middle	Bottom	Left	Right	Total			Start	End	Boat	Water	Ens.	Bins	
000	R	50.0	5.00	528	370	13782	3255	8.64	3.25	17419	1107.3	14364.7	16:32	16:40	2.21	1.21	0	0
001	L	50.0	2.00	423	352	13248	3302	11.0	2.41	16916	1091.6	14390.7	16:41	16:47	2.72	1.18	0	0
002	R	50.0	5.00	484	363	13219	3591	7.69	4.79	17184	1117.2	14574.4	16:48	16:56	2.42	1.18	0	0
003	L	50.0	5.00	437	351	13325	3134	-8.23	6.28	16808	1117.4	14380.2	16:57	17:03	2.69	1.17	0	0
Mean		50.0	4.25	468	359	13393	3321	4.78	4.18	17082	1108.4	14427.4	Total	00:31	2.51	1.18	0	0
SDev		0.00	1.50	48	8.90	263	193	8.78	1.71	275	12.1	98.5			0.24	0.02		
SD/M		0.00	0.35	0.10	0.02	0.02	0.06	1.84	0.41	0.02	0.01	0.01			0.10	0.02		

FIGURA N° 3.10: Reporte del Winriver II. Elaboración propia

La ventana "Discharge Summary" presenta las variables más representativas de la medición realizada. De la misma manera, el programa puede exportar un reporte de resumen, las mediciones realizadas como el ancho promedio y el área de la sec-

ción hidrodinámica, velocidad máxima y velocidad promedio de flujo, profundidad promedio y máxima de la sección hidrodinámica y el caudal (Figura N° 3.10).

3.3 VISUALIZACIÓN DE MEDICIONES

El programa Velocity Mapping Toolbox (VMT), basado en el entorno de programación de Matlab, nos permite visualizar, procesar y analizar la información medida en campo mediante el ADCP. A su vez, permite exportar la información con diferentes extensiones que pueden ser leídos por programas como el Google Earth, ArcGis, Qgis y Tecplot (Parsons et al., 2013).

Los datos de las mediciones de cada transecto previamente deben ser exportados desde el Winriver II, con formato ASCII en un archivo de texto. Para su visualización mediante el programa VMT, se debe seleccionar todos los archivos de los transectos al mismo tiempo. El programa VMT está compuesto por las siguientes ventanas (Figura N° 3.11):

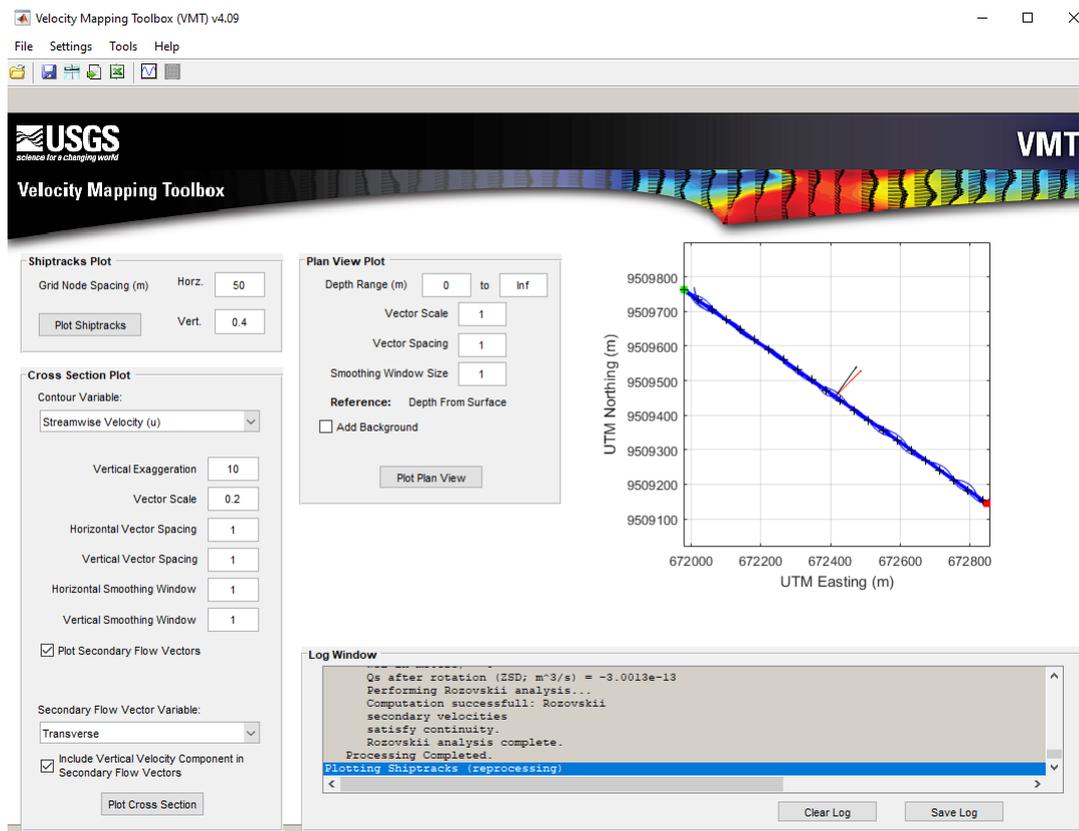


FIGURA N° 3.11: Ventanas del VMT. Elaboración propia

- **Shiptracks Plot:** permite la visualización de la trayectoria promedio de todos los transectos y dividirla por nodos.
- **Cross Section Plot:** permite visualizar la velocidad en toda la sección de

estudio, y permite graficar la velocidad primaria y la velocidad secundaria, donde puede incluir opciones como la turbulencia. Se puede configurar la escala de los vectores del flujo secundario, su ubicación en función de la configuración de los nodos, además se puede generar un suavizado de los resultados de los nodos, tanto en la vertical como la horizontal y mostrar un mejor resultado de la velocidad en una sección.

- **Plan View Plot:** En esta venta permite la visualización de los resultados de la velocidad en una vista en planta. Además, se puede editar el rango de profundidad del cálculo de la velocidad promediada respecto a la profundidad, se puede cambiar las escalas de los vectores y el suavizado.

El VMT junta los datos de los transectos y promedia los datos de velocidad del ADCP, repetidos a lo largo de una sección transversal del río, proporcionando la capacidad de trazar vectores de velocidad en tres dimensiones. Lane et al. (2000) presentaron cuatro definiciones para el flujo secundario:

- La definición de la línea central.
- La definición de Rozovskii.
- La definición de descarga transversal neta cero.
- La definición de continuidad de descarga.

Existen algunas limitaciones para el uso de las definiciones de flujo secundario previamente mencionadas en confluencias de ríos grandes, como el caso de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, que presentan secciones transversales muy grandes.

Primero, las variaciones transversales de la confluencia pueden variar la dirección del flujo principal, por lo tanto, la definición de un marco fijo en toda la sección no es posible. En segundo lugar, la ubicación de una sección referencial en la confluencia es difícil determinar, debido a que el flujo secundario cambia de manera permanente su curvatura y presenta direcciones opuestas en ambos lados de la capa de interfaz de mezcla de la confluencia. Estas restricciones dan como resultado que la definición de la línea central y los métodos que solo definen un plano a lo largo de la sección, para el cálculo del flujo secundario, no sean correctos de aplicar (Szupiany et al., 2009).

De acuerdo con la definición de Rozovskii (1954), rota cada conjunto vertical de mediciones de velocidad, de forma que los componentes de velocidades primarios y secundarios se encontraran alineados en forma paralela y perpendicular respectivamente, con la orientación de la velocidad promediada en profundidad. Esto fue

de gran utilidad para identificar el movimiento del flujo helicoidal en confluencias convergentes (Rhoads & Kenworthy, 1999).

Además, Lane et al. (2000) señalaron que al producirse la rotación de Rozovskii la identificación de la circulación helicoidal era inevitable. Por tal razón, la presente investigación utiliza la definición de Rozovskii, para calcular el flujo secundario mediante el programa VMT en cada una de las secciones medidas en campo.

A continuación se muestra los resultados medidos en campo luego del procesamiento de los datos de los dos casos de estudio.

3.3.1 Mediciones del Caso I

Se presentan las mediciones del caso I, en el que se midieron los niveles, caudales y velocidades en la temporada de vaciante, en octubre de 2017.

3.3.1.1 Morfología de lecho

Las mediciones realizadas para la toma de la información de la batimetría de la zona de la confluencia de los ríos marañón y Ucayali. Fueron a través de los siguientes equipos:

- La ecosonda “Monohaz Bathy-500MF” que sirvió para medir las profundidades del río.
- Los GPS diferencial “GR5 Topcon” modo base y rover, que sirve para realizar las mediciones de los perfiles, uno en estado base en el punto de control y otro en estado rover, que ira junto con el sensor de la ecosonda en el soporte inoxidable sujeta al costado de la embarcación.
- Se usó el software de navegación y medición “Hypack Survey”, donde se muestra el mapa de perfiles de medición en tiempo real, la lectura de los datos de profundidad que registra la ecosonda, la lectura de los datos del GPS diferencial.

Para el proceso de medición de la batimetría, se inició con el posicionamiento del GPS base en el punto de control, este punto estuvo en una área libre y despejada cerca al margen del río. Seguidamente, se ubicó al costado de la embarcación el soporte vertical donde estuvo montada la ecosonda y GPS rover. La ecosonda estuvo sumergida en la parte inferior del soporte, mientras que el GPS rover estuvo ubicada en la parte superior del soporte. Las mediciones de la batimetría se realizaron en secciones cada 500 metros, sobre el río Marañón y Ucayali y la zona de la confluencia. La información procesada se muestra en la Figura N° 3.12.

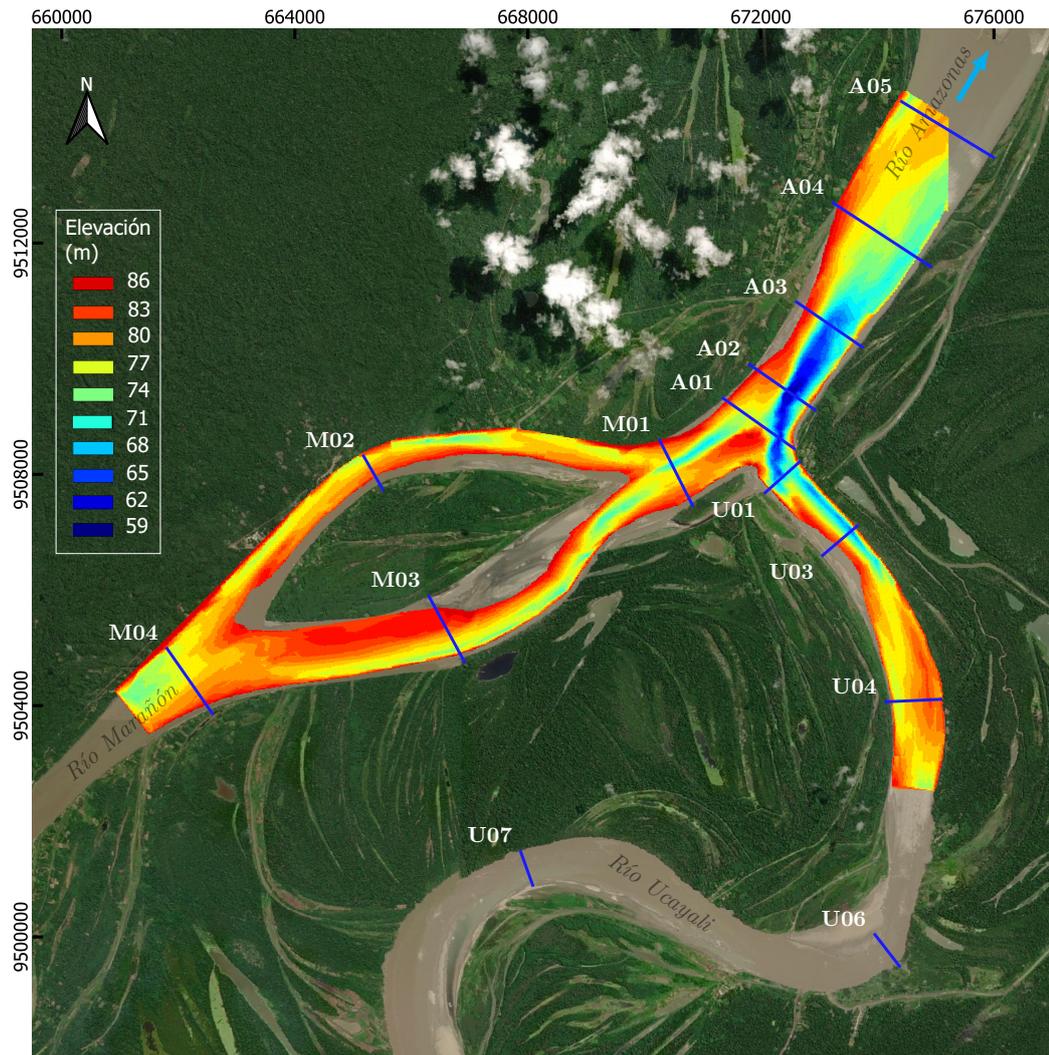


FIGURA N° 3.12: Batimetría de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali en temporada de vaciante. Elaboración propia

3.3.1.2 Condiciones hidráulicas

Se presentan las condiciones hidráulicas de cada sección (Figura N° 3.3) medidas mediante el ADCP, luego de realizar el respectivo pos-procesamiento de la información. En la Tabla N° 3.1 se presenta las mediciones realizadas, de las cinco secciones del río Ucayali aguas arriba de la confluencia, se puede observar la diferencia de caudales en cada sección debido a que la medición se realizó en diferentes días. La Tabla N° 3.2 muestra las mediciones de las cuatro secciones del río Marañón realizadas aguas arriba de la confluencia. Tabla N° 3.3 muestra las cinco secciones en la zona de la confluencia en el inicio del río Amazonas.

TABLA N° 3.1: Parámetros hidráulicos en el río Ucayali (vaciante)

Río Ucayali						
Sección	Nivel de agua (m)	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)	Área (m^2)	Ancho (m)	Altura media (m)	Velocidad media ($\frac{m}{s}$)
U01	90.4	5366	11837	703	16.8	0.5
U03	90.6	5320	5950	630	9.4	0.9
U04	89.3	4279	6096	872	7.0	0.7
U06	90.9	4773	6061	505	12.0	0.8
U07	91.2	4736	6774	577	11.7	0.7

TABLA N° 3.2: Parámetros hidráulicos en el río Marañón (vaciante)

Río Marañón						
Sección	Nivel de agua (m)	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)	Área (m^2)	Ancho (m)	Altura media (m)	Velocidad media ($\frac{m}{s}$)
M01	90.4	11967	9120	1071	8.5	1.3
M02	90.9	5024	3969	479	8.3	1.3
M03	90.7	7135	6063	1072	5.7	1.2
M04	91.1	12314	10600	1188	8.9	1.2

TABLA N° 3.3: Parámetros hidráulicos en el río Amazonas (vaciante)

Río Amazonas						
Sección	Nivel de agua (m)	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)	Área (m^2)	Ancho (m)	Altura media (m)	Velocidad media ($\frac{m}{s}$)
A01	90.3	16932	18274	1439	12.7	0.9
A02	90.4	17082	14428	1108	13.0	1.2
A03	90.1	17508	16486	1169	14.1	1.1
A04	90.2	17674	16837	1623	10.4	1.0
A05	89.8	17661	17711	1754	10.1	1.0

3.3.1.3 Velocidades promediadas en la vertical

Se presenta los resultados de las velocidades promediadas en profundidad en cada sección de estudio (Figura N° 3.3), la vista en planta muestra los vectores del flujo principal en cada sección de estudio como se muestra en la Figura N° 3.13.

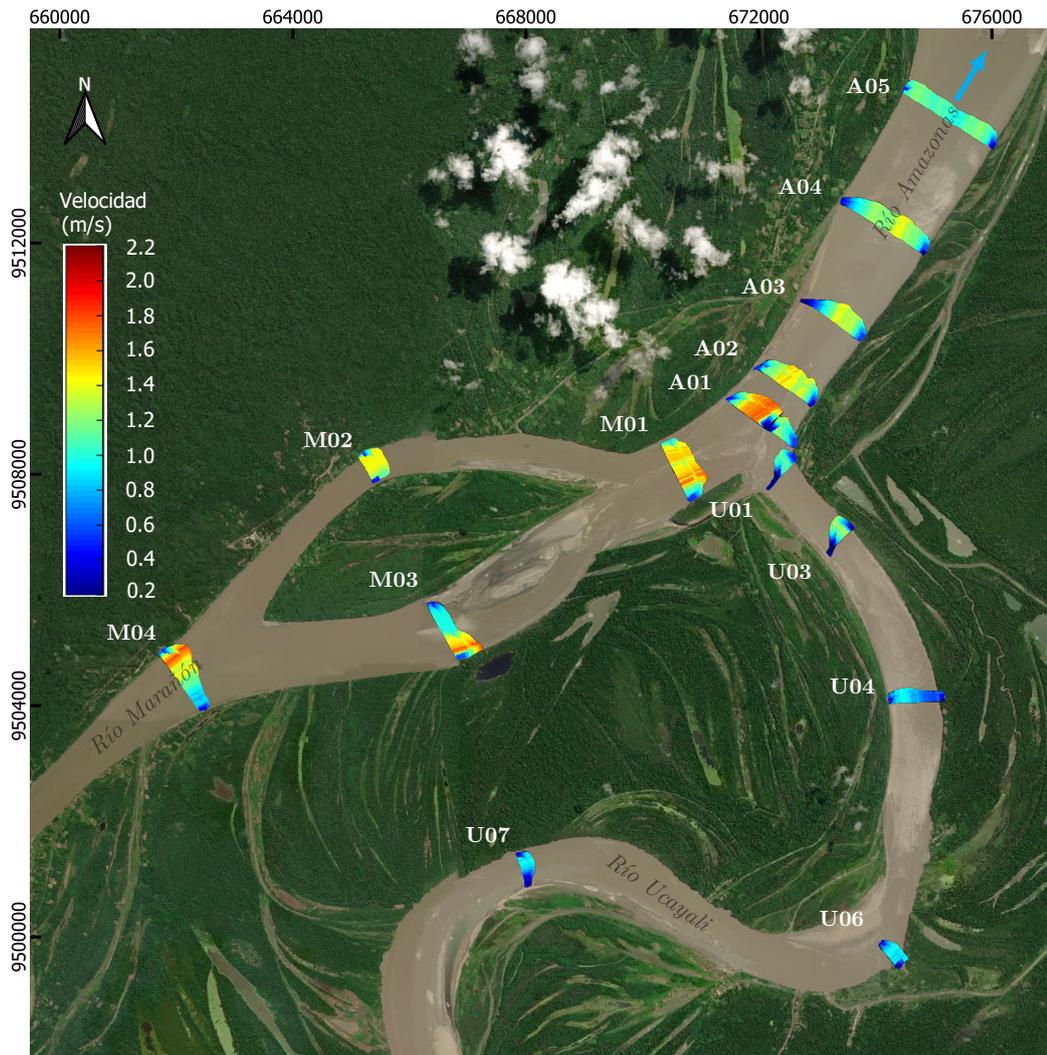


FIGURA N° 3.13: Velocidad promediada en profundidad en la zona de la confluencia para la temporada de vaciante. Elaboración propia

3.3.1.4 Velocidades en las secciones de estudio

En este capítulo se presentan los resultados de la distribución de velocidades en cada sección de estudio realizadas mediante el ADCP. Las secciones de estudio (Figura N° 3.3), en cada sección se presenta la altitud de la sección, y el ancho de la sección medida.

La Figura N° 3.14 se muestran los resultados de las cinco secciones de estudio en el río Ucayali, aguas arriba de su confluencia con el río Marañón. Se presenta la distribución de la velocidad del flujo principal en cada sección, además se grafica la dirección del vector del flujo secundario producido en cada sección.

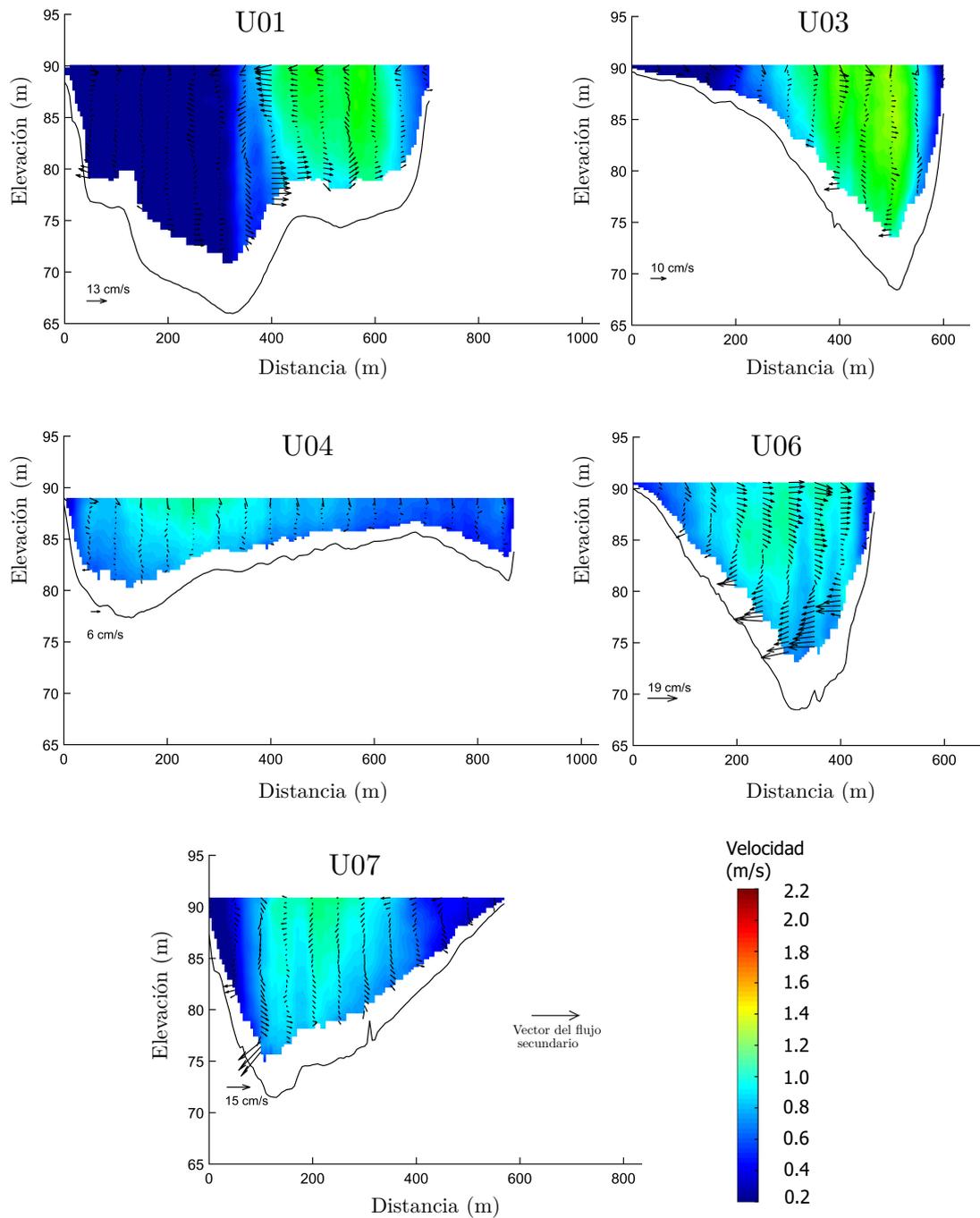


FIGURA N° 3.14: Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Ucayali (vaciante). Elaboración propia

La Figura N° 3.15 se muestran los resultados de las cuatro secciones de estudio en el río Marañón, antes de su confluencia con el río Ucayali. Se presenta la distribución de la velocidad del flujo principal en cada sección, además se grafican la dirección del vector del flujo secundario producido en cada sección.

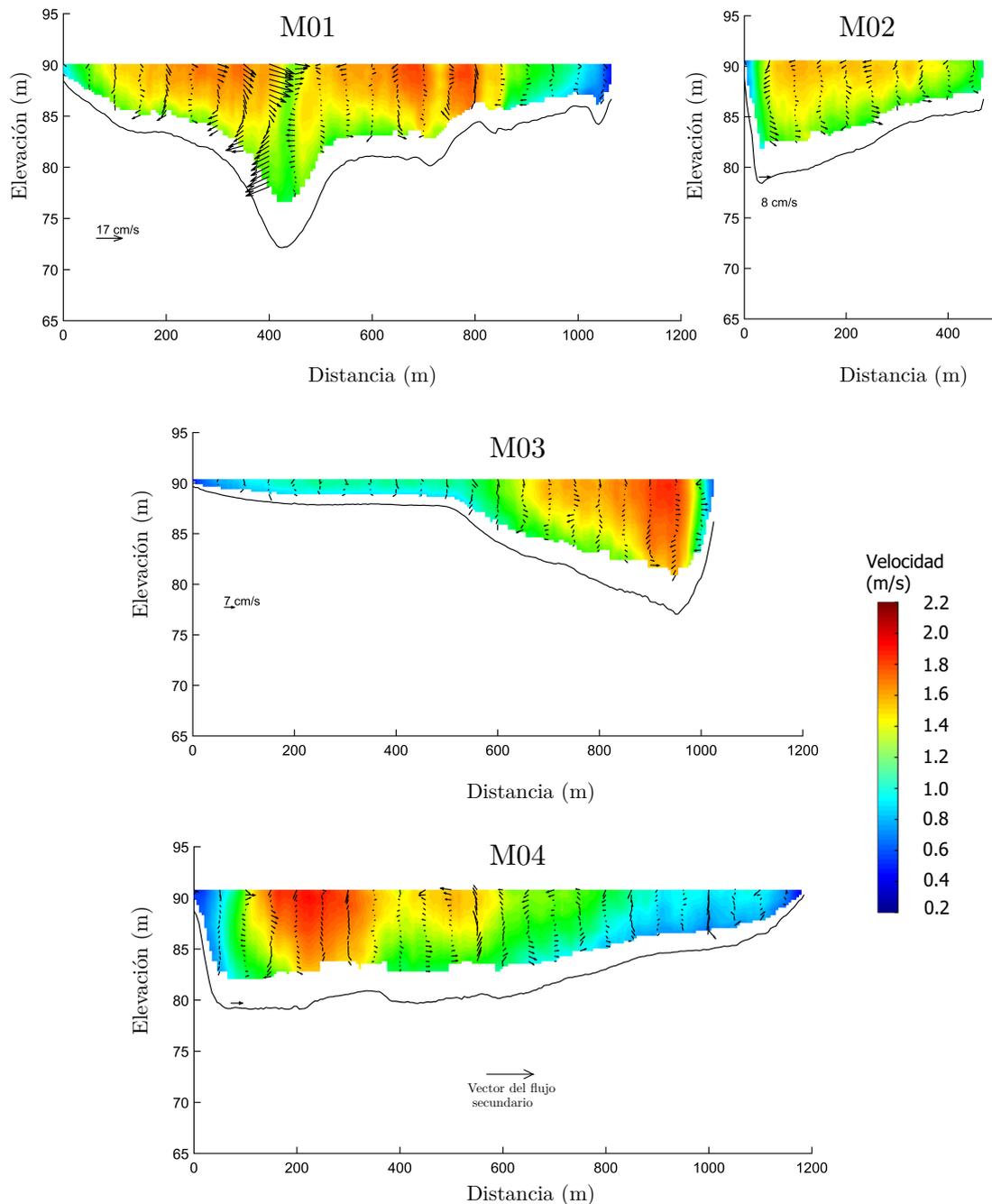


FIGURA N° 3.15: Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Marañón (vaciante). Elaboración propia

La Figura N° 3.16 se muestran los resultados de las cinco secciones de estudio en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, que dan el origen al río Amazonas. Se presenta la distribución de la velocidad del flujo principal en cada sección, además se grafican la dirección del vector del flujo secundario producido en cada sección.

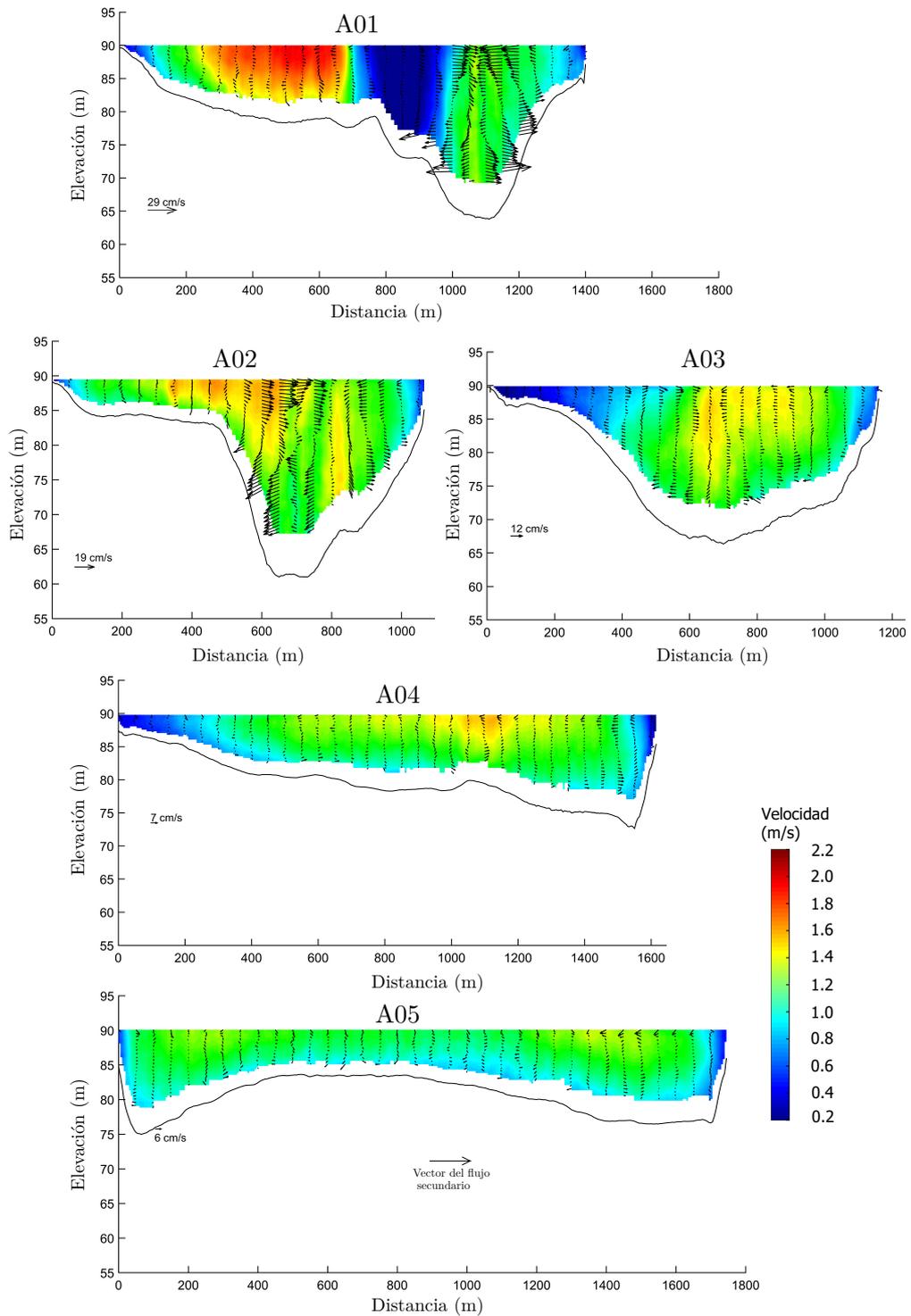


FIGURA N° 3.16: Distribución de la velocidad del flujo en la zona de la confluencia. Elaboración propia

3.3.2 Mediciones del Caso II

Se presentan las mediciones del caso II, en el que se midieron los niveles, velocidades y caudales correspondientes a enero de 2019, durante la temporada de creciente.

3.3.2.1 Morfología de lecho

La presente batimetría fue tomada por el Servicio de Hidrografía y Navegación de la Amazonía, en el año 2014, en la temporada de creciente entre los meses de abril y mayo. Las mediciones se realizaron mediante secciones ubicadas cada 250 metros en promedio, el levantamiento batimétrico se realizó mediante el equipo de ecosonda monohaz. El procedimiento de medición fue explicado en la sección “Morfología de lecho Caso I”. La información procesada e interpolada de la batimetría en la temporada creciente se muestra en la Figura N° 3.17.

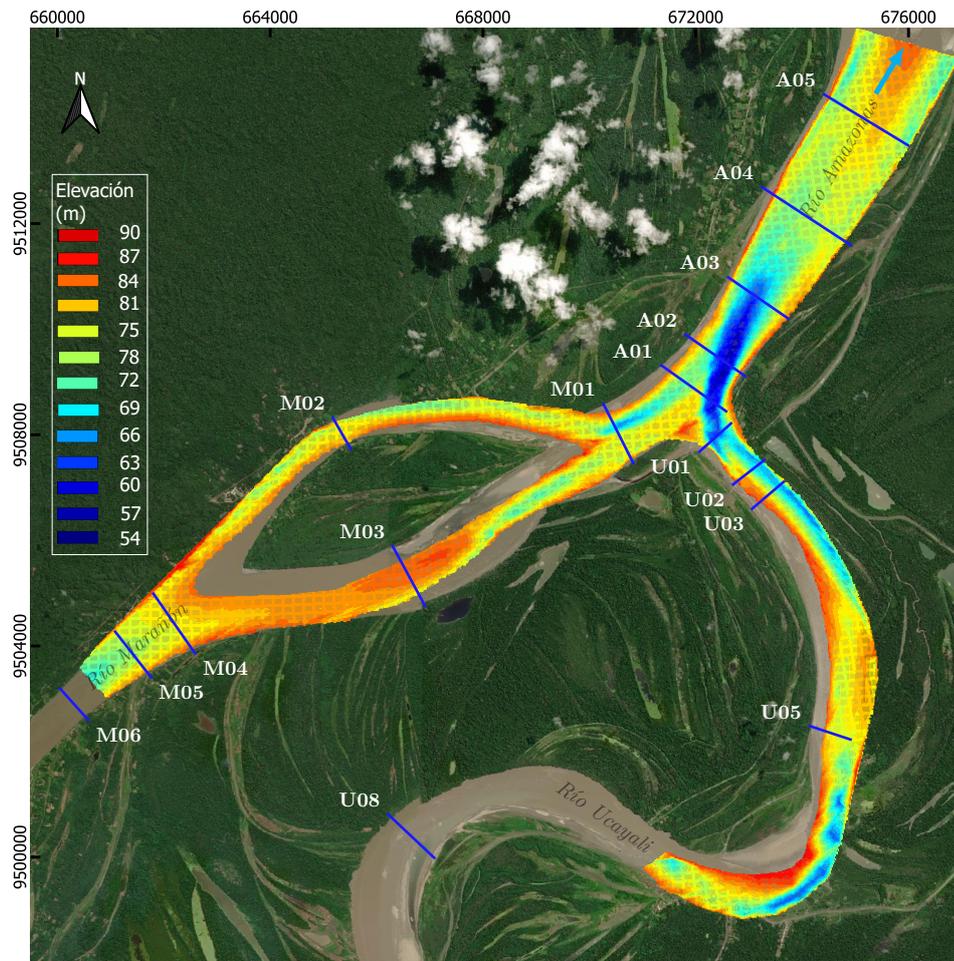


FIGURA N° 3.17: Batimetría de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali en temporada de creciente. Elaboración propia

3.3.2.2 Condiciones hidráulicas

Se presentan las condiciones hidráulicas de cada sección (Figura N° 3.4) medidas mediante el ADCP, luego de realizar el respectivo pos-procesamiento de la información. En la Tabla N° 3.4 se presenta las mediciones realizadas, de las cinco secciones del río Ucayali aguas arriba de la confluencia. La Tabla N° 3.5 muestra las mediciones de las seis secciones del río Marañón realizadas aguas arriba de la confluencia. Tabla N° 3.6 muestra las cinco secciones en la zona de la confluencia en el inicio del río Amazonas.

TABLA N° 3.4: Parámetros hidráulicos en el río Ucayali (creciente)

Río Ucayali						
Sección	Nivel de agua (m)	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)	Área (m^2)	Ancho (m)	Altura media (m)	Velocidad media ($\frac{m}{s}$)
U01	94.1	16163	12253	794	15.4	1.3
U02	94.5	17008	9034	744	12.1	1.9
U03	94.7	17052	9305	783	11.9	1.8
U05	94.8	16995	10125	875	11.6	1.7
U08	95.0	16577	10615	1006	10.5	1.6

TABLA N° 3.5: Parámetros hidráulicos en el río Marañón (creciente)

Río Marañón						
Sección	Nivel de agua (m)	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)	Área (m^2)	Ancho (m)	Altura media (m)	Velocidad media ($\frac{m}{s}$)
M01	94.4	16655	15249	1208	12.6	1.1
M02	94.6	7762	6125	511	12.0	1.3
M03	94.6	9024	9240	1315	7.0	1.0
M04	94.6	17205	13827	1208	11.4	1.2
M05	94.9	18461	13356	996	13.4	1.4
M06	94.8	18320	11647	675	17.3	1.6

3.3.2.3 Velocidades promediadas en la vertical

Se presenta los resultados de las velocidades promediadas en profundidad en cada sección de estudio (Figura N° 3.4), la vista en planta muestra los vectores del flujo principal en cada sección de estudio como se muestra en la Figura N° 3.18.

TABLA N° 3.6: Parámetros hidráulicos en el río Amazonas (creciente)

Río Amazonas						
Sección	Nivel de agua (m)	Caudal ($\frac{m^3}{s}$)	Área (m^2)	Ancho (m)	Altura media (m)	Velocidad media ($\frac{m}{s}$)
A01	94.4	30840	24265	1518	16.0	1.3
A02	94.0	31358	21598	1214	17.8	1.5
A03	94.2	31989	21281	1351	15.8	1.5
A04	94.7	34620	21356	1719	12.4	1.6
A05	94.6	34386	21778	1822	12.0	1.6

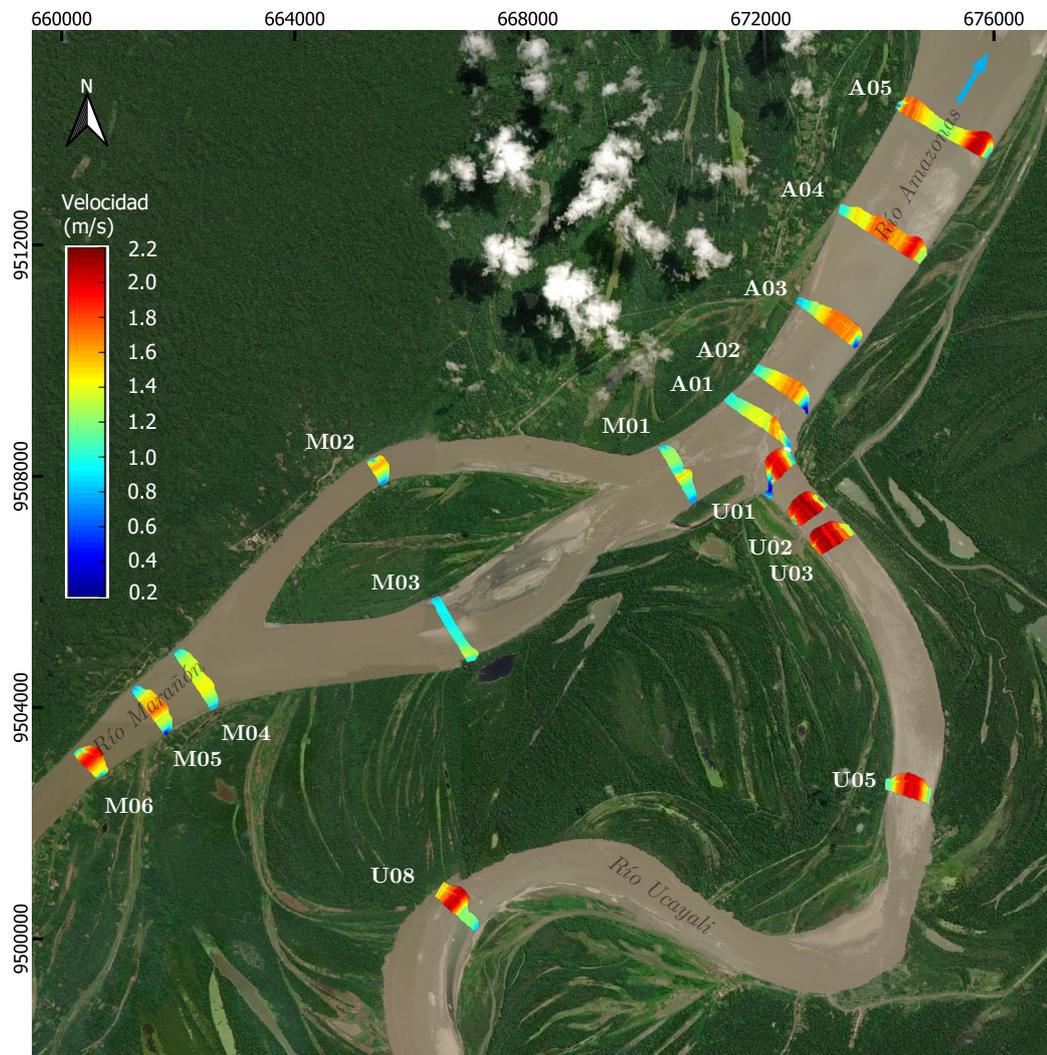


FIGURA N° 3.18: Velocidad promediada en profundidad en la zona de la confluencia para la temporada de crecida. Elaboración propia

3.3.2.4 Velocidades en las secciones de estudio

En este capítulo se presentan los resultados de la distribución de velocidades en cada sección de estudio realizadas mediante el ADCP. Las secciones de estudio (Figura N° 3.4), en cada sección se presenta la altitud de la sección, y el ancho de la sección medida.

La Figura N° 3.19 muestra los resultados de las cinco secciones de estudio en el río Ucayali, aguas arriba de su confluencia con el río Marañón. Se presenta la distribución de la velocidad del flujo principal en cada sección, además se grafica la dirección del vector del flujo secundario producido en cada sección.

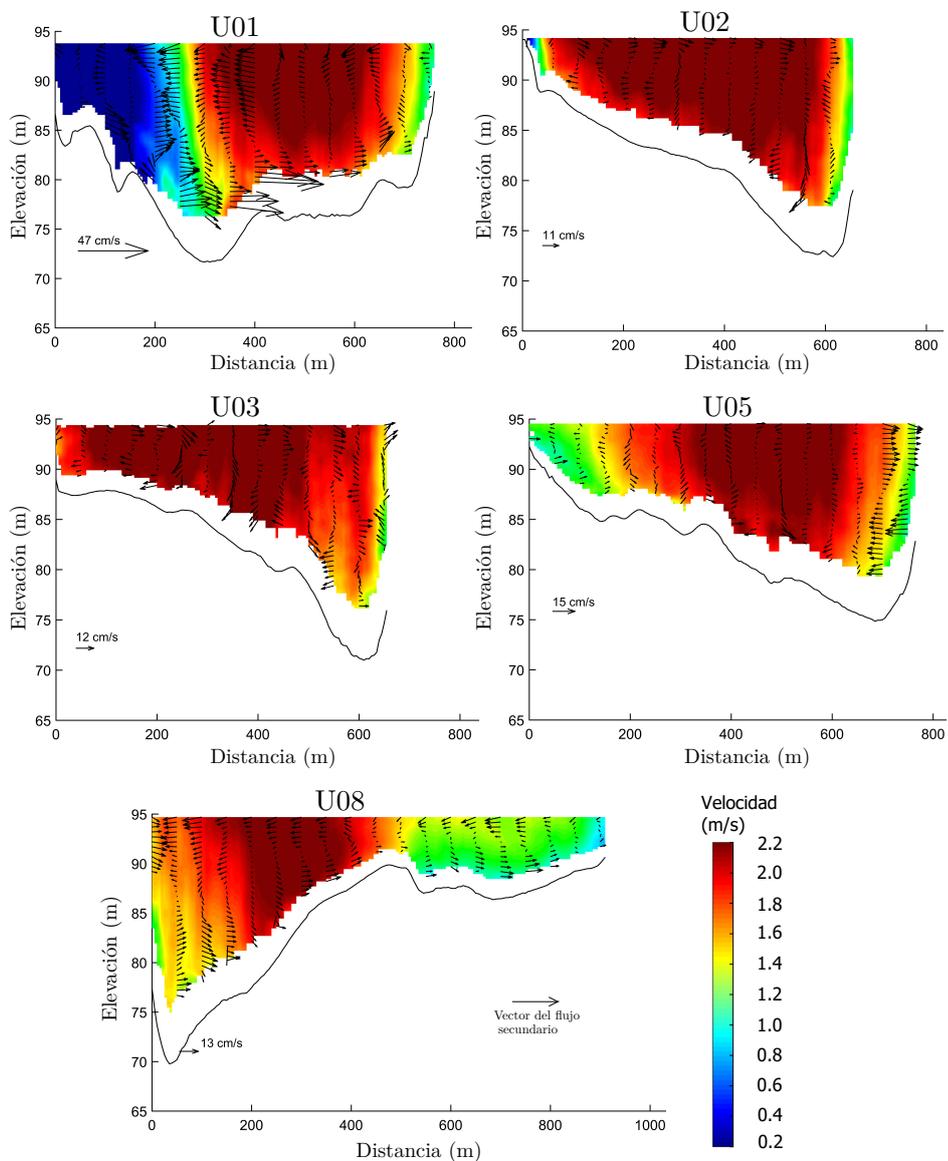


FIGURA N° 3.19: Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Ucayali (creciente). Elaboración propia

La Figura N° 3.20 muestra los resultados de las seis secciones de estudio en el río Marañón, aguas arriba de su confluencia con el río Ucayali. Se presenta la distribución de la velocidad del flujo principal en cada sección, además se grafica la dirección del vector del flujo secundario producido en cada sección.

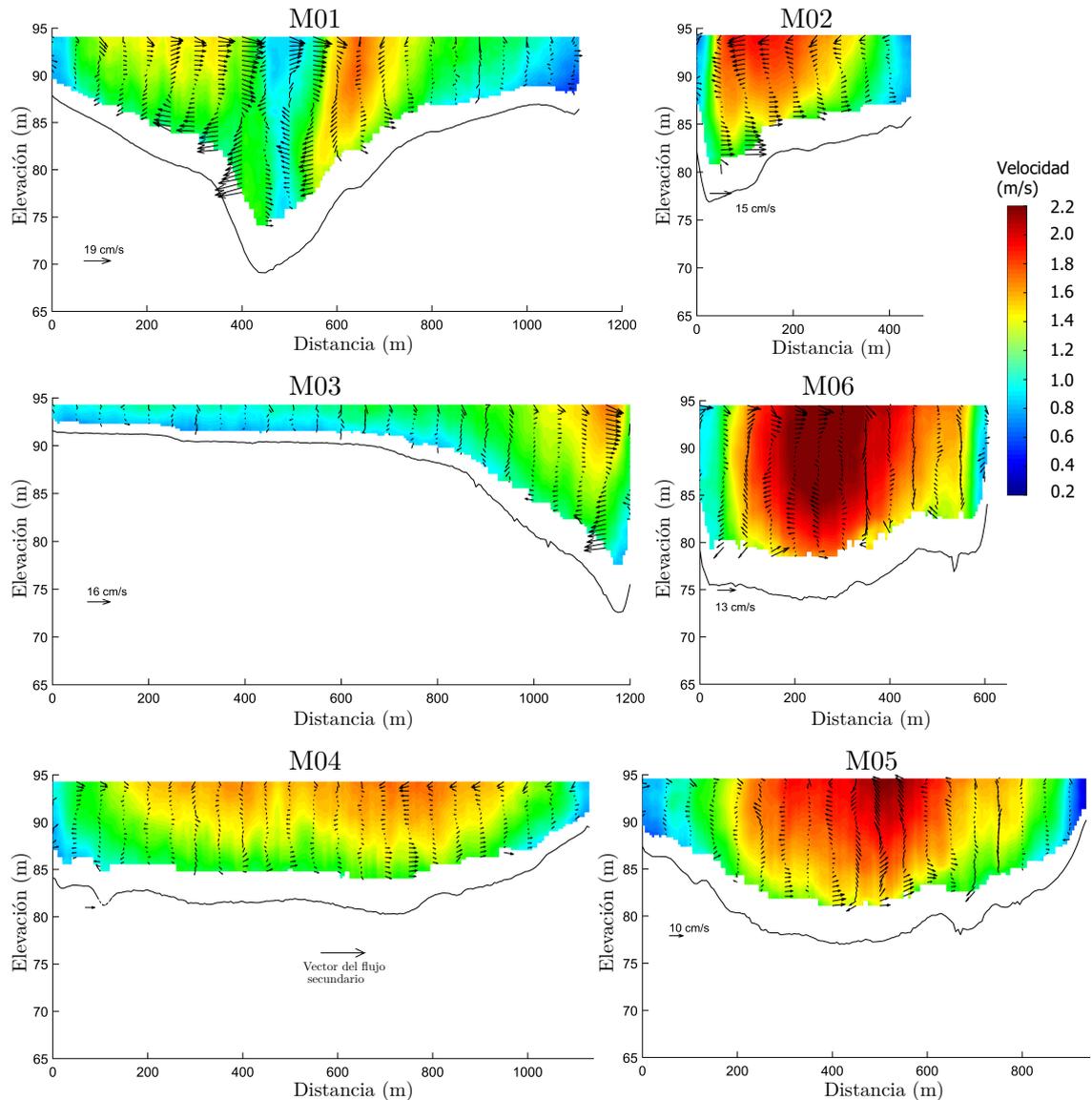


FIGURA N° 3.20: Distribución de la velocidad del flujo en las secciones de estudio del río Marañón (creciente). Elaboración propia

La Figura N° 3.21 muestra los resultados de las cinco secciones de estudio en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, que dan el origen al río Amazonas. Se presenta la distribución de la velocidad del flujo principal en cada sección, además se grafica la dirección del vector del flujo secundario producido en cada sección.

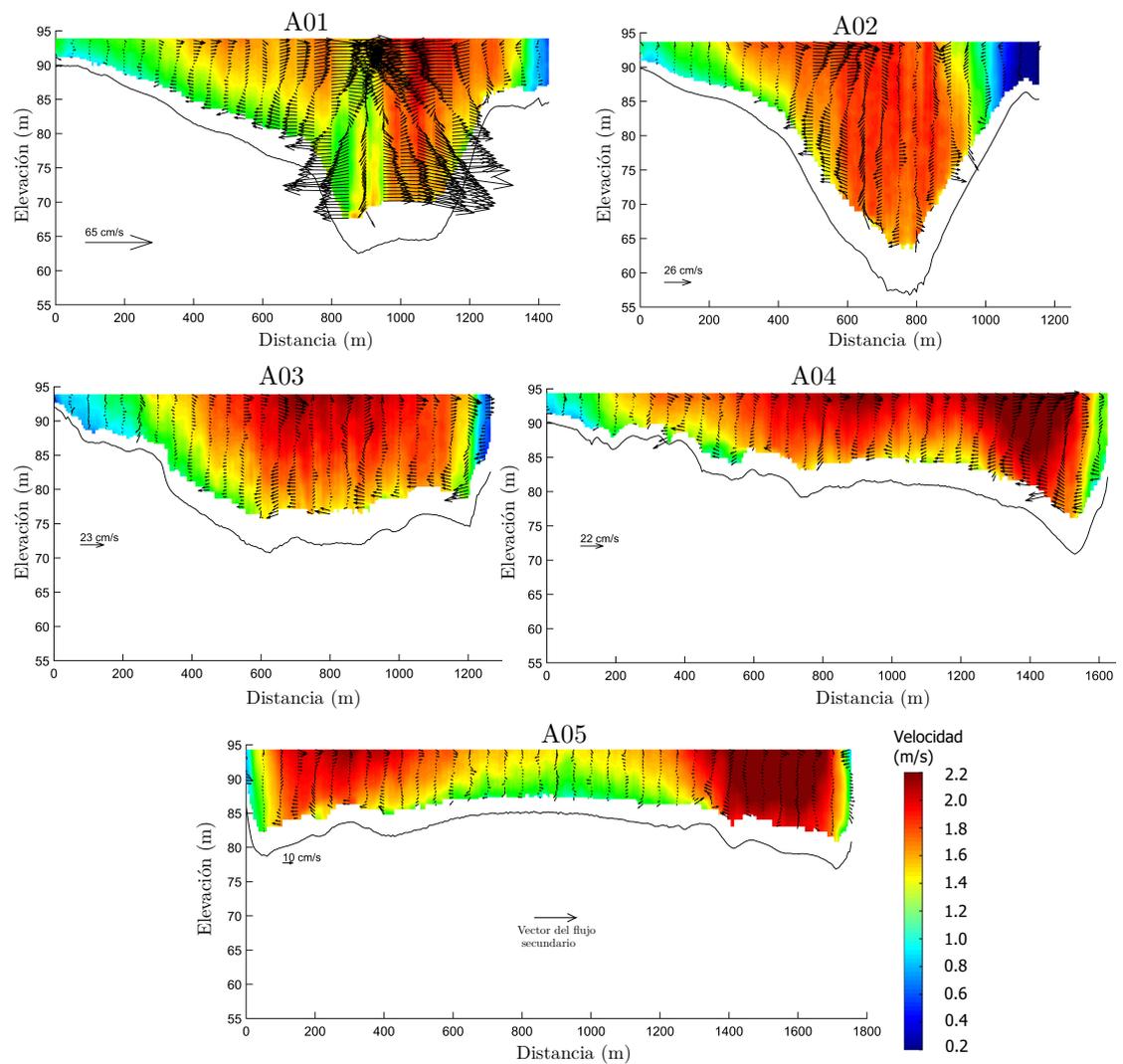


FIGURA N° 3.21: Distribución de la velocidad del flujo en la zona de la confluencia (creciente).
Elaboración propia

CAPÍTULO IV: MODELAMIENTO NUMÉRICO TRIDIMENSIONAL

4.1 METODOLOGÍA

El modelo numérico desarrollado para la simulación de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, es un modelo de carácter tridimensional (el estudio se realiza en las tres componentes espaciales XYZ), el cual permite estudiar el comportamiento tridimensional del campo de velocidades en la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Se realizó mediante el software gratuito de código abierto OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation), que sirve para resolver casos de la dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante la discretización de volúmenes finitos (Holzmann, 2016).

OpenFOAM esta basado en librerías codificadas en el lenguaje C++, que es un lenguaje de programación orientado a objetos. OpenFOAM cuenta con una gran cantidad de solucionadores preestablecidos (Holzmann, 2016), pero gracias a su naturaleza de código abierto cada usuario puede escribir sus propios solucionadores, no obstante, el usuario debe tener una sólida comprensión de la física del problema a resolver.

El proceso de simulación del modelo numérico se realizará de acuerdo al esquema mostrado en la Figura N° 4.1. El proceso de simulación se realiza en tres procesos, los cuales son preprocesamiento, procesamiento y postprocesamiento.

- **Preprocesamiento:** En esta etapa se prepara la información necesaria para realizar el modelo numérico. Se define el alcance del modelo numérico, los objetivos del modelo numérico y el tipo de modelo de turbulencia a utilizar. Además, se define el dominio del modelo, la creación de la malla en el dominio de simulación. Se definirá el solver adecuado al comportamiento del flujo, y la geometría de estudio. Una vez creada la malla del dominio de simulación se asignan las condiciones de borde y condiciones iniciales, se establecen las propiedades físicas del fluido. Por último, se asigna las condiciones de simulación, como el tiempo de simulación y el paso de tiempo de cálculo.
- **Procesamiento:** En esta etapa se toma en cuenta el inicio de la simulación (inicio del cálculo mediante la computadora), mediante el terminal se ejecuta el nombre solver utilizado dando inicio la simulación. Luego del inicio de la simulación, el modelador tiene que supervisar la simulación, y corregir los errores de estabilidad numérica.
- **Postprocesamiento:** En esta etapa se realiza la interpretación de los resultados generados, mediante directorios o carpetas. Para la visualización del modelo y los resultados generados, se realiza mediante aplicación gratuita

“ParaView”. Con esta interfaz gráfica se pueden visualizar las variables de estudio.

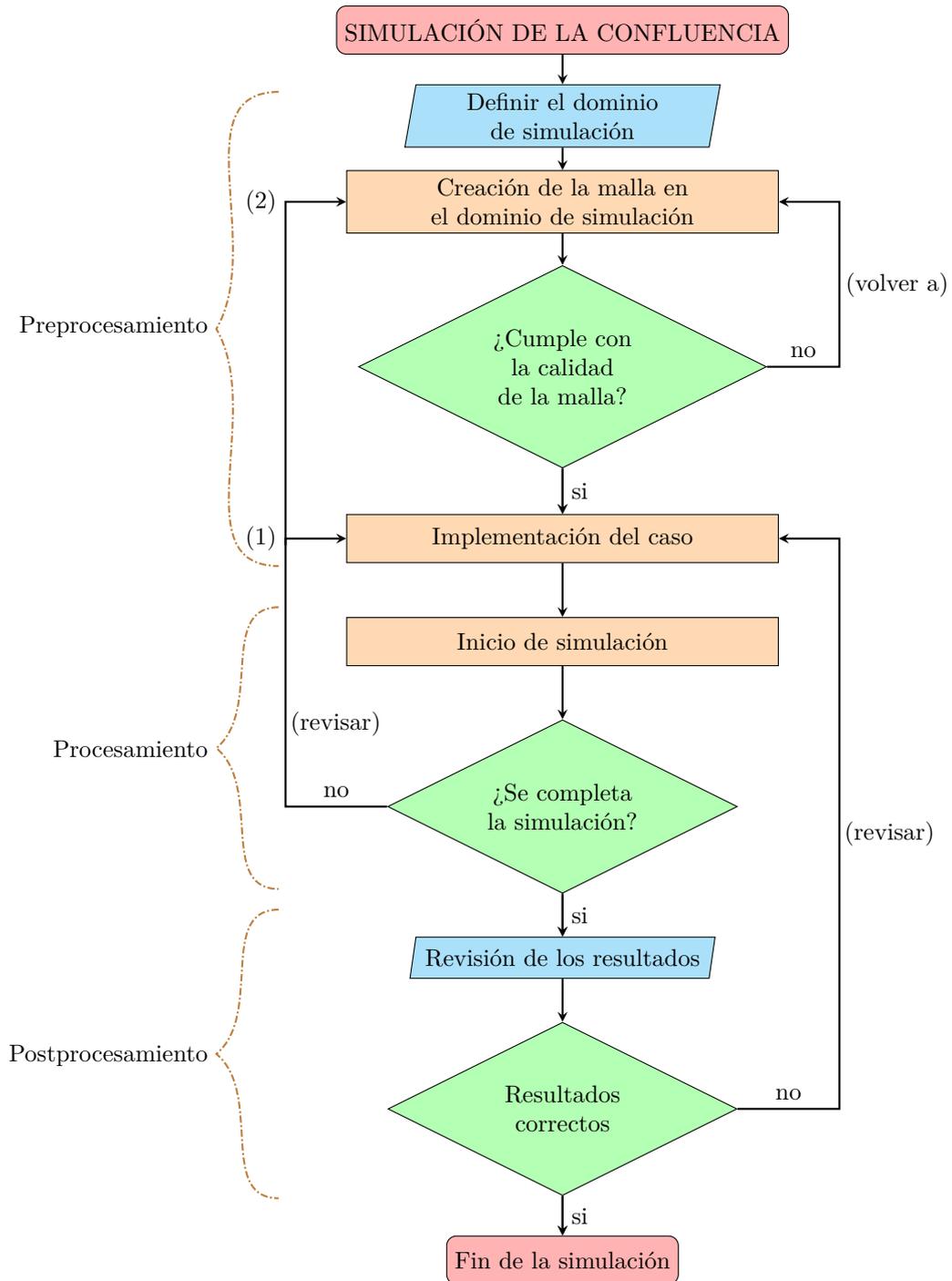


FIGURA N° 4.1: Metodología de simulación. Elaboración propia

4.2 PREPROCESAMIENTO

4.2.1 Alcance del modelo numérico

El modelo numérico realizado cumplirá con los objetivos de la presente tesis, estudiar el flujo secundario en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Como se mencionó en el capítulo anterior, los usuarios pueden crear nuevos solucionarios dentro de OpenFOAM, a partir de los solucionadores preestablecidos dentro del mismo OpenFOAM.

Dentro de la simulación tridimensional de confluencias fluviales, se han presentado dos métodos de tratamiento de la superficie libre del agua. El método de tapa rígida (RLM), que implica que el modelo numérico de la confluencia tendrá un nivel fijo de la superficie de agua, no existe una variación del nivel de agua en todo el tiempo de simulación. El siguiente es el método de volumen de fluido (VOF) (Katopodes, 2019), este método es usado para rastrear el movimiento de la superficie libre del agua (mediante la simulación de la interfaz agua-aire), suele ser usando en modelos que presenta una variación del nivel libre del agua en el periodo de simulación. No obstante, este método presenta poca precisión cuando el flujo de agua es poco profundo (Yang et al., 2013).

De acuerdo con la investigación de Khosronejad et al. (2019), el uso del método de tapa rígida deberá ser usado en cauces fluviales, donde se presenten bajos números de Froude (F_R). Asimismo, tampoco se deben presentar obstrucciones dentro del cauce que podrían originar efectos de remanso aguas arriba y que podrían inducir una transición de flujo subcrítico a supercrítico, así como una aceleración local del flujo.

Shaheed et al. (2019) estudiaron el flujo secundario en una confluencia de canal, mediante modelos numéricos tridimensionales construidos en OpenFoam. Utilizaron el método de tapa rígida. Los resultados fueron validados a través de los datos experimentales tomados del modelo físico desarrollado por Shumate (1998). El modelo numérico mostró buena concordancia con los datos experimentales del modelo físico.

La presente tesis usa el método de tapa rígida o conocido por sus siglas en inglés como RLM (Rigid Lid Model), para desarrollar el modelo numérico tridimensional de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Debido que los datos fueron registrados en campo para la temporada de creciente y vaciante en un periodo corto de tiempo, el flujo presenta un nivel de agua fijo sin presentar grandes variaciones en cada temporada respectivamente. Además, dentro de la zona de la confluencia no se presentan obstrucciones que podrían generar una zona de remanso, lo que fue verificado visualmente en la temporada de mediciones en campo. A su

vez, la confluencia presenta un bajo número de froude (F_R), lo que genera un flujo subcrítico.

4.2.2 Modelo de turbulencia

Investigaciones previas de modelos numéricos construidos para confluencias fluviales, mostraron que la simulación de grandes remolinos (LES) presentaron mejores resultados que los modelos RANS (Constantinescu, 2014). De acuerdo con Booij (2003) los modelos LES reprodujeron mejor el flujo secundario que los modelos RANS. El modelo LES reprodujo adecuadamente los flujos principal y secundario.

Ramos et al. (2019) realizaron simulaciones de confluencias de canal, mediante modelos de turbulencia LES. Ellos estudiaron la influencia de la superficie libre del agua en modelos de tapa rígida (RLM). Los resultados fueron comparados con los resultados experimentales de Weber et al. (2001). De la misma manera, Duguay et al. (2022) estudiaron las estructuras turbulentas, en la zona de la confluencia de los ríos Mitis y Neigette mediante el uso del modelo de turbulencia LES, obteniendo muy buenos resultados con los medidos en campo.

La simulación de grandes remolinos o más conocido por sus siglas en inglés como LES, es un método utilizado en el modelado de la turbulencia. Es un método intermedio entre los modelos de turbulencia DNS y RANS, presentados en el capítulo 2.3 para mayor información. LES es una herramienta de investigación muy útil en el campo de la hidráulica fluvial, en especial en confluencias fluviales, donde se producen estructuras turbulentas que pueden afectar el transporte de sedimentos, el flujo secundario y la interfaz de mezcla en la zona de la confluencia (Keylock et al., 2005).

LES adopta un enfoque diferente a los modelos RANS, donde se manipulan las ecuaciones basándose en las propiedades medias y fluctuantes. La organización de LES se basa en una escala de longitud, que es igual al tamaño de una grilla de la malla empleada para la discretización del modelo mediante volúmenes finitos (Hardy et al., 2003). En la construcción de un modelo de turbulencia LES se debe tener en cuenta dos puntos; la elección del filtro (tamaño de la grilla) y el modelo a escala de subgrilla (SGS). Entonces los remolinos más grandes que la escala de filtro se resolverán directamente, en cambio, los remolinos más pequeños que la escala del filtro se modelarán utilizando un SGS (Hardy et al., 2007).

La presente tesis utiliza el modelo de turbulencia LES (revisar el capítulo 2.3.2), debido a su eficiencia en la simulación de cauces fluviales. El modelo usado para simulación de la subgrilla SGS, es el basado en el modelo de Smagorinsky (1963). Los modelos SGS representan el intercambio de energía entre los remolinos de escalas más grandes a remolinos de escalas más pequeñas, este efecto es conocido

como cascada de energía (capítulo 2.2.2). La solución de un flujo depende en gran medida del tamaño de malla realizada, para estos modelos será necesario emplear mallas relativamente finas, lo cual elevará el costo computacional.

4.2.3 Tratamiento de la rugosidad del lecho

El tratamiento del flujo turbulento cercano a la pared en modelos CFD, es un tema complejo de tratar. Esta zona se caracteriza por grandes gradientes de velocidad, la influencia de la viscosidad molecular y la turbulencia anisótropa (las propiedades fluctuantes del flujo tienen cierta dependencia direccional). Para modelar el flujo turbulento en esta zona se utilizan funciones de pared (Apsley, 2007) con la finalidad de evitar la construcción de una malla muy fina cercana a la pared que puedan resolver las estructuras turbulentas a través del desarrollo de la capa límite (capítulo 2.3.3). La construcción de mallas muy finas en el modelo numérico, elevarían el costo computacional del procesamiento del modelo numérico tridimensional.

El método de función de pared, divide el dominio en una capa interna y una capa externa. En modelos como el $k - \varepsilon$ (capítulo 2.3.1.1), la ecuación estándar de k y ε son utilizadas para resolver la capa externa. Mientras que la capa interna es resuelta a través de la sustitución de la ecuación de ε , por una ecuación que vincula la longitud turbulenta con k , la viscosidad del fluido y la distancia hacia la pared (Sotiropoulos, 2005). Las funciones de pared no representan la complejidad del flujo cerca de la pared; sin embargo, se consideran la única opción práctica para la simulación de ríos naturales (Apsley, 2007).

Las partículas que componen el lecho fluvial son más grandes que la subcapa viscosa del flujo, por consiguiente, es un lecho hidráulicamente rugoso. En el caso de modelos numéricos tridimensionales, el parámetro de rugosidad solo influye directamente en la primera celda cercana a la pared, como un control sobre la elevación en la que la velocidad se vuelve cero (representando una altura de rugosidad) (Lane & Ferguson, 2005). Entonces, la inclusión del término de rugosidad equivalente del grano de arena k_s es importante para los modelos numéricos tridimensionales que simulan cauces fluviales (Sotiropoulos, 2005).

Algunas funciones de pared, en vez de usar la altura de rugosidad y_0 (Figura 4.2), utilizan la rugosidad equivalente del grano de arena k_s . La altura de rugosidad y_0 , es la altura donde la velocidad horizontal media es cero. En lechos rugosos como de las confluencias fluviales, la capa límite aproximadamente se puede dividir en una capa logarítmica (donde el perfil de la velocidad vertical del flujo varía mediante una ley logarítmica), y una subcapa rugosa donde el flujo es afectado por las partículas del lecho (Stoesser et al., 2004).

El perfil de velocidad logarítmico se muestra en la Figura N° 4.2, con una altura de

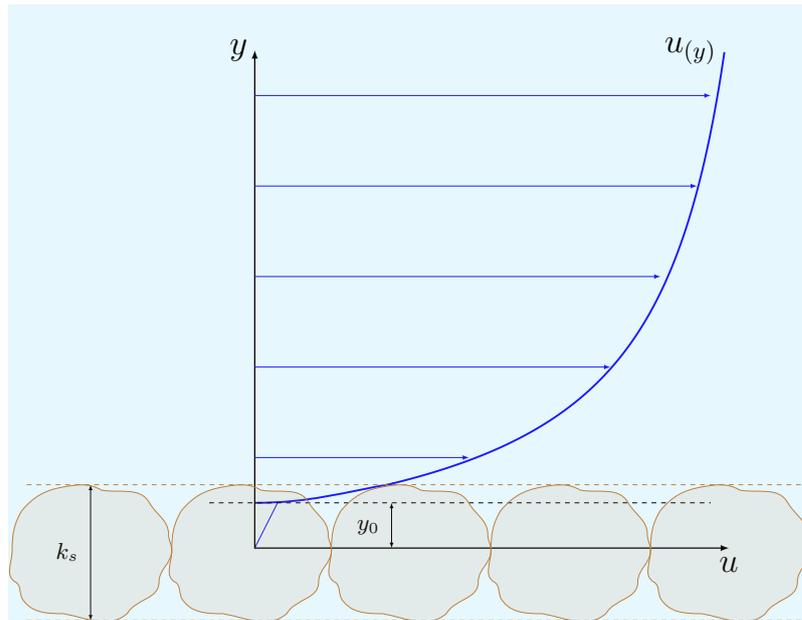


FIGURA N° 4.2: Perfil de velocidad logarítmica sobre lecho rugoso. Elaboración propia

rugosidad y_0 . La capa logarítmica se encuentra sobre y_0 , mientras que la subcapa de rugosidad es la zona por debajo. En la subcapa rugosa el flujo tendrá un comportamiento muy complejo, debido al efecto de las estelas formadas alrededor de las partículas rugosas (Stoesser et al., 2004). La rugosidad equivalente del grano de arena está relacionada con la altura de rugosidad por la siguiente ecuación:

$$k_s = C \cdot y_0 \quad (4.1)$$

Donde el valor de la constante de proporcionalidad C de la ecuación 4.1 puede tomar el valor 30 (Lane & Ferguson, 2005).

Existen varias maneras de calcular la altura de rugosidad, mediante la rugosidad equivalente del grano de arena utilizando la ecuación 4.1, la segunda manera de calcular a partir de la ley de Von Karman-Prandtl (también conocida como la ley de la pared, capítulo 2.3.3) como:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \right) \quad (4.2)$$

Donde u es la velocidad a la altura y , u_* es la velocidad de corte, κ es la constante de Von Karman y y_0 es la altura de rugosidad. La velocidad de corte, esta relacionado con el esfuerzo de corte τ a través de la siguiente ecuación:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (4.3)$$

Donde ρ es la densidad del agua. El esfuerzo τ cortante se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R_h \cdot S \quad (4.4)$$

Donde g es la gravedad, R_h es el radio hidráulico y S es la pendiente de lecho. De esta manera se puede encontrar la altura de rugosidad.

Pero en el caso de confluencias fluviales o ríos con lecho de grava, la rugosidad equivalente del grano de arena k_s , es un dato de gran relevancia para la construcción de modelos numéricos tridimensionales. Este valor puede ser obtenido de relaciones empíricas calculadas a partir de la granulometría de lecho. Las relaciones más utilizadas son (Hardy et al., 2005)

$$y_0 = 0.1D_{84} \quad (4.5)$$

$$k_s = 3.5D_{84} \quad (4.6)$$

$$k_s = 6.8D_{50} \quad (4.7)$$

En el caso de confluencias fluviales grandes como el río Marañón y Ucayali, no solo esta influencia por la rugosidad del grano, sino también por la rugosidad de las formas de fondo. Por tal motivo, el cálculo de k_s es de la siguiente manera con el método de Van Rijn (1984):

$$k_s = k'_s + k''_s \quad (4.8)$$

$$k'_s = 3D_{90} \quad (4.9)$$

$$k''_s = 1.1 \cdot H \left(1 - e^{-\frac{25H}{\lambda}}\right) \quad (4.10)$$

Donde H es la altura de duna, y λ es la longitud de duna medida en campo.

De la misma manera, para la altura de rugosidad y_0 , en ríos grandes con influencia de formas de fondo se presenta mediante el método de Wooding et al. (1973).

$$y_0 = 2H\left(\frac{H}{\lambda}\right)^{1.4} \quad (4.11)$$

De acuerdo a los estudios realizados previamente, para la caracterización de la rugosidad del lecho de fondo de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali se utilizó la ecuación 4.8 de Van Rijn (1984). De las mediciones de campo realizadas en el 2019, se obtuvieron las formas de fondo en la zona de la confluencia, donde se obtuvo alturas de duna desde los $H = 0.21\text{ m}$ hasta los $H = 0.44\text{ m}$ y una longitud de duna entre los $\lambda = 3.9\text{ m}$ hasta $\lambda = 10.1\text{ m}$ y se tuvo un $D_{90} = 0.4\text{ mm}$, obteniendo así un valor de $k_s = 0.17\text{ m}$ hasta un $k_s = 0.32\text{ m}$.

4.2.4 Construcción de la malla

Gran parte de la construcción del modelo numérico tridimensional en OpenFOAM se centra en la construcción de la malla. La importancia de seleccionar los límites del modelo para la construcción de la malla, es un factor importante debido a que una geometría bastante grande generaría un alto costo computacional.

El límite del modelo numérico tridimensional (Figura N° 4.3) fue seleccionado de tal manera que cumpla con el objetivo de la presente tesis, estudiar el flujo secundario en la zona de la confluencia. El límite del modelo seleccionado comprende tres secciones medidas en la zona de la confluencia, y dos secciones antes de la confluencia perteneciente a los ríos Marañón y Ucayali respectivamente. Las mediciones indicadas servirán para calibrar y validar el modelo en el Capítulo V.

4.2.4.1 Tratamiento de la batimetría

Se debe realizar el tratamiento de la información de batimetría para la creación de la superficie en formato STL (archivo de superficie generado mediante triángulos). Este archivo es necesario para la creación de la malla del modelo, mediante la herramienta snappyHexMesh del OpenFOAM.

Se debe procesar la información de la batimetría medida en campo. El procesamiento de la información es realizado mediante el Código N° 4.1 programado en el lenguaje Python. Este código cambia el origen de los datos medidos, para su mejor procesamiento y manipulación, pudiendo exportarlo en un formato de archivo "xyz" que puede ser importado al programa Meshlab, donde se generará el archivo STL.

```
1 import pandas as pd
2
3 #Lectura del archivo de coordenadas medidas
4 data=pd.read_csv(r"C:\Gerles\Confluencia\BathyData.csv", sep="\t",
    header=(0))
```

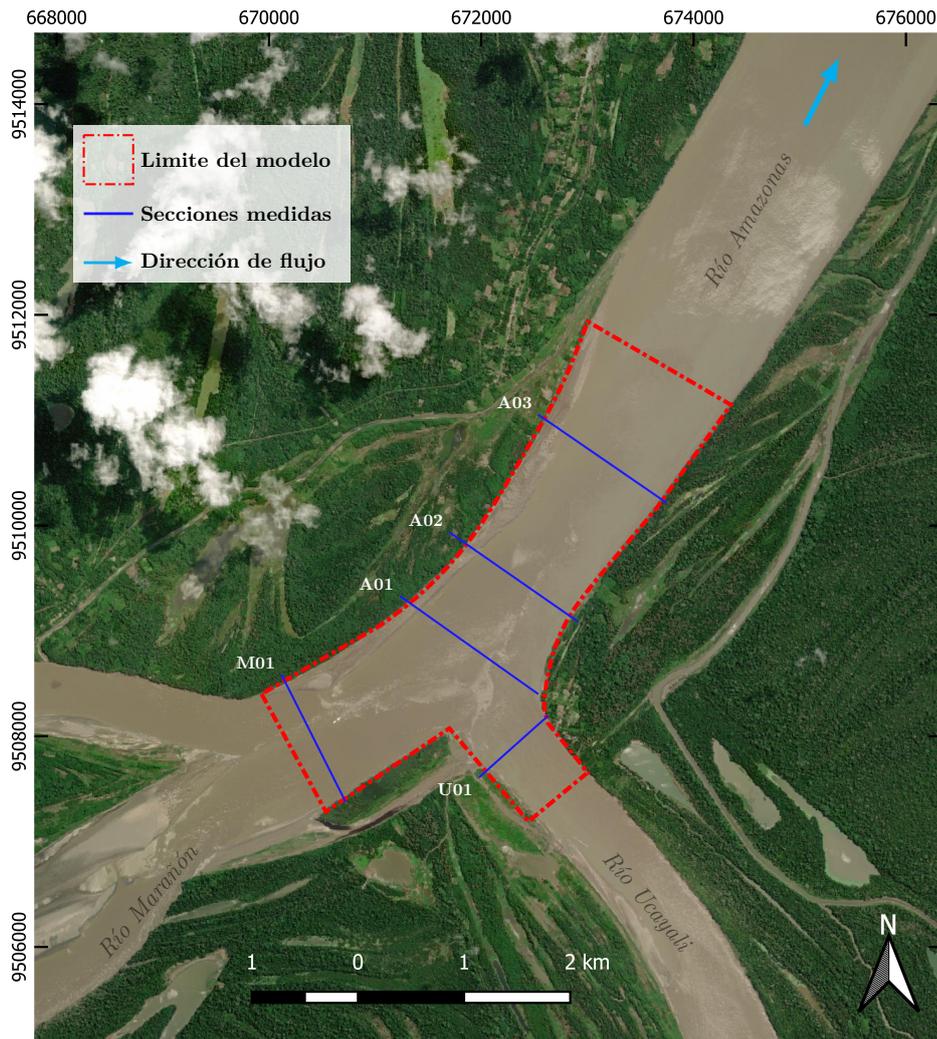


FIGURA N° 4.3: Limite del modelo numérico tridimensional. Elaboración propia

```

5
6 data=data [['Xnew', 'Ynew', 'Z_lit_vrai']]
7 data.columns=['x', 'y', 'z']
8
9 #Latitud y longitud relativa
10 data['x_shifted']=data.x-data.x.min()
11 data['y_shifted']=data.y-data.y.min()
12 data.z.min()
13 #Imprimir la latitud y longitud mínima
14 print('La latitud mínima es: %s' %data.x.min())
15 print('La longitud mínima es: %s' %data.y.min())
16
17 #Exportar las coordenadas relativas en un formato "xyz" para el
    Meshlab
18 data.to_csv('BathyTopo.xyz', sep=' ', header=False, index=False, columns=[

```

```
'x_shifted', 'y_shifted', 'z']])
```

Código N° 4.1: Generación del archivo de batimetría en formato "xyz" para el Meshlab

4.2.4.2 Creación de la batimetría en formato STL

Con la creación del archivo de batimetría en formato "xyz", podemos visualizar los puntos de la batimetría como se muestra en la Figura N° 4.4 donde los puntos son leídos mediante el software libre "CloudCompare" (software de edición y procesamiento de nubes de puntos). Estos puntos serán cargados al software libre "MeshLab" (software de procesamiento y edición de mallas triangulares no estructuradas en 3D), para su tratamiento y posterior generación del archivo de batimetría en formato STL.

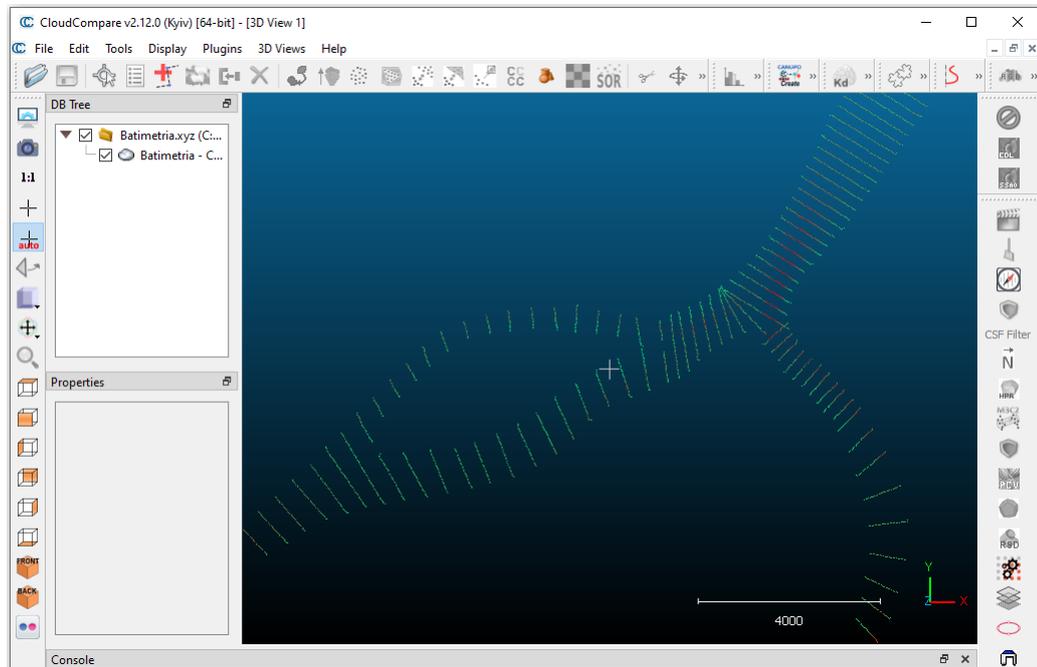


FIGURA N° 4.4: Nube de puntos de la batimetría. Elaboración propia

El procedimiento sugerido dentro del programa MeshLab, importar la nube de puntos al programa. El paso siguiente es calcular las normales del conjunto de puntos, las que se utilizan para la creación de la triangulación. El paso final es la reconstrucción de la superficie mediante el método de "Poisson Proyectado", este algoritmo de reconstrucción de superficie crea superficies estancadas a partir de un conjunto de puntos orientados (Kazhdan & Hoppe, 2013). Finalmente, obtenemos el archivo de batimetría en formato STL (Figura N° 4.5).

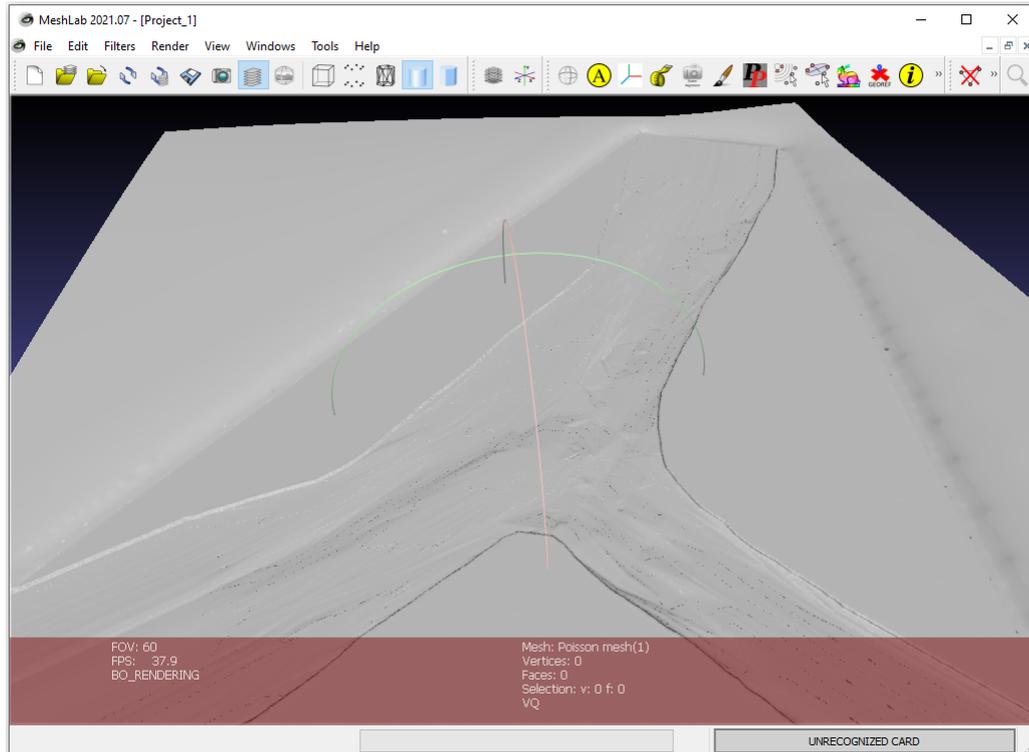


FIGURA N° 4.5: Batimetría en formato STL. Elaboración propia

4.2.4.3 Creación de las condiciones de borde en formato STL

La creación del archivo de condiciones de borde es uno de los pasos importantes para la generación de la malla del modelo numérico, las condiciones de borde son los límites que definen el ingreso y salida del flujo dentro del modelo de la confluencia. Mediante el Código N° 4.2 programado en Python se creará estas condiciones de borde para el modelo de confluencia. Existen dos condiciones de ingreso aguas arriba para cada río que tendrán como nombre Marañón y Ucayali respectivamente y la condición de borde aguas abajo tendrá por nombre Amazonas.

```

1 import numpy as np
2 from stl import mesh
3
4 #Cota inferior de la condición de borde
5 zBottom=50
6
7 #Cota superior de la condición de borde
8 zTop=100
9
10 #Función para crear y exportar los archivos STL
11 def buildStl(faces , vertices , fileName):
12     cube = mesh.Mesh(np.zeros(faces.shape[0], dtype=mesh.Mesh.dtype))
13     for i, f in enumerate(faces):
14         for j in range(3):

```

```

15         cube.vectors[i][j] = vertices[f[j],:]
16
17     # Escribir y guardar los archivos STL
18     cube.save('%s.stl' %fileName)
19
20     """
21     Crear el archivo de condición de borde aguas arriba para el río Ucayali
22     """
23     #Definir los 4 vértices que forman el archivo STL
24     verticesUcayali = np.array([\
25
26         [672957.85, 9506792.2, zBottom],
27         [673416.49, 9507280.4, zBottom],
28         [673416.49, 9507280.4, zTop],
29         [672957.85, 9506792.2, zTop]])
30
31     #Define los dos triángulos en el archivo STL.
32     facesUcayali = np.array([[0,1,2],[0,2,3]])
33
34     # Crea y guarda el archivo STL de la condición de borde del río Ucayali
35     buildStl(facesUcayali,verticesUcayali,'ucayaliBoundary')
36
37     """
38     Crear el archivo de condición de borde aguas arriba para el río Marañón
39     """
40     #Definir los 4 vértices que forman el archivo STL
41     verticesMaranon = np.array([\
42
43         [669586.86, 9508260.7, zBottom],
44         [670045.65, 9507148, zBottom],
45         [670045.65, 9507148, zTop],
46         [669586.86, 9508260.7, zTop]])
47
48     facesMaranon = np.array([[0,1,2],[0,2,3]])
49     buildStl(facesMaranon,verticesMaranon,'maranonBoundary')
50
51     """
52     Crear el archivo de condición de borde aguas abajo para el río Amazonas
53     """
54     # Define the 8 vertices of the cube
55     verticesAmazonas = np.array([\
56
57         [673060.36, 9511732.2, zBottom],
58         [674319.37, 9511155.8, zBottom],
59         [674319.37, 9511155.8, zTop],
60         [673060.36, 9511732.2, zTop]]
61
62     )
63     facesAmazonas = np.array([[1,0,2],[0,3,2]])
64     buildStl(facesAmazonas,verticesAmazonas,'AmazonasBoundary')
```

Código N° 4.2: Generación del archivo de condiciones de borde en formato STL

Las condiciones de borde tienen los límites definidos en la Figura N° 4.3, donde se muestra las ubicaciones de la condición de borde de ingreso de cada río y la condición de borde de salida aguas abajo. Mediante el Código N° 4.2 se realizará la creación de los archivos en formato STL de las condiciones de borde para cada ingreso y la salida dentro del modelo. Se debe tener en consideración de que el límite inferior del archivo de la condición de borde, tendrá una cota más baja que el límite mínimo de la cota del terreno en dicha sección. Finalmente, se tendrá los límites de la condición de borde como se muestra en la Figura N° 4.6 que representa la condición de borde del río Ucayali.

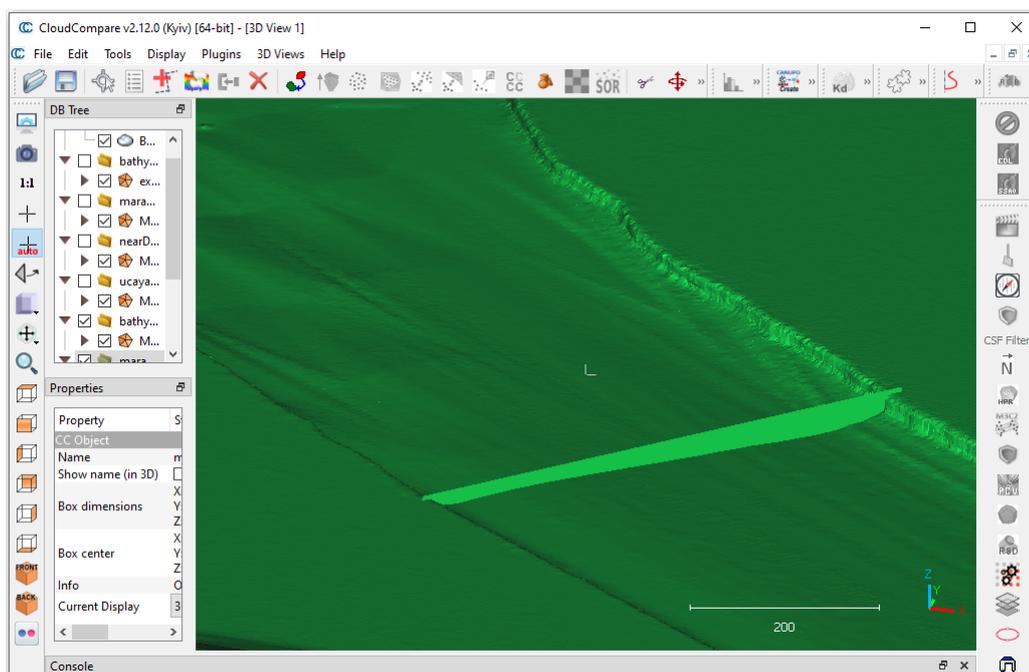


FIGURA N° 4.6: Condición de borde del río Ucayali. Elaboración propia

4.2.4.4 Creación de la malla base

La malla base representa todo el volumen interno del modelo numérico. Posteriormente se refinarán las celdas cercanas a la pared para tener una mejor resolución y se genere una solución numéricamente correcta en dicha zona. La creación de la malla base se realiza mediante la aplicación blockMesh de OpenFOAM. Con la que se crea una malla estructurada con celdas de forma hexaédrica.

La malla se genera a partir de un archivo de diccionario llamado “blockMeshDict” (donde se presenta el código con las indicaciones para crear la malla), ubicado en la carpeta “Constant/polyMesh”. La ubicación de los directorios del caso del modelo será explicada más adelante. La función de blockMesh es descomponer la geometría del dominio del modelo en un conjunto de bloques hexaédricos tridi-

mensionales.

La malla se especifica como una cantidad de bloques en cada dirección del bloque, o en caso contrario se puede programar para definir el tamaño de cada celda en cada dirección del dominio de la malla. Siendo esta la información necesaria para generar los datos de la malla, cada bloque de la malla está definido por 8 vértices, uno en cada esquina de un hexaedro. La malla base generada por el blockMesh se muestra en la Figura N° 4.7. Para mayor información del código revisar el ANEXO A.

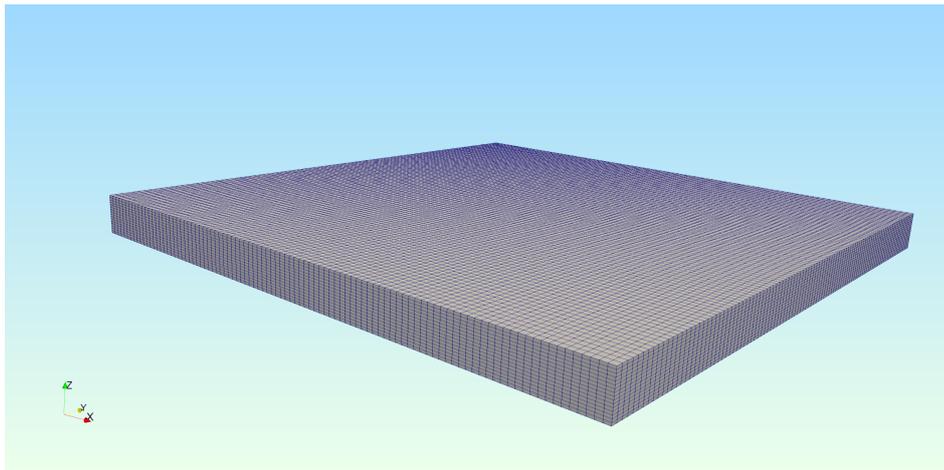


FIGURA N° 4.7: Malla base generada mediante el blockMesh. Elaboración propia

4.2.4.5 Creación de la malla final del modelo

La creación de la malla final para el modelo de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, se realiza mediante la aplicación snappyHexMesh que forma parte de las librerías de OpenFOAM. Mediante esta aplicación se refinará los bordes del modelo para obtener solo la malla interna de la confluencia fluvial. El principio detrás de snappyHexMesh es obtener la malla interna del modelo, mediante la delimitación de la geometría del modelo a través de los archivos STL que definen la batimetría y las condiciones de ingreso y salida de flujo (Figura N° 4.8).

El refinamiento del modelo se realizará en la malla base creada previamente con el blockMesh. Se obtendrá un refinado especial en el fondo de lecho para obtener una malla de acuerdo a la batimetría medida en campo. La malla se adapta aproximadamente a la superficie, refinando de manera iterativa la malla inicial y transformando la malla hexagonal dividida de acuerdo a la superficie. La especificación del nivel de refinamiento de la malla es muy flexible, pudiendo generar una buena calidad de malla para la simulación.

La creación de la malla base mediante el blockMesh, y el refinamiento de las pare-

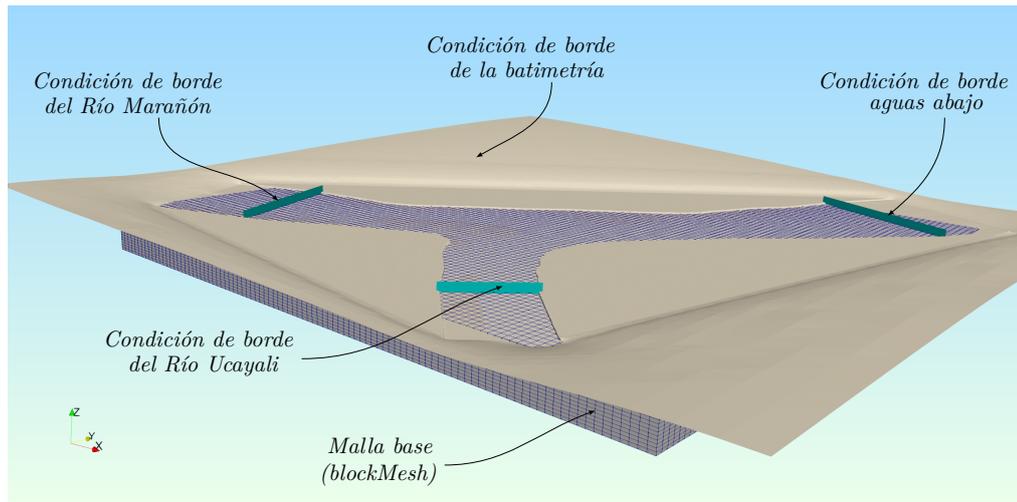


FIGURA N° 4.8: Límites de refinamiento mediante el snappyHexMesh. Elaboración propia

des del modelo mediante el snappyHexMesh fueron realizadas con la cluster Khipu de UTEC que está dedicada a la computación de alto rendimiento (HPC). La malla base está compuesta por un tamaño de celda de 2.5 m, lo cual originó aproximadamente, 50 millones de celdas para la malla base.

En el caso del refinamiento del fondo del lecho el tamaño de la celda dependerá del modelo de turbulencia a utilizar. Para la presente tesis se utiliza un modelo LES y cuál utilizará funciones de pared cercana a al fondo de lecho. Y las celdas cercanas a la pared deben tener un tamaño como mínimo de la altura de rugosidad equivalente de grano k_s visto en el subcapítulo 4.2.3. El valor de k_s se encuentra entre 0.17 m y 0.32 m, por lo que se tomó un valor de celda mínima de 0.20 m cercano a la pared (Figura N° 4.9).

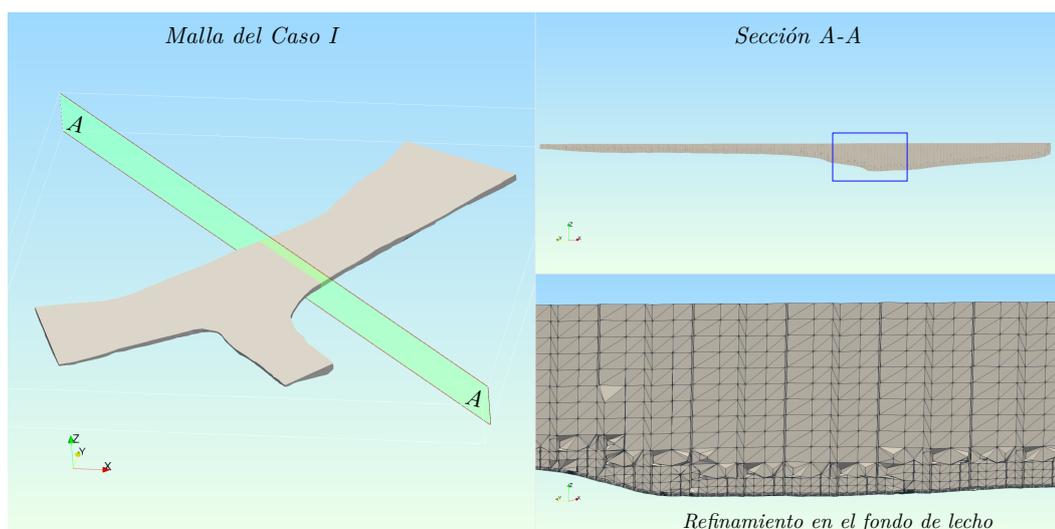


FIGURA N° 4.9: Malla final del Caso I. Elaboración propia

El funcionamiento de snappyHexMesh se realiza mediante el archivo de control llamado "snappyHexMeshDict" (donde se presentan las instrucciones del refinamiento cercano a las paredes), este archivo necesita de los archivos STL creados para delimitar el mallado. Los archivos de superficie en formato STL se ubican dentro de la carpeta "constant/triSurface". El archivo "snappyHexMeshDict" se encuentra ubicado en la carpeta "system" del caso a simular, para mayor información del código se recomienda revisar el ANEXO A.

Las mallas generadas para los dos casos de estudio son distintas debido a la diferencia de información de batimetría y nivel de agua. No obstante, en ambas mallas debe de cumplirse que el refinamiento en el fondo de lecho, cercano a la pared del fondo de lecho, debe tener un tamaño mínimo de celda de 0.20 m . En ambos casos se puede observar visualmente el refinamiento en el fondo de lecho como se muestra en la Figura N° 4.9 y la Figura N° 4.10.

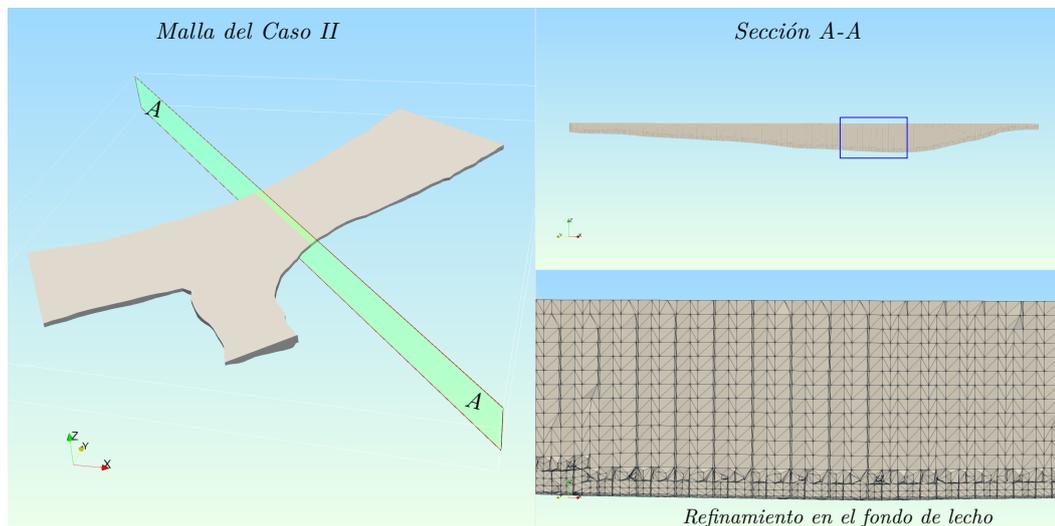


FIGURA N° 4.10: Malla final del Caso II. Elaboración propia

4.2.5 Calidad de Malla

En mecánica de fluidos computacional (CFD) es muy importante contar con una geometría adecuada y una buena calidad de malla. La simulación dependerá en un alto porcentaje de la calidad de la malla. La confiabilidad de los resultados del modelo depende en gran medida del tipo de malla utilizado. Por lo señalado anteriormente se debe realizar un análisis de calidad de malla para asegurar la convergencia numérica dentro del modelo.

Para la verificación de la calidad de malla construida mediante el blockMesh y el snappyHexMesh, es realizado mediante la aplicación checkMesh perteneciente al OpenFOAM. Mediante checkMesh se ejecuta un análisis de todos los elementos

que componen la malla generada y se muestra como resultados los indicadores generales de la malla. OpenFOAM presta especial atención a 3 parámetros centrales y evalúa sus valores dentro del límite permitido. Los parámetros principales de evaluación son los siguientes:

- **Relación de aspecto:** Representa la relación del lado de la celda de mayor tamaño entre el lado de la celda de menor tamaño. El valor ideal de este parámetro sería igual 1, las celdas con una relación de aspecto alto suelen aparecer debido a la construcción de capas límites muy finas. No obstante, un valor alto de este parámetro no genera inestabilidad en el modelo, pero sí puede disminuir significativamente la velocidad de convergencia.
- **Oblicuidad:** Representa la distancia entre la intersección de la línea que conecta dos centros de celdas con su cara en común y el centro de esa misma cara. El valor máximo admisible dentro del OpenFOAM es de 4 para acreditar una buena calidad de malla.
- **Ortogonalidad:** Representa el ángulo generado entre la línea que conecta los centros de dos celdas y el vector normal a la cara en común de estas dos celdas. El valor máximo de este parámetro dentro del OpenFOAM es de 70 para acreditar una buena calidad de malla.

La Tabla N° 4.1 muestra los resultados de la calidad de malla para los dos casos de simulación, además se muestra la cantidad de celdas generadas contando con aproximadamente 23 millones de celdas para el Caso I y 27 millones para el Caso II. Se puede observar también que los valores obtenidos de los parámetros de calidad de malla están dentro de lo permitido por OpenFOAM, cumpliendo una buena calidad de malla para los dos casos de simulación, para mayor información del código revisar el ANEXO B.

TABLA N° 4.1: Parámetros de calidad de malla

Calidad de Malla				
Malla	Número de celdas	Relación de aspecto	Oblicuidad	Ortogonalidad
Caso I	23090584	24.67	3.45	64.81
Caso II	27027863	30.07	3.45	64.68

4.2.6 Implementación del caso de simulación

La implementación del caso de simulación de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, fue mediante el OpenFOAM versión 2112. La continuidad instantánea

e incompresible y las ecuaciones de Navier Stokes se resuelven utilizando un enfoque de simulación de grandes remolinos (LES), con el solucionador multifásico twoLiquidMixingFoam. Mediante este solucionador se puede estudiar la mezcla de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, manteniendo las propiedades físicas de cada afluente.

Mediante el modelo de turbulencias LES, el proceso de filtrado espacial que da como resultados términos de tensión de subgrilla en las ecuaciones de momento, para las cuales se utiliza el modelo de subgrilla de Smagorinsky como cierre (Smagorinsky, 1963). En las regiones cercanas a las paredes se aplica la función de amortiguación estándar de Van Driest (Van Driest, 1956).

El modelo de simulación se construye mediante una serie de carpetas que definen la información de las condiciones borde, condiciones iniciales, información de malla, parámetros físicos, esquemas de discretización y algoritmos de solución. La Figura N° 4.11 muestra las carpetas, subcarpetas y archivos que forman parte del modelo.

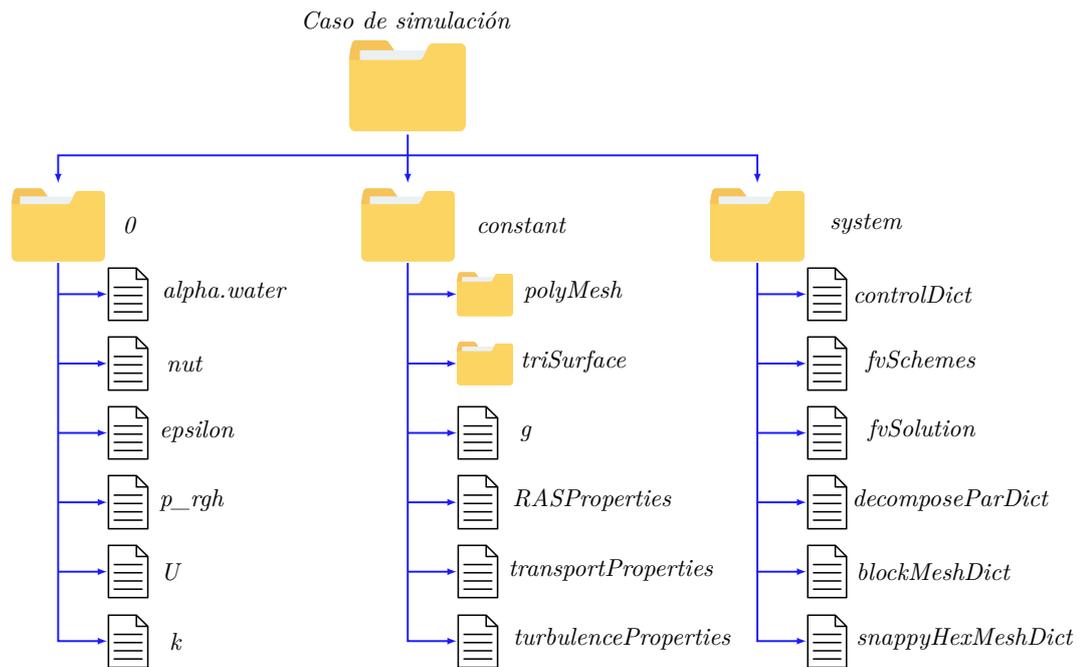


FIGURA N° 4.11: Estructura del caso de simulación en OpenFOAM. Elaboración propia

El caso de simulación está estructurado por tres carpetas principales, la carpeta “0”, carpeta “constant” y la carpeta “system” como se muestra en la Figura N° 4.11. La información se distribuye en cada carpeta de la siguiente manera:

- Carpeta 0: Esta carpeta contiene los archivos que definen las condiciones iniciales y de borde para todas las variables básicas de simulación. Estas

variables depende del caso de simulación y del modelo de turbulencia utilizado.

- Carpeta constant: Dentro de esta carpeta se encuentra los archivos que definen las propiedades físicas del fluido, la dirección de la gravedad y el modelo de turbulencia utilizado dentro del modelo. Además, esta carpeta contiene la carpeta “triSurface”, donde se encuentra los archivos de superficie en formato STL para la creación de la malla del modelo, donde posteriormente será guardada en la carpeta “polyMesh”.
- Carpeta system: Esta carpeta contiene los archivos de instrucciones generales de la ejecución de la simulación. Asimismo, contiene las instrucciones de los esquemas de discretización utilizada para los diferentes términos de las ecuaciones y las instrucciones de solución para cada sistema de ecuaciones lineales discretizadas.

4.2.6.1 Condiciones de borde

Previamente a la definición de las condiciones de borde, se debe definir los límites de la malla. Un límite (boundary) generalmente se divide en un conjunto de parches. Un parche (patch) puede incluir uno o más áreas cerradas de la superficie de límite que no necesariamente se encuentran conectadas de manera física. Los patches indican los límites de ingreso de flujo, salida de flujo, límites de paredes y el límite libre del agua como se muestra en la Figura N° 4.12.

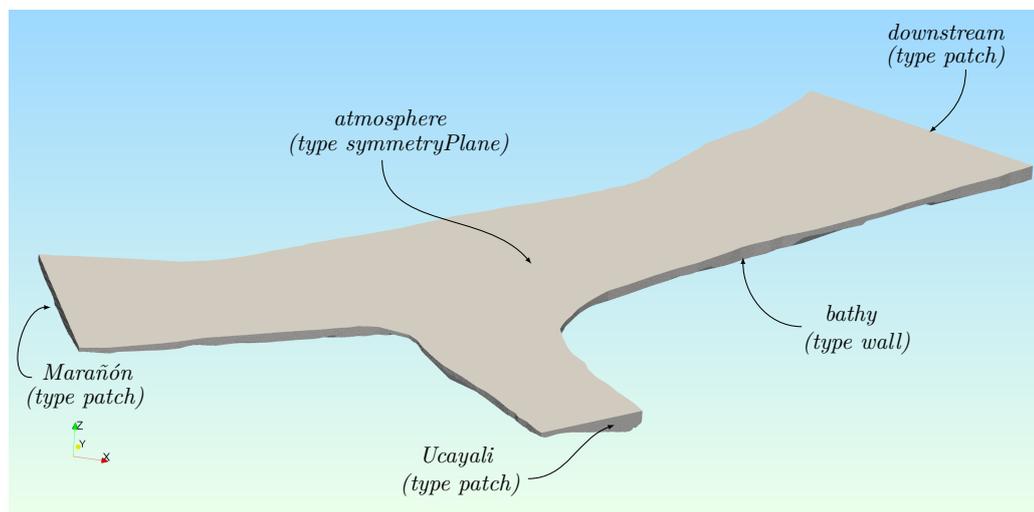


FIGURA N° 4.12: Límites del modelo. Elaboración propia

Los tipos de parches se especifican en los archivos de la malla del modelo, y su tipo se especifica bajo la palabra clave “type” para cada parche en el archivo “boundary”, este archivo se encuentra ubicado en la carpeta “polyMesh” dentro de la carpeta

“constant” (Figura N° 4.11). Los tipos de los límites dentro de modelo se muestran en la Figura N° 4.12, cada tipo se detalla a continuación:

- patch: Es un tipo genérico de parche que contiene la información geométrica o topológica sobre la malla, se utiliza para entradas o salidas de flujo.
- symmetryPlane: Es un parche plano que representa un plano de simetría, utilizado para determinar el nivel libre de flujo dentro del modelo.
- wall: Representa un parche que coincide con una pared sólida, requerido para representar la batimetría dentro del modelo y poder utilizar la función de pared para el modelado de la turbulencia.

Una vez definidos los límites dentro de la malla se procederá a definir las condiciones de borde. Estos se especifican dentro de la carpeta “0” en los archivos de campos principales utilizados en la simulación de la confluencia fluvial, los cuales son “U”, “k”, “nut”, “p_rgh” y “alpha.water”. La Tabla N° 4.2 muestra las condiciones de borde en cada variable.

TABLA N° 4.2: Condiciones de borde

Tipos de condición de borde				
Campo	Marañón Ucayali	atmosphere	bathy	downstream
alpha.water	fixedValue	symmetryPlane	zeroGradient	zeroGradient
nut	calculated	symmetryPlane	nutkRoughWallFunction	calculated
p_rgh	fixedFluxPressure	symmetryPlane	fixedFluxPressure	zeroGradient
U	flowRateInletVelocity	symmetryPlane	fixedValue	inletOutlet
k	fixedValue	symmetryPlane	kqRWallFunction	inletOutlet

Dentro del modelo numérico tridimensional de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, tenemos cinco campos, los cuales serán explicadas a continuación:

- alpha.water: Este archivo contiene todas las fracciones de volumen de las fases definidas dentro del modelo, en el caso de la simulación de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, se tiene dos fases de fluido, cada uno de ellos representa el fluido de cada afluente respectivamente.
- nut: Este campo representa la viscosidad turbulenta, está relacionado con el modelo de turbulencia utilizado.
- p_rgh: Este campo escalar contiene el valor del campo de presiones estática menos la componente hidrostática.

- U: Este archivo contiene las condiciones iniciales y de contorno para el campo vectorial de velocidad, donde se definen el caudal de ingreso dentro del modelo.
- k: Este escalar representa la energía cinética turbulenta, está relacionada con el modelo de turbulencia utilizada.

A continuación se definirá las condiciones de borde utilizadas en la Tabla N° 4.2, los cuales son:

- fixedValue: Representa una condición de borde donde se especifica un solo valor, siendo la clase base para otras condiciones de borde.
- symmetryPlan: Esta condición de borde impone una restricción de un plano de simetría.
- zeroGradient: Esta condición de borde extrapola la cantidad del valor de la celda más cercano hacia el patch. El significado es que la cantidad se desarrolla en el espacio y su gradiente es igual a cero en la dirección perpendicular al patch.
- calculated: Esta condición de borde es calculada en función de otros campos del patch. Ejemplo, cuando “nut” es calculada usando los campos “k” y “epsilon” mediante la ecuación $nut = C \cdot \frac{k^2}{epsilon}$
- nutkRoughWallFunction: Esta condición de borde proporciona una restricción de pared en la viscosidad turbulenta “nut”, cuando se utilizan funciones de pared para paredes rugosas, en función de la energía cinética turbulenta “k”.
- fixedFluxPressure: Esta condición de borde establece el gradiente de presión al valor proporcionado, de modo que el flujo en el borde sea el especificado por la condición de borde de velocidad.
- flowRateInletVelocity: Esta condición de borde de entrada de velocidad, mediante la corrección de la velocidad extrapolada o mediante un campo de velocidad uniforme y normal al patch puede ser ajustado para coincidir con un caudal especificado.
- inletOutlet: Esta condición de borde proporciona una condición de flujo de salida genérica, con un flujo de entrada específico para el caso en que el flujo retorne.
- kqRWallFunction: Esta condición de borde es utilizada en la energía cinética turbulenta “k”, para los casos de flujo con número de Reynolds alto, que utiliza funciones de pared.

4.2.6.2 Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales utilizadas para la simulación de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali son datos tomados en campo, los cuales fueron explicados en el Capítulo III. Se presentarán las dos condiciones iniciales para los dos casos de simulación, para la condición de ingreso en cada afluente se presentarán los caudales respectivos de cada temporada de medición (temporada de vaciante y creciente) como se muestra en la Tabla N° 4.3 y la Tabla N° 4.4. El nivel de agua en los ingresos se asume un nivel fijo en ambos casos también medido para cada temporada de medición. Estas condiciones iniciales son configuradas en los archivos de campos de estudio dentro de la carpeta “0”.

TABLA N° 4.3: Condiciones iniciales para el modelo numérico del Caso I

Condiciones iniciales del Caso I					
Campo	Marañón	Ucayali	atmosphere	bathy	downstream
alpha.water	1	0	-	-	-
nut (m^2/s)	0	0	-	-	0
p_rgh (Pa)	0	0	-	0	-
U (m^3/s)	11967	5366	-	-	-
k (m^2/s^2)	0.01815	0.01815	-	0.01815	0.01815

TABLA N° 4.4: Condiciones iniciales para el modelo numérico del Caso II

Condiciones iniciales del Caso II					
Campo	Marañón	Ucayali	atmosphere	bathy	downstream
alpha.water	1	0	-	-	-
nut (m^2/s)	0	0	-	-	0
p_rgh (Pa)	0	0	-	0	-
U (m^3/s)	16655	16163	-	-	-
k (m^2/s^2)	0.01815	0.01815	-	0.01815	0.01815

La unidad del campo “U” en las Tabla N° 4.3 y la Tabla N° 4.4, tiene unidad de caudal (m^3/s) debido a que en el ingreso se utilizan una función de ingreso de caudal, no obstante el archivo principal dentro de OpenFOAM el campo “U” tiene unidades de velocidad (m/s). Mientras que el campo “alpha.water” tiene por condiciones iniciales al tipo de fase de ingreso dentro de las condiciones de borde, la fase “1” representa las características físicas del agua en el río Marañón, y la fase “0” repre-

senta las características físicas del agua en el río Ucayali.

4.2.6.3 Parámetros físicos y el modelo de turbulencia

La definición de los parámetros físicos y el modelo de turbulencia se realizan dentro de la carpeta “constant”, mediante los siguientes archivos:

- **transportProperties:** Este archivo se especifica las propiedades del transporte del fluido, donde se define la fase (“1” o “0”) del fluido entrante para cada río afluente. Se define el tipo de fluido para el caso del agua como un fluido newtoniano, se configura el valor de la viscosidad cinemática, su densidad y el valor de la tensión superficial del fluido.
- **turbulenceProperties:** Este archivo controla el modelo de turbulencia utilizada dentro del modelo numérico, para el modelo de numérico de la confluencia se utiliza el modelo LES.
- **g:** Este archivo contiene el valor de la gravedad, la cual está expresada de manera vectorial. Se debe tener especial cuidado en la ubicación de su eje de acuerdo a la malla generada.

4.2.6.4 Esquemas numéricos

Los esquemas numéricos utilizados dentro del modelo son definidos en el archivo “fvSchemes”, dentro de la carpeta “system”. Este archivo asigna un esquema numérico a los términos derivativos de las ecuaciones a resolver, para producir un sistema de ecuaciones algebraicas que serán resueltas mediante una ecuación matricial. Los esquemas numéricos se pueden clasificar de acuerdo a su orden de aproximación, siendo los de mayor orden más exacto pero menos estable en comparación con los de primer orden. Los términos para los cuales se debe especificar esquemas numéricos son los siguientes:

- **ddtSchemes:** Representa la deriva temporal de primer y segundo orden.
- **gradSchemes:** Representa el operador gradiente ∇
- **divSchemes:** Representa el operador divergencia $\nabla \cdot$
- **laplacianSchemes:** Representa el operador laplaciano ∇^2
- **interpolationSchemes:** Representa valores de interpolación de una celda a una superficie.
- **snGradSchemes:** Representa la componente de un gradiente que es normal a la cara de una celda.

- wallDist: Cálculo de la distancia de los centros de la celda a la pared, cuando sea necesario.

4.2.6.5 Control de soluciones y algoritmos

Los solucionadores de ecuaciones, algoritmos y tolerancias se controlan desde el archivo "fvSolution" ubicado en la carpeta "system". La elección del solucionador depende de la clasificación temporal del flujo, y la mayoría de algoritmos utilizados dentro de OpenFOAM son PISO (presión implícita con división del operador) y SIMPLE (método semi-implícito para ecuaciones ligadas a presión). Estos algoritmos son procedimientos iterativos para resolver ecuaciones de velocidad y presión, PISO fue propuesto por Issa (1986) para problemas de flujo transitorio, y SIMPLE para flujo estacionario.

Ambos algoritmos se basan en evaluar las soluciones iniciales y luego corregirlas. SIMPLE solo realiza 1 corrección, mientras que PISO requiere más de 1, pero no más de 4. Por lo consiguiente, el usuario debe especificar el número de correctores en el diccionario PISO mediante la palabra clave "nCorrectors". Una corrección adicional para tener en cuenta la no ortogonalidad de la malla está disponible en PISO y SIMPLE mediante la palabra clave "nNonOrthogonalCorrectors". Estos algoritmos PISO y SIMPLE se pueden combinar en un algoritmo conocido como PIMPLE, para simulaciones transitorias, la precisión temporal se puede mantener en un $Co > 1$ más alto usando un esquema de tiempo de segundo orden combinado con iteraciones del bucle PIMPLE.

4.2.6.6 Configuración del control de simulación

En modelos numéricos tridimensionales es de suma importancia el tiempo de simulación, en caso de modelo numérico con flujo en estado estacionario la solución es obtenida mediante iteraciones sucesivas. En cambio, cuando el flujo se encuentra en estado transitorio (inestable), es fundamental definir correctamente la extensión temporal de la simulación. Para determinar la convergencia de flujo, se deberá alcanzar un estado cuasi periódico de los campos medio de flujo.

El tiempo de simulación comprende dos periodos, el tiempo de convergencia de los campos internos del modelo y el tiempo de obtención de los resultados finales del modelo. Para converger el modelo numérico, el tamaño del paso de tiempo debe ser seleccionado cuidadosamente, de lo contrario la simulación podría conducir a resultados no físicos o divergir por completo.

Para determinar el paso de tiempo en la simulación se deberá tener en cuenta el número de Courant, que está definido de la siguiente manera:

$$Co = \frac{U\Delta t}{\Delta x} \quad (4.12)$$

Donde U representa la velocidad en la celda, Δt representa el paso de tiempo y Δx representa el tamaño de la celda menor. Dentro de los modelos numéricos es muy utilizado la condición de Courant Friedrichs Lewy (CFL), que el número de Courant debe ser igual o menor que 1 (Courant et al., 1928), de lo contrario la viscosidad numérica sería negativa.

La condición CFL implica que el paso de tiempo podría llegar muy pequeño cuando las celdas sean pequeñas, lo que llevaría a simulaciones muy largas y con un alto costo computacional. En especial, en celdas muy pequeñas y con una asimetría muy alta pueden crear pasos de tiempo muy pequeños.

El modelo numérico del Caso I, donde la velocidad promedio en la zona de la confluencia es de $1m/s$ y el tamaño de la celda más pequeña es $0.2m$, por lo tanto, el paso de tiempo es:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{U} = \frac{0.2}{1} = 0.2s \quad (4.13)$$

El modelo numérico del Caso II, donde la velocidad promedio en la zona de la confluencia es de $1.5m/s$ y el tamaño de la celda más pequeña es $0.2m$, por lo tanto, el paso de tiempo es:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{U} = \frac{0.2}{1.5} = 0.13s \quad (4.14)$$

Los valores del paso de tiempo calculados en las ecuaciones 4.13 y 4.14 son asignados mediante el archivo "controlDict", ubicado en la carpeta "system". Algunos parámetros a configurar dentro del archivo "controlDict" son los siguientes:

- application: Define la aplicación a utilizar dentro del modelo numérico, para la presente investigación es "twoLiquidMixingFoam".
- startTime: Define el tiempo de inicio de simulación, en la mayoría de los casos inicia desde tiempo "0".
- endTime : Define el tiempo final de simulación.
- deltaT: Define el paso de tiempo.
- writeInterval: Define el tiempo de impresión de los archivos de solución dentro de la simulación.
- maxCo: Define el máximo número de Courant a utilizar dentro de la simulación.

- maxAlphaCo: Define el máximo número de Courant en la interfaz de las fases de fluido existentes en la simulación.
- maxDeltaT: Define el paso de tiempo máximo permitido en una simulación transitoria.

4.3 PROCESAMIENTO

La parte del procesamiento del modelo numérico tridimensional comprende el inicio del periodo de simulación, la supervisión de la simulación y el rastreo de los residuales en cada paso de tiempo. En esta etapa se evalúa la convergencia de la simulación mediante los residuales, y se verifica la continuidad del flujo mediante un balance de masa global. También se pueden considerar puntos de monitoreo dentro del modelo.

4.3.1 Requerimiento computacional

Las simulaciones de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali requiere de un alto costo computacional debido al tamaño de la malla de los modelos, los cuales cuentan con más de 23 millones de celdas para el Caso I y 27 millones para el Caso II. A su vez, el modelo de turbulencia utilizada es el modelo LES, lo cual es un modelo más complejo que los modelos RANS y requiere un alto costo computacional para su simulación.

Para llevar a cabo la simulación de la presente tesis se utilizó el clúster KHIPU, dedicado a la computación de alto rendimiento (HPC) y que pertenece a la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC). La computación de alto desempeño permite resolver problemas complejos de la mecánica de fluidos computacional que tardarían semanas, meses, incluso años para resolverse mediante una computadora convencional, pero con el uso del clúster estos problemas podrían reducirse en minutos, horas o días. Las principales características de la cluster KHIPU se presentan en la Tabla N° 4.5.

TABLA N° 4.5: Características de la cluster KHIPU

KHIPU				
Nodos	Cores (@2.1 GHz)	Memoria (GB)	Almacenamiento (GB)	Cantidad
nLider	40	128	40000	1
nCPU	32	128	960	5
nGPU	40	128	480	1
Total	240	896	41440	7

De la Tabla N° 4.5 los nodos “nCPU” y “nGPU”, son dedicadas solo al procesamiento de información. El modelo numérico tridimensional de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali utilizó el nodo de procesamiento “nCPU”, se utilizaron 128 cores con una memoria de procesamiento de 512 GB. El tiempo de simulación de los dos casos de simulación fueron por un periodo de 6 meses.

4.3.2 Inicio de la simulación

El inicio de la simulación del modelo numérico se realiza a través de la partición de modelo OpenFOAM cuenta con la opción de descomponer el modelo y poder correr cada parte en paralelo en procesadores distribuidos. El método de computación paralela utilizada por OpenFOAM es conocido como descomposición del dominio, donde la geometría y los campos asociados son divididos en partes y son asignados a procesadores separados para su solución.

La descomposición de la malla y los campos se realiza mediante la utilidad `decomposePar`. El objetivo es dividir el dominio con el mínimo esfuerzo, pero de tal manera que se garantice una solución con un menor costo computacional. El método de descomposición y el número de subdominios a descomponer el modelo, serán especificados en el archivo “`decomposeParDict`” ubicada en la carpeta “`system`”. El modelo numérico de los Casos de estudio, fueron descompuestos en 128 subdominios. La cantidad de subdominios, será igual a la cantidad disponible de procesadores de cómputo.

El método de descomposición utilizado en los modelos numéricos de los Casos de estudio, fue el método “`scotch`”. Este método no requiere de entrada geométrica por parte del modelador e intenta minimizar el número de límites del procesador. El inicio de la simulación se realiza mediante los siguientes comandos:

```
1      decomposePar
2      mpirun -np 128 twoLiquidMixingFoam -parallel > run.log
```

Código N° 4.3: Comandos para inicializar la simulación

4.3.3 Convergencia numérica

Con el fin de obtener resultados confiables, se deben establecer criterios de convergencia dentro del modelo numérico tridimensional. En modelos RANS, la convergencia numérica suele verificarse con los errores residuales iniciales registrados en cada iteración para cada instante de tiempo de la simulación. No obstante, para modelos LES los residuales iniciales no son un buen indicador de la convergencia, debido a que los modelos LES presentan una inestabilidad de flujo. En lugar de monitorear los residuales iniciales se deben monitorear parámetros que caractericen el flujo, como la continuidad de flujo, energía cinética turbulenta, velocidades

de flujo y cumplir con la condición de Courant Friedrichs Lewy (CFL).

El presente modelo se monitoreó el número Courant, para evaluar sus valores medios y máximos en los dos casos de estudio. En la Figura N° 4.13, se puede observar que los dos modelos cumple con la condición CFL.

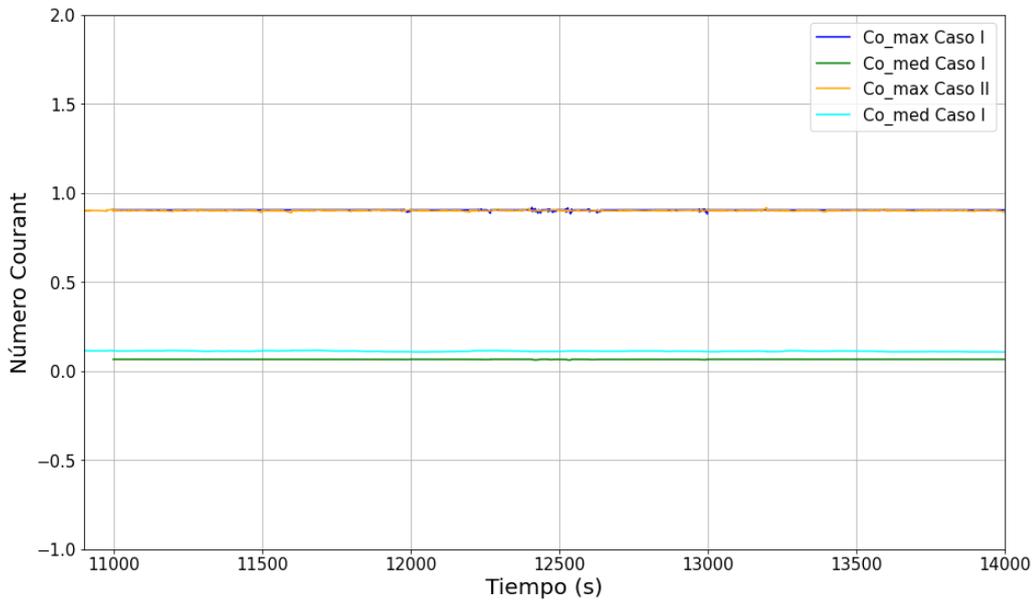


FIGURA N° 4.13: Valores del número de Courant en los casos de estudio. Elaboración propia

Se utilizaron 3 puntos de monitoreo ubicados en la interfaz de mezcla como se muestra en la Figura N° 4.14 y la Figura N° 4.15 y sus coordenadas se presentan en la Tabla N° 4.6, para asegurar la convergencia del modelo mediante el rastreo de la velocidad de flujo y la energía cinética turbulenta dentro de cada caso de simulación. El objetivo es que los valores temporales de “U” y “k” no tengan cambios bruscos en comparación con sus propias fluctuaciones.

TABLA N° 4.6: Coordenadas del los puntos de monitoreo

Puntos de monitoreo						
Puntos	Caso I			Caso II		
	Este	Norte	Nivel	Este	Norte	Nivel
P1	671823	9508390	89	671991	9508700	93
P2	672028	9509060	89	672111	9509000	93
P3	672176	9509460	89	672291	9509380	93

La Figura N° 4.16 muestra el comportamiento de la velocidad en los puntos de monitoreo del Caso I, se puede notar que las fluctuaciones de la velocidad de flujo tiene una tendencia estable y no presenta cambio brusco. De Esta manera se puede asegurar la convergencia numérica dentro del modelo del Caso I.

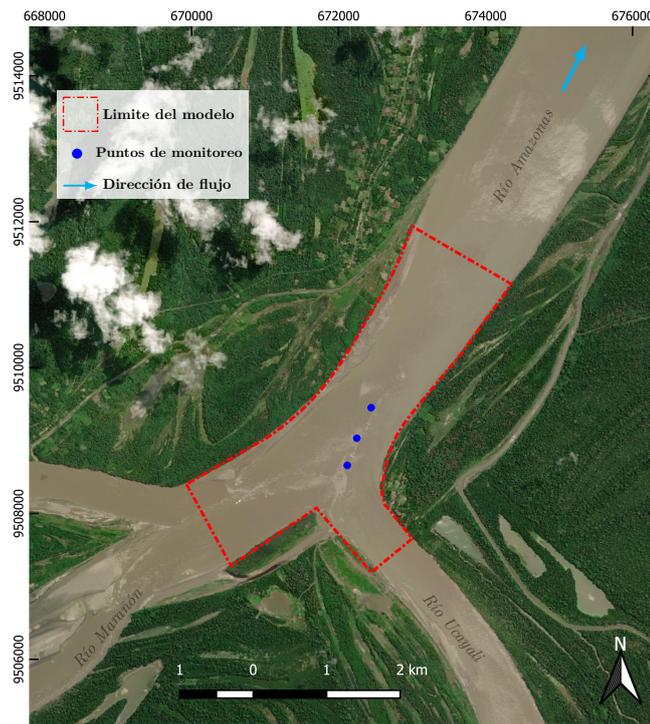


FIGURA N° 4.14: Ubicación de los puntos de monitoreo del Caso I.

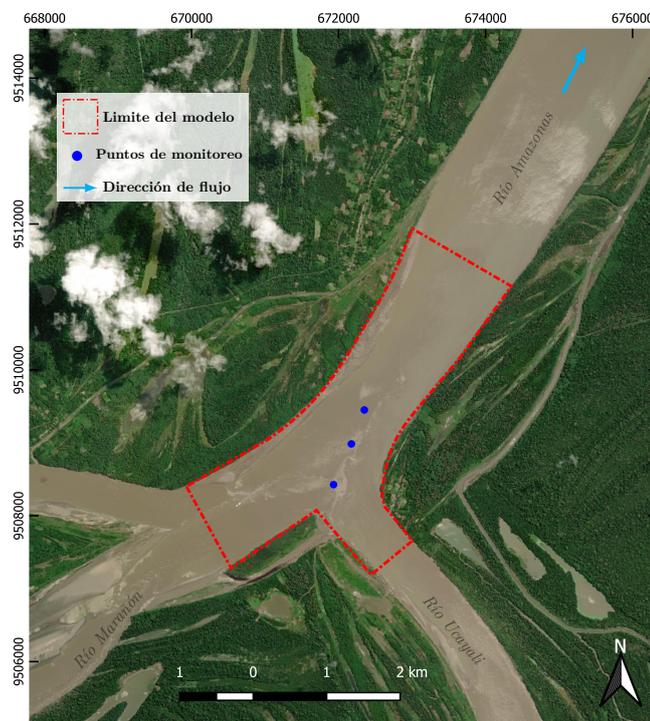


FIGURA N° 4.15: Ubicación de los puntos de monitoreo del Caso II.

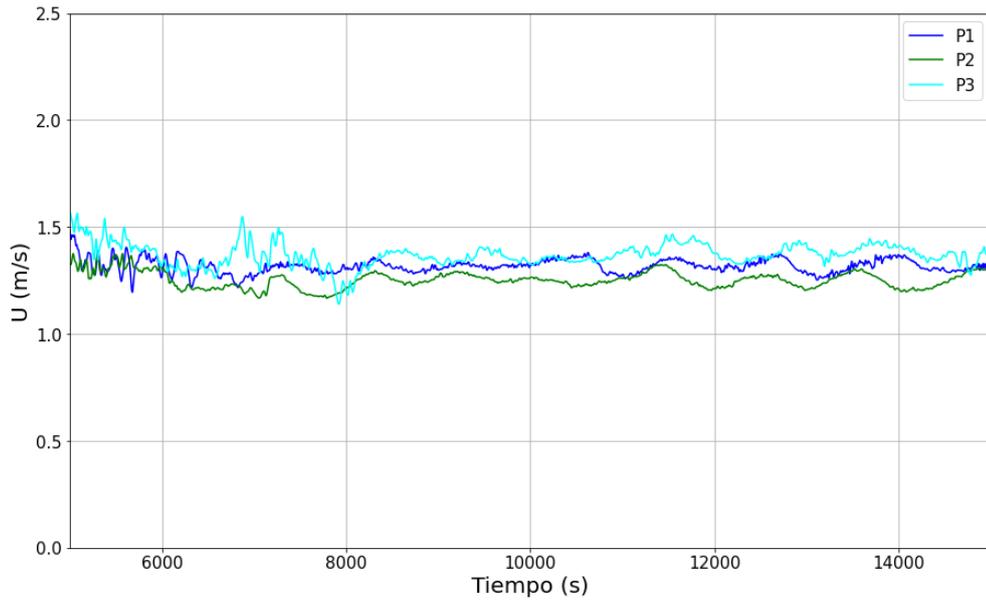


FIGURA N° 4.16: Velocidad en los puntos de monitoreo del Caso I.

La Figura N° 4.17 muestra el comportamiento de la energía cinética turbulenta para los tres puntos de monitoreo del Caso I. Se advierte la tendencia estable del “k” sin cambios bruscos como el caso de la velocidad de flujo.

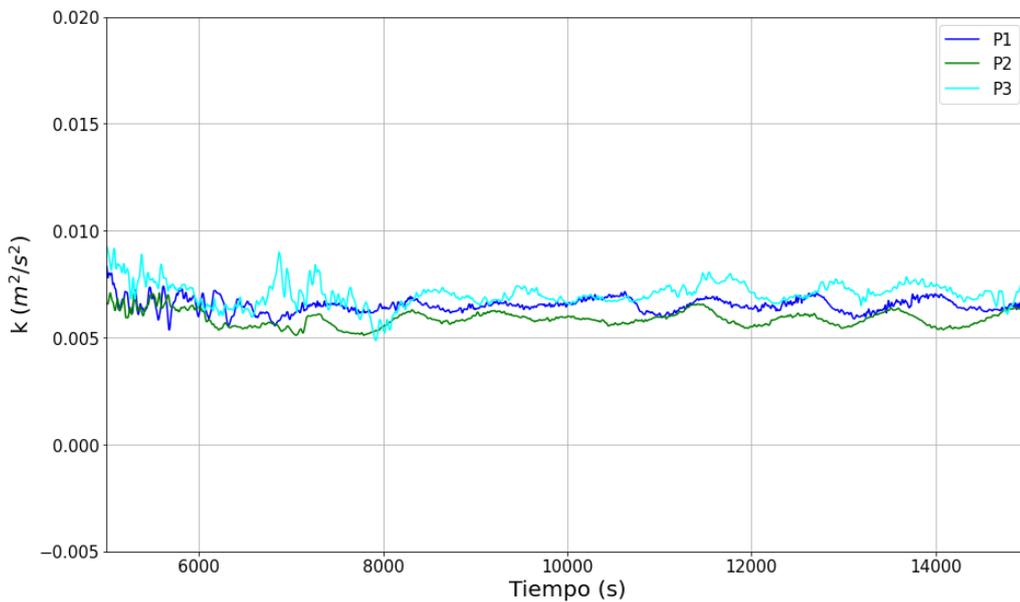


FIGURA N° 4.17: Energía cinética turbulenta en los puntos de monitoreo del Caso I.

La Figura N° 4.18 muestra el comportamiento de la velocidad en los puntos de monitoreo del Caso II. Se puede advertir que las fluctuaciones de la velocidad de flujo son mayores a las del Caso I. El incremento de las fluctuaciones de velocidad, son originados por el aumento de la turbulencia en la zona de la interfaz de mezcla

de los ríos Marañón y Ucayali. A pesar de tener una mayor fluctuación, se puede notar una tendencia continua y sin cambios bruscos en la velocidad, lo cual puede asegurar la convergencia del modelo.

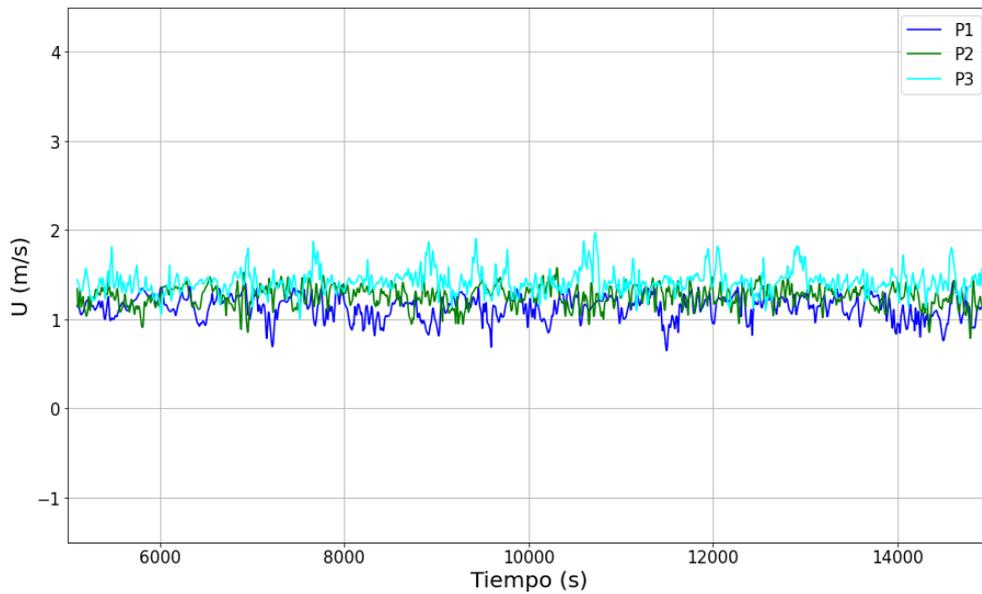


FIGURA N° 4.18: Velocidad en los puntos de monitoreo del Caso II.

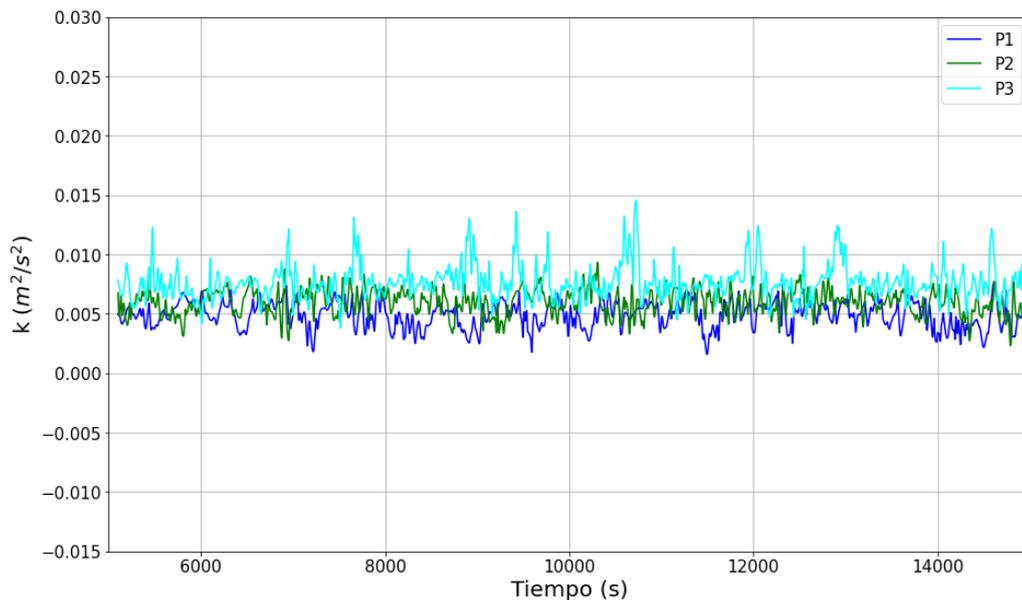


FIGURA N° 4.19: Energía cinética turbulenta en los puntos de monitoreo del Caso II.

La Figura N° 4.17 muestra el comportamiento de la energía cinética turbulenta para los tres puntos de monitoreo del Caso II, se nota la tendencia estable del “k”, sin cambios bruscos como el caso de la velocidad de flujo. En modelo LES las fluctuaciones de los campos “U” y “k” están presentes, porque estos modelos simulan los

grandes remolinos. En la convergencia mediante la continuidad de flujo se debe cumplir que el caudal de ingreso debe ser aproximadamente igual al caudal de salida. Esta condición se cumplió mediante el uso de la tapa rígida en los modelos.

El análisis temporal de los puntos de monitoreo presentados, fueron de 15000 segundos (250 minutos) de simulación para cada caso. Previamente a los 15000 segundos de simulación final, se realizaron simulaciones previas para alcanzar la convergencia y poder obtener las correctas condiciones iniciales para la simulación final. Este procedimiento será explicado en el siguiente capítulo de Calibración y validación del modelo propuesto.

4.4 POSTPROCESAMIENTO

El postproceso es la etapa de procesamiento de los resultados de la simulación, luego de la verificación de la convergencia del modelo los resultados deberán ser evaluados. La validación de resultados es realizada mediante las mediciones en campo mediante mediciones experimentales. La validación del modelo es explicado en el siguiente capítulo. Se toma en consideración las herramientas utilizadas para procesar la información necesaria, para lograr su calibración y validación de los modelos finales.

4.4.1 Reconstrucción del modelo descompuesto

En el capítulo 4.3.2 se realizó la descomposición del modelo en 128 partes, con la finalidad de ejecutar la simulación en paralelo y reducir en gran medida el tiempo de simulación. Una vez concluido el tiempo de simulación, los archivos de resultados son guardados en las carpetas de "processor*". Cada carpeta de "processor*" contiene todos los resultados de una parte de la geometría del modelo, por tal motivo es necesario reconstruir el modelo y evaluar sus resultados. La reconstrucción del modelo se realiza mediante el Código N° 4.4.

```
1  
2 reconstructPar
```

Código N° 4.4: Comandos de reconstrucción del modelo

La opción del Código N° 4.4 reconstruye todos los archivos de solución generados en la simulación, lo que podría ser una desventaja al momento de almacenar la información. Los modelos numéricos de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, en la etapa de simulación, generaron archivos muy pesados, alcanzando una capacidad de almacenamiento de 5000 GB de memoria. Por este motivo, la descomposición normal no era posible, debido a que se necesitaría el doble de capacidad de memoria de almacenamiento. Por lo que se recurrió a una reconstrucción parcial de las carpetas de solución, se especifica el tiempo de solución que se

quería reconstruir, mediante el Código N° 4.5 se puede reconstruir soluciones de un tiempo en específico de la solución.

```
1 reconstructPar -time 2000
2 reconstructPar -time 2000,4000
3 reconstructPar -time 1000:1500
4 reconstructPar -latestTime
```

Código N° 4.5: Comandos de reconstrucción parcial del modelo

En el Código N° 4.5 se presentan varias maneras de reconstruir una solución para un tiempo en específico de la simulación. Con la línea de 1 del código se puede reconstruir la solución solo para el tiempo de 2000s, con la línea 2 podemos reconstruir solo las soluciones del tiempo 2000 s y 4000 s, con la línea 3 podemos reconstruir el modelo para las soluciones de 1000 s hasta 1500 s, y por último para la línea 4 solo podemos reconstruir el último tiempo de simulación.

4.4.2 Generación de resultados

OpenFOAM permite monitorear los resultados en diferentes zonas del modelo, mediante puntos específicos, áreas determinadas o zonas determinadas del modelo. A su vez, es posible generar nuevos resultados o cálculos internos a partir de variables físicas internas del modelo. Estos resultados son generados a partir de la aplicación de funciones. Estas funciones dentro de openFOAM son conocidas como funciones de objeto.

Las funciones anteriormente mencionadas facilitan la configuración del flujo de trabajo y logran mejorar el flujo de trabajo, produciendo datos adicionales solicitados por el modelador durante el proceso de simulación o al final de la simulación en la etapa postprocesamiento. Generalmente, los resultados se presentan en formatos de registros en la pantalla o mediante la generación de resultados en formato de texto, imágenes o archivos de campos. Algunas de las funciones utilizadas durante el rastreo del modelo es el valor de número Courant (Código N° 4.6).

```
1 functions
2 {
3     Co1
4     {
5         type CourantNo;
6         libs (fieldFunctionObjects);
7         executeControl timeStep;
8         executeInterval 2;
9         writeControl writeTime;
10    }
11 }
```

Código N° 4.6: Función de objeto para el número de Courant.

Dentro del modelo se usaron funciones para monitorear algunos puntos específicos mediante la función “probes”, esta función registra los valores físicos durante el periodo de simulación y lo almacenada en un archivo de texto para su visualización (Código N° 4.7).

```
1 functions
2 {
3     probes
4     {
5         type           probes;
6         libs           ("libsampling.so");
7         writeControl   timeStep;
8         writeInterval  1;
9
10        fields
11        (
12            U
13            p_rgh
14            alpha.water
15
16        );
17
18        probeLocations
19        (
20            (671878 9508390 93)
21            (671991 9508700 93)
22            (672111 9509000 93)
23            (672291 9509380 93)
24        );
25
26    }
27
28 }
```

Código N° 4.7: Función de objeto para el monitoreo de puntos.

El modelo de turbulencia utilizado en la presente tesis es el modelo LES, que simula flujos turbulentos en régimen transitorio, porque que genera resultados a nivel temporal. Para la obtención de resultados promedios de las variables físicas de estudio, será necesario la implementación de la función promedio. Esta función calcula el promedio de cada variable física como se muestra en el Código N° 4.8.

```
1 functions
2 {
3     fieldAverage1
4     {
5         type           fieldAverage;
6         libs           (fieldFunctionObjects);
7         writeControl   writeTime;
```

```

8      fields
9      (
10     U
11     {
12         mean      on ;
13         prime2Mean off ;
14         base      time ;
15     }
16
17     p_rgh
18     {
19         mean      on ;
20         prime2Mean off ;
21         base      time ;
22     }
23
24     alpha.water
25     {
26         mean      on ;
27         prime2Mean off ;
28         base      time ;
29     }
30
31     wallShearStress
32     {
33         mean      on ;
34         prime2Mean off ;
35         base      time ;
36     }
37 );
38 }

```

Código N° 4.8: Función de objeto para campos promediados.

4.4.3 Visualización de resultados

OpenFOAM no cuenta con un visualizador de resultados propio, pero utiliza al programa “ParaView” para generar salidas gráficas y poder visualizar los resultados. ParaView es el programa de visualización líder de código abierto para el postprocesamiento de simulaciones CFD y cuenta con la capacidad de visualizar conjuntos grandes de datos. Paraview no solo cuenta la capacidad de ser utilizado en computadoras personales, sino también es posible ser usada con clúster de cómputo y generar la visualización de millones de datos mediante el paralelismo de datos. OpenFOAM utilizada la palabra clave “paraFoam” para cargar los resultados dentro del ParaView y poder visualizar los resultados.

CAPÍTULO V: CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO PROPUESTO

5.1 CONDICIONES HIDRÁULICAS DEL MODELO

Las condiciones hidráulicas del modelo propuesto en cada caso de estudio se presentan en la Tabla N° 5.1, en la que Q representa el caudal, B representa el ancho de la sección, A representa el área de la sección, H_{max} representa la profundidad máxima, H_{med} representa la profundidad media, U representa la velocidad media, F_R representa el número de Froude, V_r la relación de las velocidades de los afluentes, Q_r representa la relación de descarga y M_r representa la relación de cantidad de movimiento de los ríos Marañón y Ucayali.

TABLA N° 5.1: Condiciones hidráulicas del modelo

Condiciones hidráulicas						
Parámetro	Caso I			Caso II		
	Ucayali	Marañón	Confluencia	Ucayali	Marañón	Confluencia
$Q (m^3/s)$	5366	11967	17333	16163	16655	32818
$B (m)$	703	1071	1439	794	1208	1518
$A (m^2)$	11837	9120	18274	12253	15249	24265
$Nivel (m)$	90.4	90.4	90.4	94.4	94.4	94.4
$H_{max} (m)$	24.6	18.5	27.1	23.1	25.7	33.7
$H_{med} (m)$	16.8	8.5	12.7	15.4	12.6	16
$U (m/s)$	0.5	1.3	0.9	1.3	1.1	1.3
F_R	0.04	0.14	0.08	0.11	0.10	0.10
V_r	-	-	0.38	-	-	1.18
Q_r	-	-	0.45	-	-	0.97
M_r	-	-	0.17	-	-	1.15

La calibración de los modelos numéricos se desarrolló mediante la generación de la malla, la asignación de altura de rugosidad equivalente K_s y la asignación de los parámetros hidráulicos en las condiciones de borde. Para la calibración del modelo se debe asegurar que la malla cumpla con los parámetros calidad de malla, lo cual se cumplió para los dos casos de estudio y sus resultados fueron presentados en el capítulo 4.2.5. La variable K_s no presenta gran influencia en modelos numéricos tridimensionales. Su mayor influencia se presenta en la primera celda de la malla cerca a la pared del modelo. La información sobre K_s se incluyó en el capítulo 4.2.3.

Las condiciones hidráulicas sirvieron para la calibración de la velocidad del flujo en las secciones de ingreso del río Marañón y Ucayali, el desarrollo de la velocidad de

flujo se logró a partir del caudal de ingreso presentado en la Tabla N° 5.1 para cada río, respectivamente. Para la calibración de las velocidades de ingreso de cada río, se utilizaron las velocidades medidas en campo realizadas para cada caso de estudio. En el Caso I, para el río Ucayali se utilizó la sección A01 de la Figura N° 3.14, para el río Marañón se utilizó la sección M01 de la Figura N° 3.15. En el Caso II, para el río Ucayali se utilizó la sección A01 de la Figura N° 3.19 y para el río Marañón se utilizó la sección M01 de la Figura N° 3.20. La ubicación de las secciones se muestra en la Figura N° 4.3.

5.1.1 Calibración de la velocidad de ingreso para el Caso I

La comparación de la velocidad en la sección U01 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.1. Se puede apreciar que el modelo numérico replicó la hidrodinámica del río Ucayali, generando una mayor velocidad en la margen derecha (MD) y una menor velocidad en la margen izquierda (MI), alcanzando una velocidad de flujo en el margen derecho de 1 m/s a 1.2 m/s.

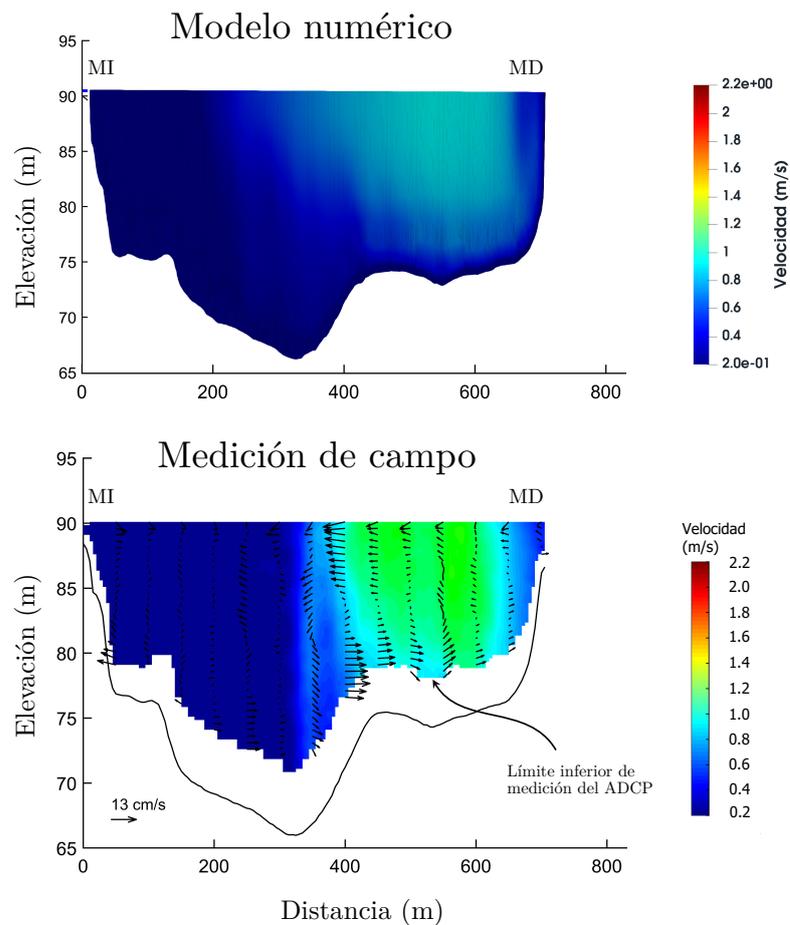


FIGURA N° 5.1: Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección U01 del Caso I.

Es necesario recordar que el ADCP mide el campo de velocidad hasta una cierta altura por encima del lecho del río. Por este motivo, aparece una franja en blanco en la parte inferior de la Figura N° 5.1 y en las subsiguientes en las que se muestra el campo de flujo medido en campo. Se presentan las gráficas de la velocidad a lo largo del ancho de la sección desde la margen izquierda hasta la margen derecha, para el 20 %, 40 %, 60 % y 80 % de la profundidad media (H_{med}) en cada sección.

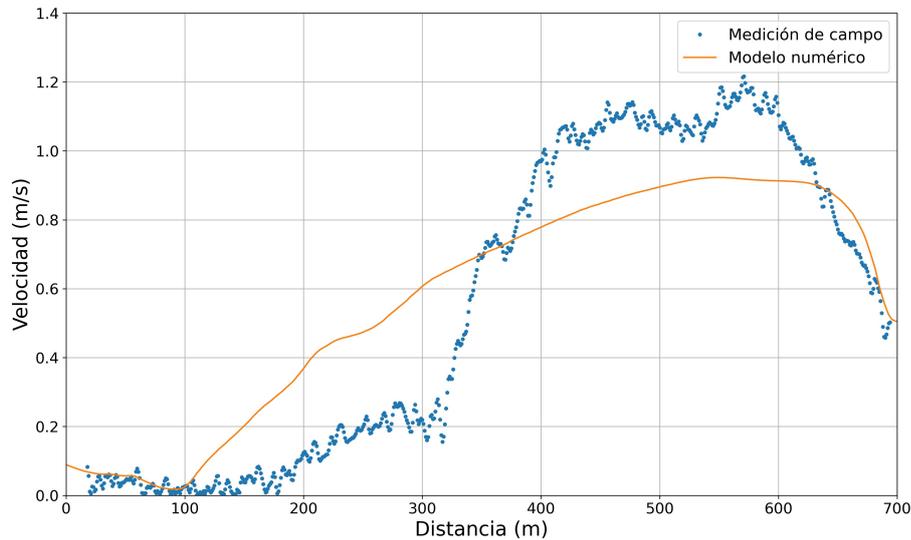


FIGURA N° 5.2: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 20% H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.2, el modelo numérico sobrestima el valor de la velocidad entre la distancia de 100 m a 350 m, mientras que subestima entre la distancia de 350 m a 650 m, pero el valor de la diferencia de estos no supera los 0.2 m/s.

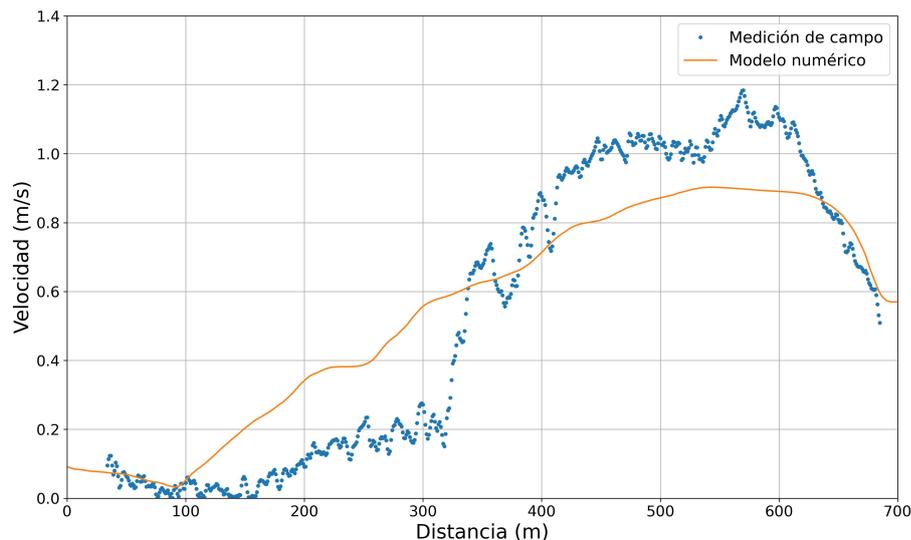


FIGURA N° 5.3: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 40% H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.3 donde se presenta las velocidades medidas y simuladas al 40 % de la profundidad, muestra el mismo comportamiento que la Figura N° 5.2; sin embargo, el valor de la diferencias de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo es menor.

De la Figura N° 5.4 y la Figura N° 5.5, se observa que a mayor profundidad el comportamiento de la velocidad del modelo numérico muestra una mejor aproximación a la medición en campo. Se presenta una pequeña diferencia, llegando a ser menor a 0.1 m/s. También se puede afirmar que cerca de la superficie las velocidades en campo se aproximan a las velocidades simuladas en el modelo numérico.

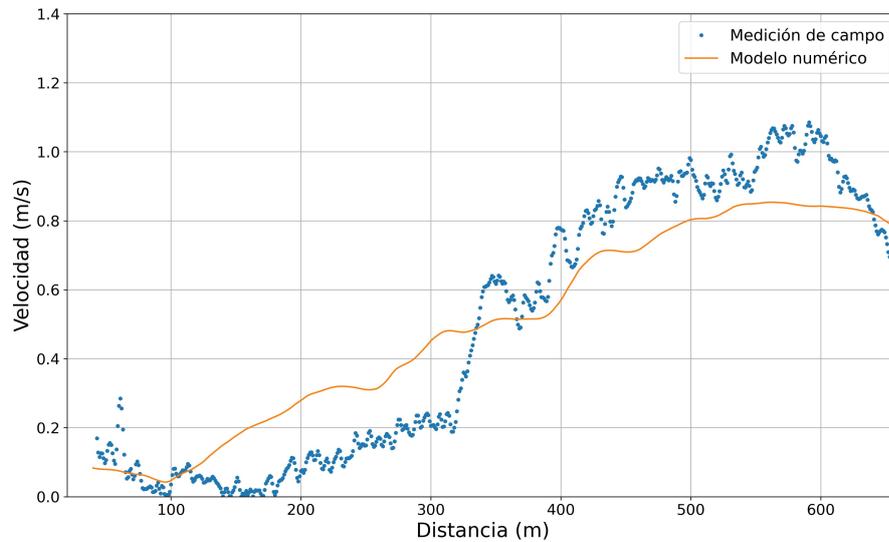


FIGURA N° 5.4: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 60% H_{med} (Caso I).

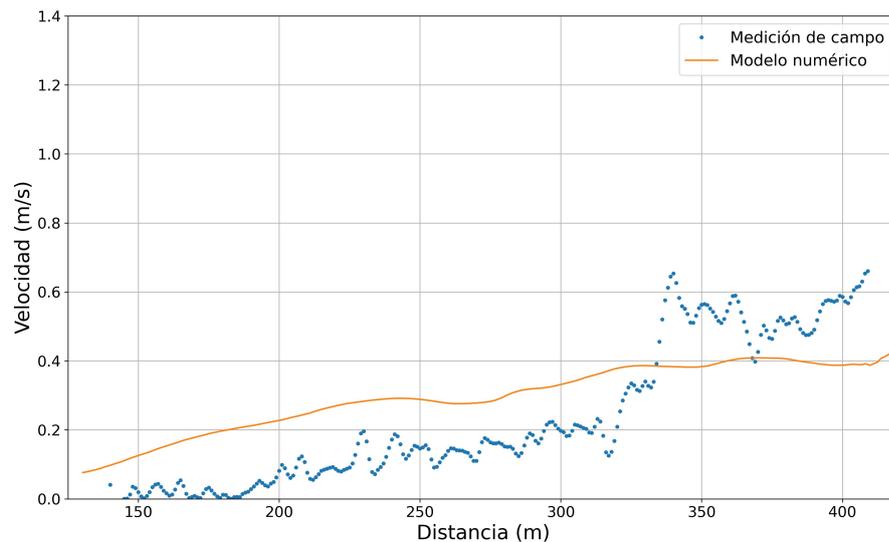


FIGURA N° 5.5: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 80% H_{med} (Caso I).

La velocidad del modelo numérico en la sección U01 para el Caso I, presenta una ligera diferencia cerca de la superficie de agua. Debido a que en la etapa de calibración no es posible replicar por completo la velocidad medida en dicha sección, porque en el río Ucayali antes de la sección U01 existe un meandro como se muestra en la Figura N° 3.13. Esta curva de meandro influye en el desarrollo de la velocidad en dicha sección. La calibración podría ser mejorada creando un modelo previo de la curva de meandro o extendiendo los límites del modelo.

La comparación de la velocidad en la sección M01 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.6. Se puede apreciar que el modelo numérico replicó la hidrodinámica del río Marañón, generando una mayor velocidad cerca del centro de la sección M01, alcanzando una velocidad de flujo de 1.4 m/s.

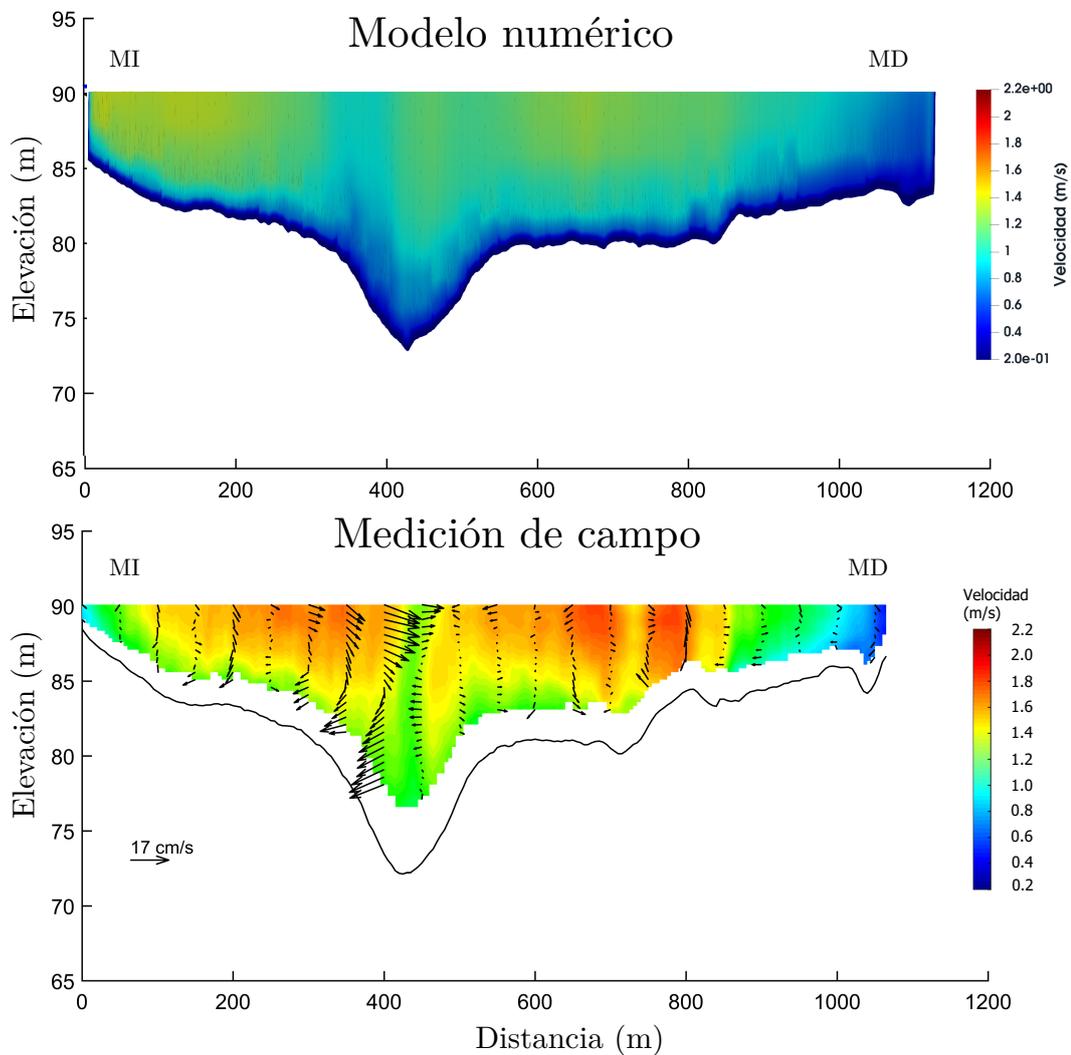


FIGURA N° 5.6: Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección M01 del Caso I.

Se evaluaron las gráficas de las velocidades a lo largo de la sección M01, la Figura N° 5.7 muestra que el modelo numérico subestima el valor de la velocidad en la parte central de la sección. La diferencia en promedio de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo es de 0.3 m/s en la parte central de la sección.

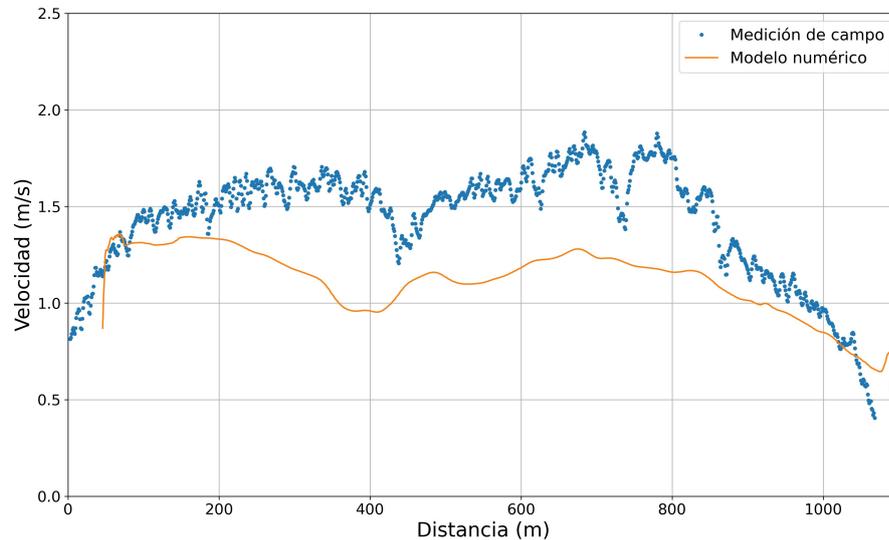


FIGURA N° 5.7: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 20% H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.8 muestra el mismo comportamiento que la Figura N° 5.7; sin embargo, el valor de la diferencia de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo se reduce. Además, cerca de las márgenes derecha e izquierda de la sección, la velocidad del modelo numérico se ajusta a la medición en campo.

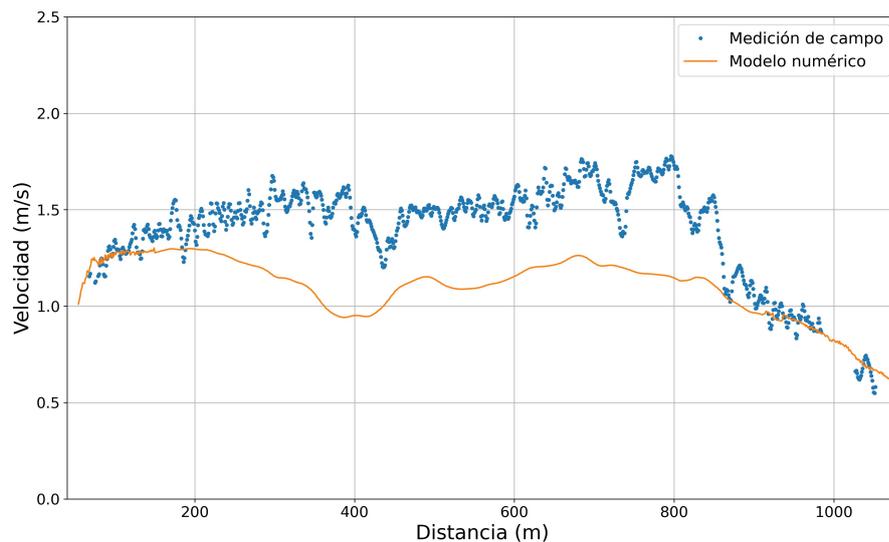


FIGURA N° 5.8: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 40% H_{med} (Caso I).

De la Figura N° 5.9 y la Figura N° 5.10, se observa que a mayor profundidad de medición el comportamiento de la velocidad en el modelo numérico se ajusta a la medición en campo. Se presenta una diferencia cercana a los 0.2 m/s.

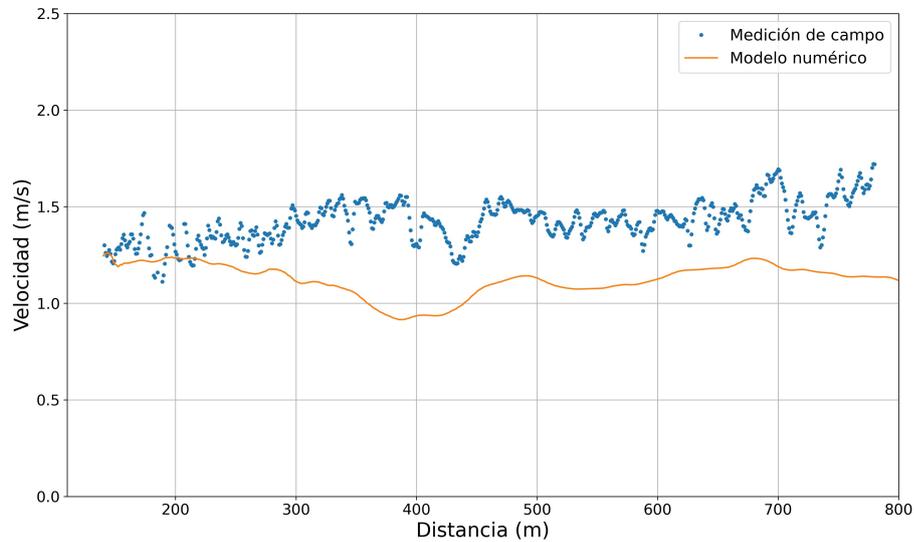


FIGURA N° 5.9: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 60% H_{med} (Caso I).

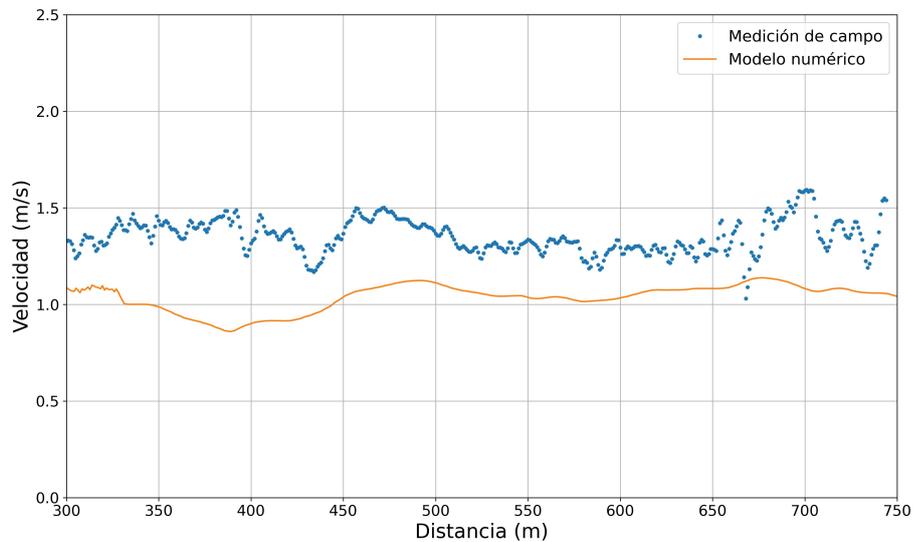


FIGURA N° 5.10: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 80% H_{med} (Caso I).

La velocidad del modelo numérico en la sección M01 para el Caso I, presenta una diferencia en la parte central de la sección y cerca de la superficie del agua. Durante la etapa de calibración no fue posible replicar por completo la velocidad medida en dicha sección, porque el río Marañón aguas arriba de la sección M01 presenta una confluencia formada por sus dos canales (Figura N° 3.13). Esta confluencia formada por los canales del río Marañón influyen en la velocidad cercana al centro

de la sección. La calibración puede ser mejorada creando un modelo previo de la confluencia de estos canales y esperar que el flujo se desarrolle aguas abajo en la sección M01.

5.1.2 Calibración de la velocidad de ingreso para el Caso II

La comparación de la velocidad en la sección U01 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.11. Se puede apreciar que el modelo numérico replicó la hidrodinámica del río Ucayali, generando la mayor velocidad en la margen derecha y la menor velocidad en la margen izquierda. Sin embargo, se puede apreciar que la velocidad máxima, en el modelo numérico, se ubica más cerca de la margen derecha en comparación con la medición de campo.

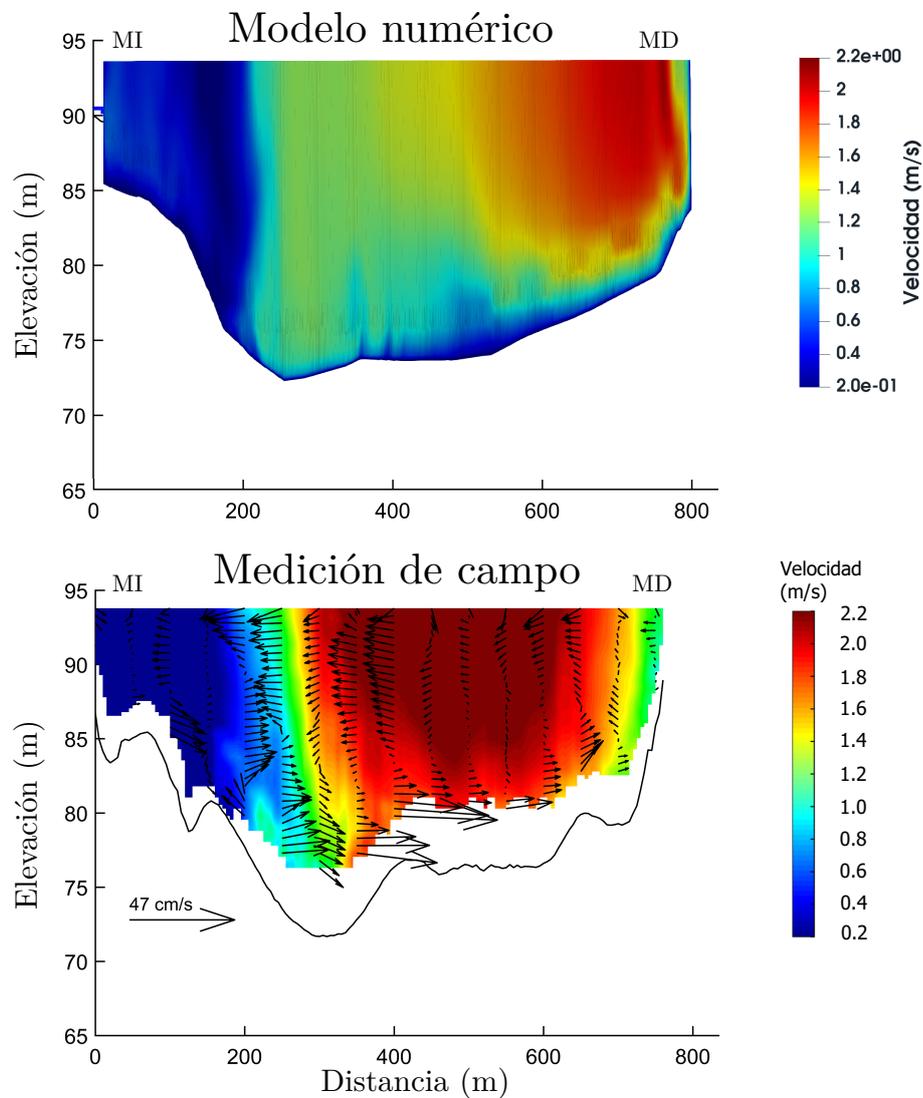


FIGURA N° 5.11: Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección U01 del Caso II.

Se evaluaron las gráficas de las velocidades a lo largo de la sección U01. La Figura N° 5.12 muestra que el modelo numérico subestima el valor de la velocidad desde la distancia de 250 m hasta los 650 m, y sobrestima entre la distancia de 650 m hasta los 800 m

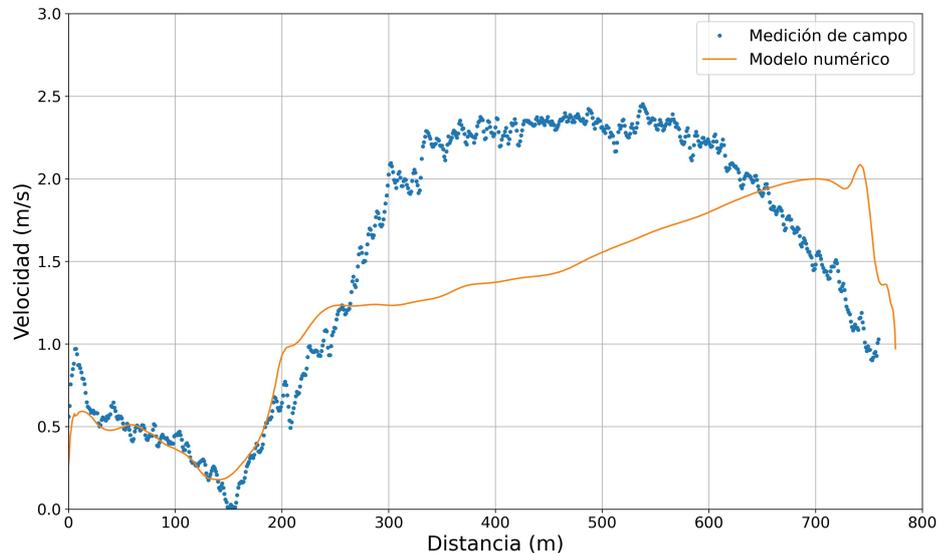


FIGURA N° 5.12: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 20% H_{med} (Caso II).

La Figura N° 5.13 muestra la comparación de la gráfica de velocidad a una profundidad del 40% H_{med} , el valor de la velocidad del modelo numérico es subestimada entre la distancia de 250 m hasta los 650 m, y sobrestima entre la distancia de 650 m hasta los 800 m.

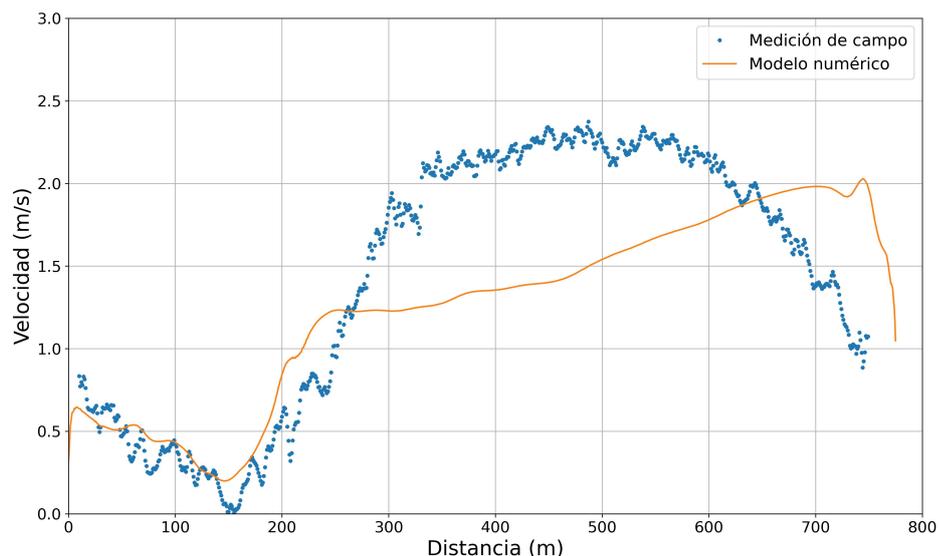


FIGURA N° 5.13: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 40% H_{med} (Caso II).

De la Figura N° 5.14 y la Figura N° 5.15, se puede observar que a mayor profundidad, existe una menor diferencia entre la velocidad del modelo numérico y la medición de campo.

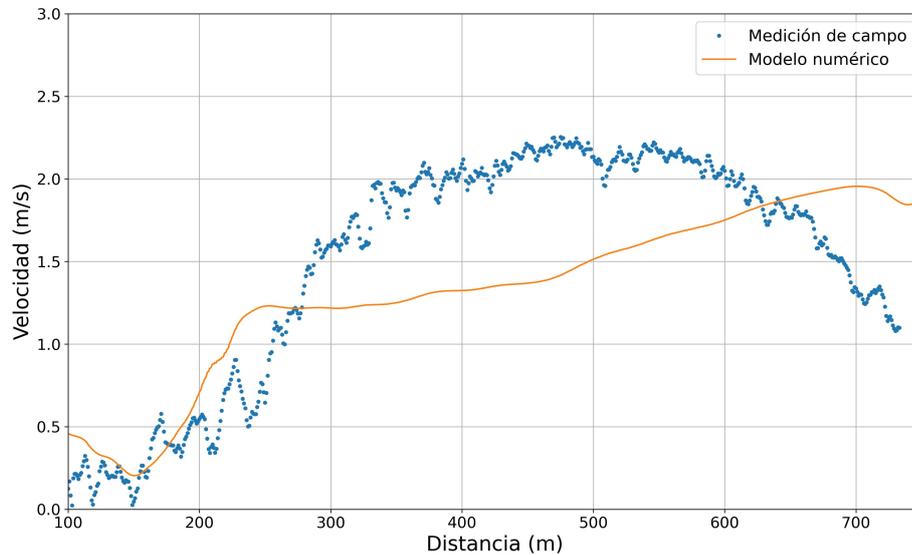


FIGURA N° 5.14: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 60% H_{med} (Caso II).

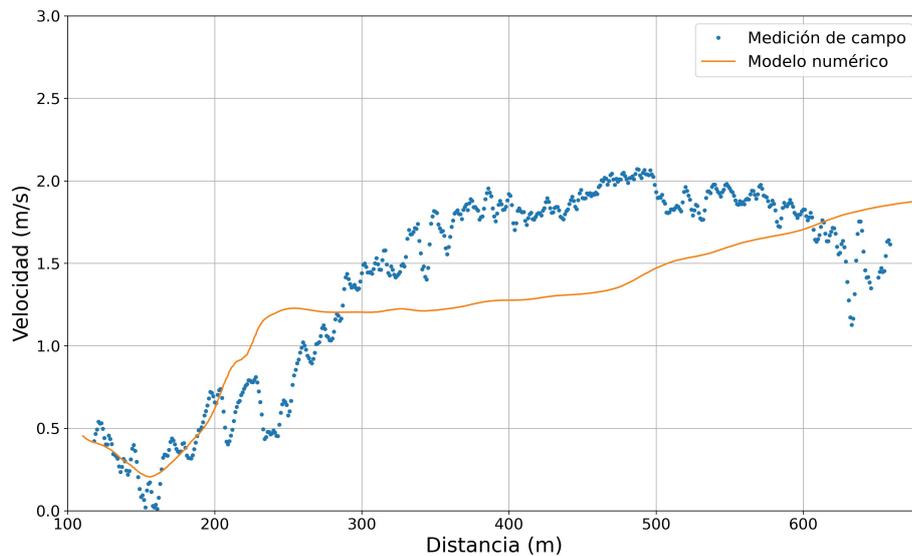


FIGURA N° 5.15: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección U01 a una profundidad del 80% H_{med} (Caso II).

La velocidad del modelo numérico en la sección U01 para el Caso II, presenta una diferencia cerca del margen derecho. La diferencia se debe a que en la etapa de calibración no fue posible replicar por completo la distribución de velocidades medida en campo. La velocidad está influenciada por el flujo secundario formado en la curva de meandro aguas arriba de la sección U01 (Figura N° 3.18). La Figura

N° 5.11 muestra la sección medida en campo, donde se puede observar los vectores del flujo secundario, lo cual tiene una mayor magnitud con respecto al Caso I. La simulación y la calibración puede ser mejorada creando un modelo previo de la curva de meandro o extendiendo las simulaciones en dirección aguas arriba, lo que permitiría que se desarrolle el flujo secundario en la sección U01.

La comparación de la velocidad en la sección M01 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.16. Se puede apreciar que el modelo numérico replicó la hidrodinámica del río Marañón.

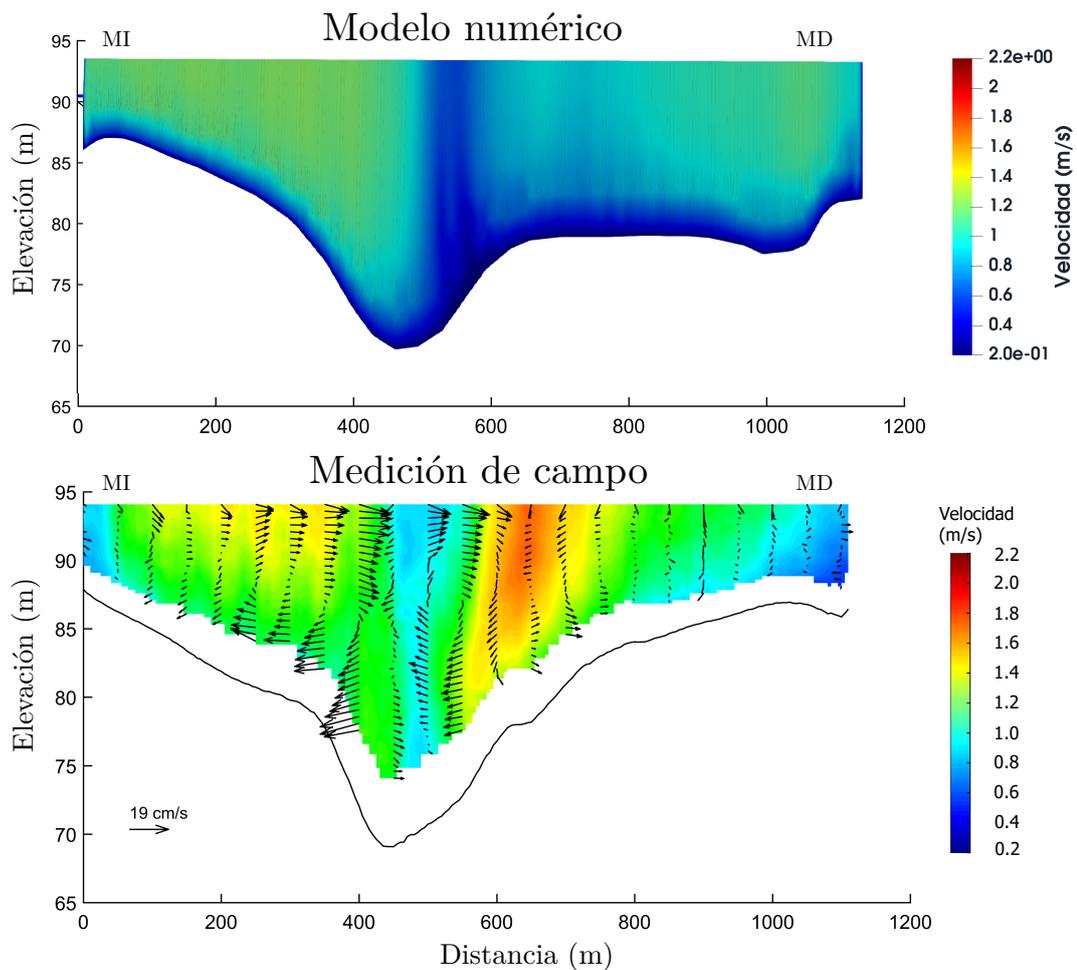


FIGURA N° 5.16: Comparación de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo, para la sección M01 del Caso II.

Se evaluaron las gráficas de las velocidades a lo largo de la sección M01, la Figura N° 5.17 muestra que el modelo numérico subestima el valor de la velocidad entre la distancia de 500 m hasta los 900 m de la sección M01, mientras que sobrestima de la distancia 900 m hasta los 1100 m.

La Figura N° 5.18 muestra el mismo comportamiento que la Figura N° 5.17; sin

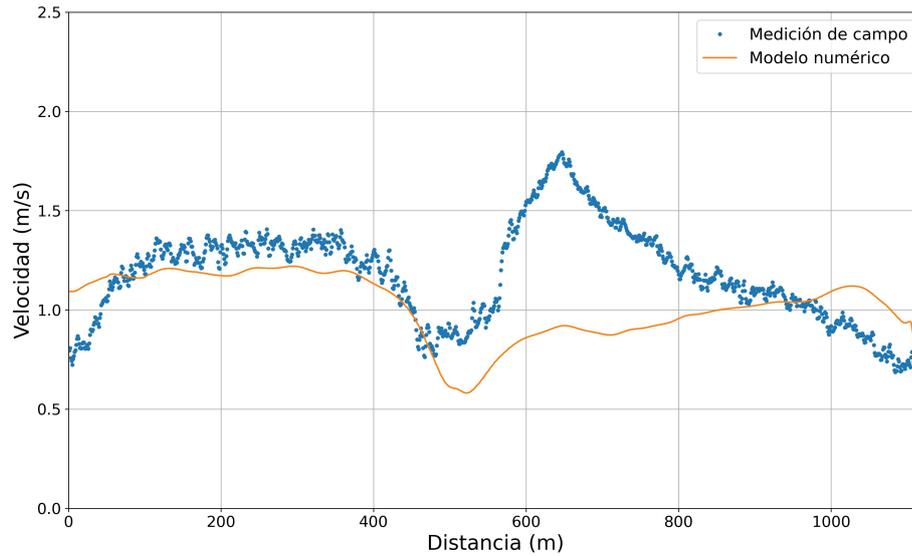


FIGURA N° 5.17: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 20% H_{med} (Caso I).

embargo, el valor de la diferencia de la velocidad entre el modelo numérico y la medición de campo se reduce un poco. Cerca de la margen izquierda, la velocidad del modelo numérico se ajusta la medición en campo.

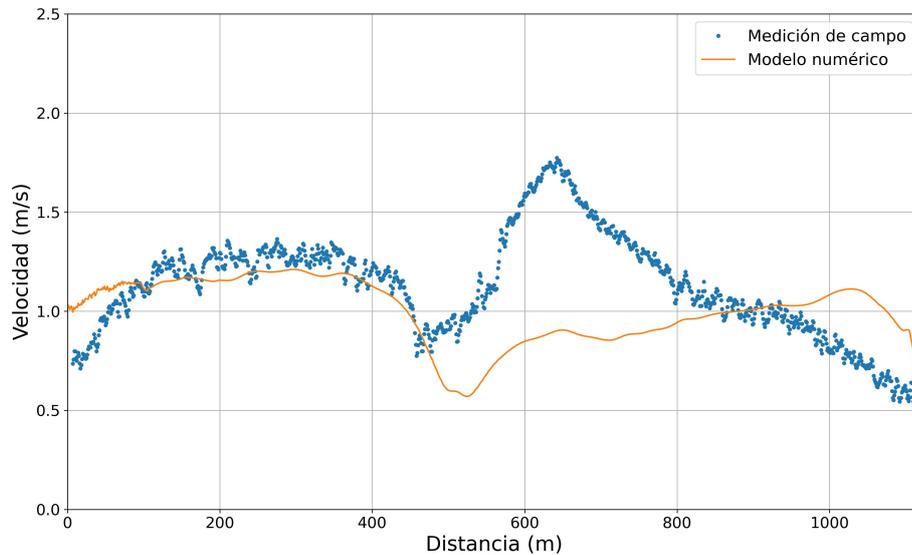


FIGURA N° 5.18: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 40% H_{med} (Caso II).

De la Figura N° 5.19 y la Figura N° 5.20, se observa que a mayor profundidad de medición se reduce la diferencia entre la velocidad del modelo numérico y la medición de campo. A su vez, se puede observar el modelo numérico se ajusta a la medición de campo en el margen izquierdo, y que el modelo numérico subestima el valor de la velocidad entre la distancia de 500 m hasta los 800 m.

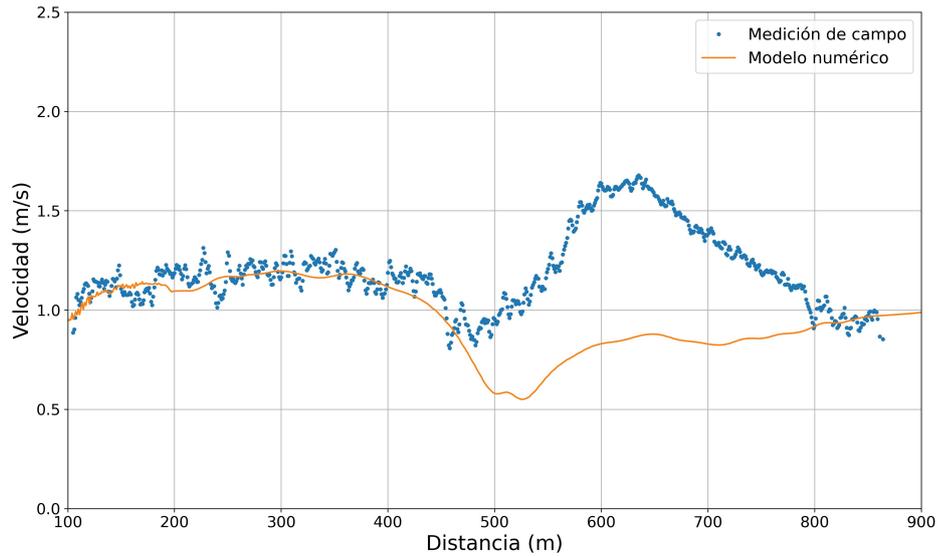


FIGURA N° 5.19: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 60% H_{med} (Caso II).

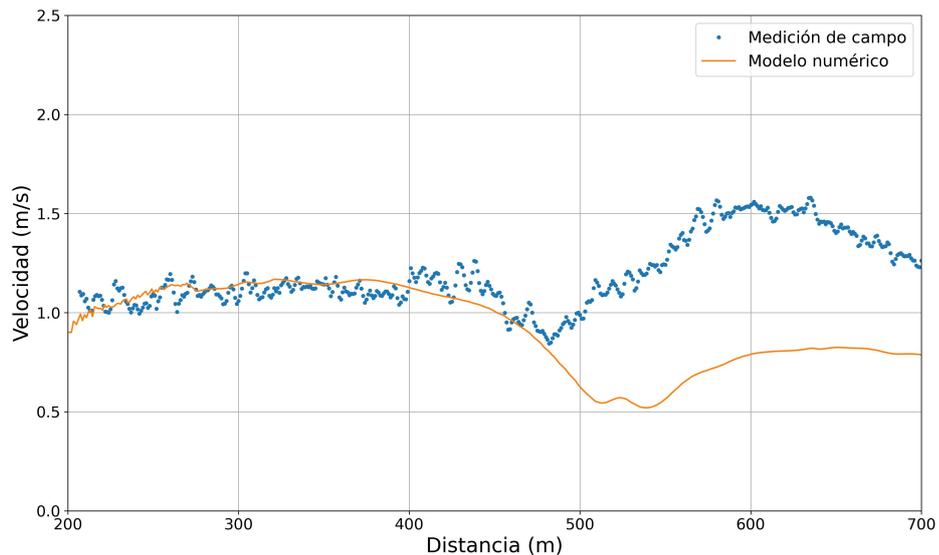


FIGURA N° 5.20: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección M01 a una profundidad del 80% H_{med} (Caso II).

La velocidad del modelo numérico en la sección M01 para el Caso II, presenta una diferencia en la parte de la margen derecha a la distancia de 600 m. Durante la etapa de calibración no fue posible replicar por completo la velocidad medida, porque el río Marañón antes de la sección M01 presenta una confluencia formada por sus dos canales (Figura N° 3.18). Esta confluencia formada por los canales influyen en la velocidad cercana al centro de la sección. La calibración puede ser mejorada creando un modelo previo de la confluencia de estos canales y esperar que el flujo se desarrolle aguas abajo en la sección M01.

5.2 DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD LONGITUDINAL

5.2.1 Resultado del Caso I

El resultado de la distribución de velocidad longitudinal del modelo numérico se muestra en la Figura N° 5.22 y es comparado con la distribución de la velocidad longitudinal medida en campo como se muestra en la Figura N° 5.21. El modelo numérico se ajusta adecuadamente a la hidrodinámica medida en campo. En la Figura N° 5.21 se puede observar que la sección A01 desarrolla su máxima velocidad cerca del centro de la sección hasta cerca de la margen izquierda. En las secciones A02 y A03 se observa el desarrollo de la velocidad aguas abajo, desde el centro del río y extendiéndose hacia la margen derecha.

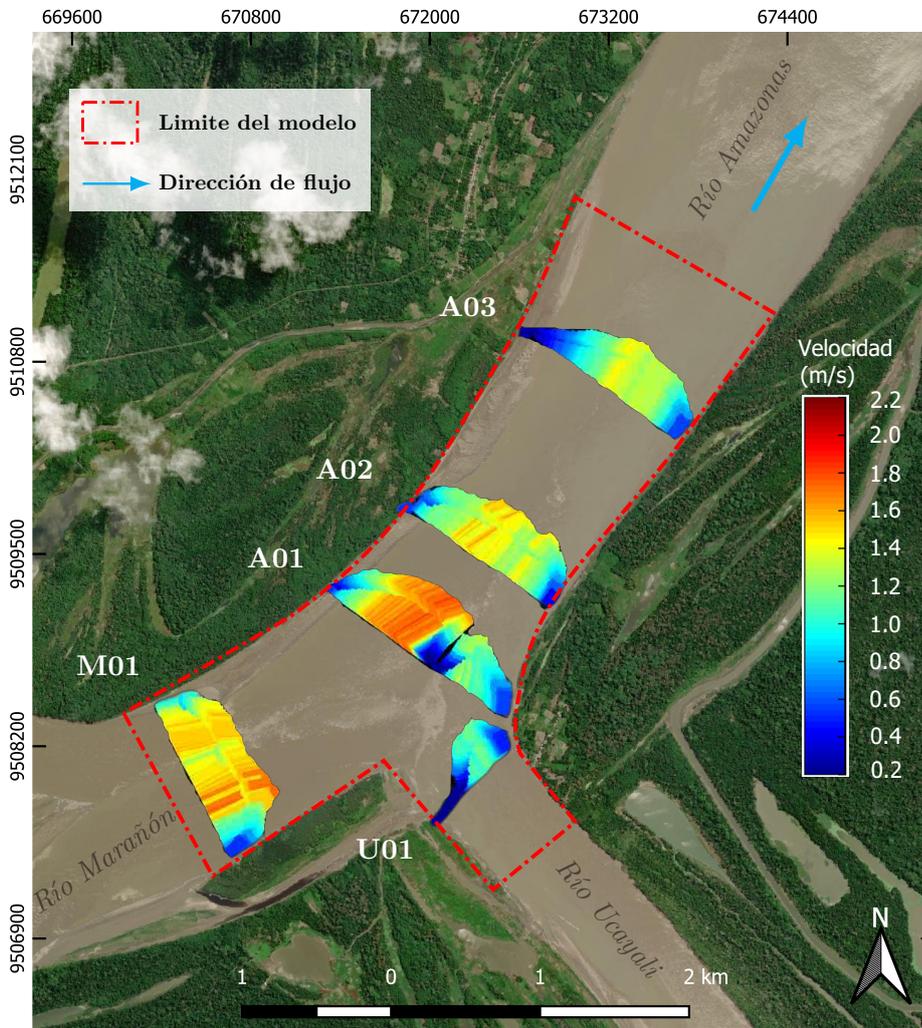


FIGURA N° 5.21: Distribución de la velocidad longitudinal en las secciones medidas en campo (Caso I).

El resultado del modelo numérico mostrado en la Figura N° 5.22, se observa que la máxima velocidad del modelo numérico se encuentra cerca a la sección de validación A02. Además, se puede distinguir la influencia del río Ucayali y el río Marañón respectivamente en cada margen, donde la margen izquierda presenta una mayor velocidad de flujo influenciada por el río Marañón, y en la margen derecha una menor velocidad influenciada por el río Ucayali.

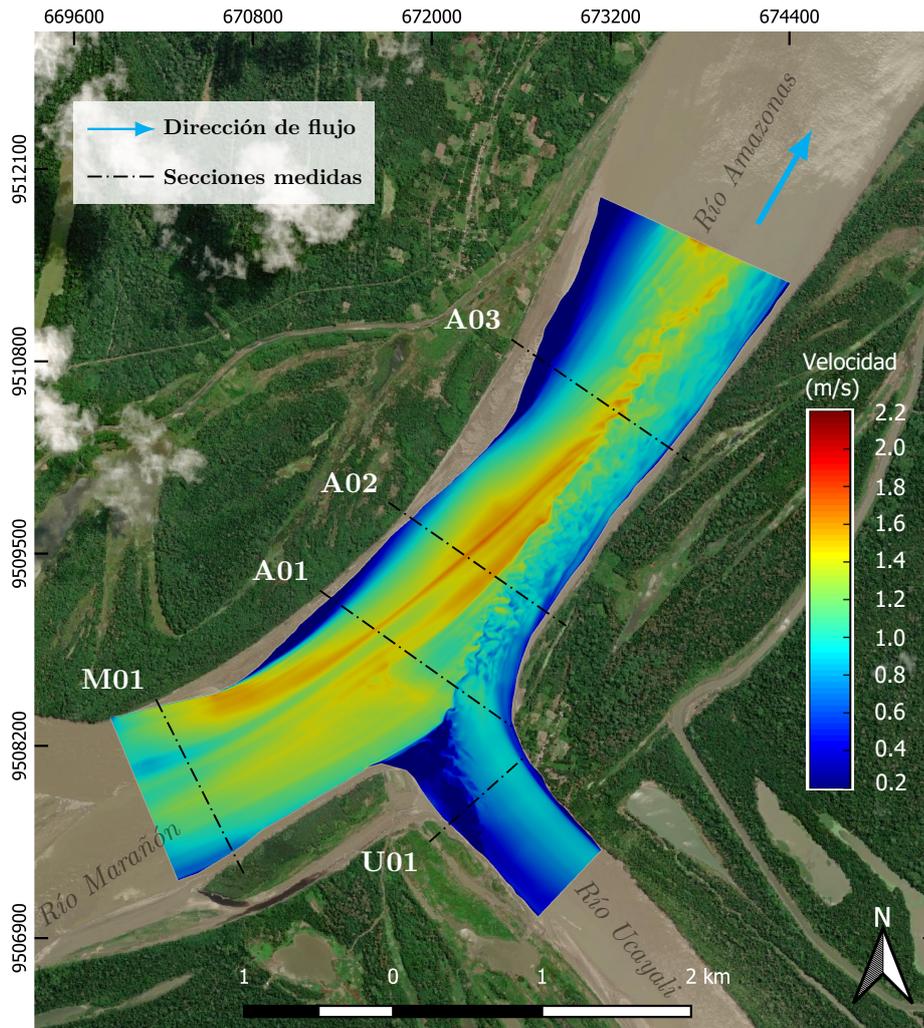


FIGURA N° 5.22: Distribución de la Velocidad longitudinal en el modelo numérico (Caso I).

5.2.2 Resultado del Caso II

El resultado de la distribución de velocidad longitudinal del modelo numérico se muestra en la Figura N° 5.24 y es comparado con la distribución de la velocidad longitudinal medida en campo como se muestra en la Figura N° 5.23. El modelo

numérico se ajusta adecuadamente a la hidrodinámica medida en campo. En la Figura N° 5.23 se puede observar que la sección A01 desarrolla su máxima velocidad cercana a la margen derecha. En las secciones A02 y A03 se observa el desarrollo de la velocidad aguas abajo, desde el centro del río y extendiéndose hacia la margen derecha.

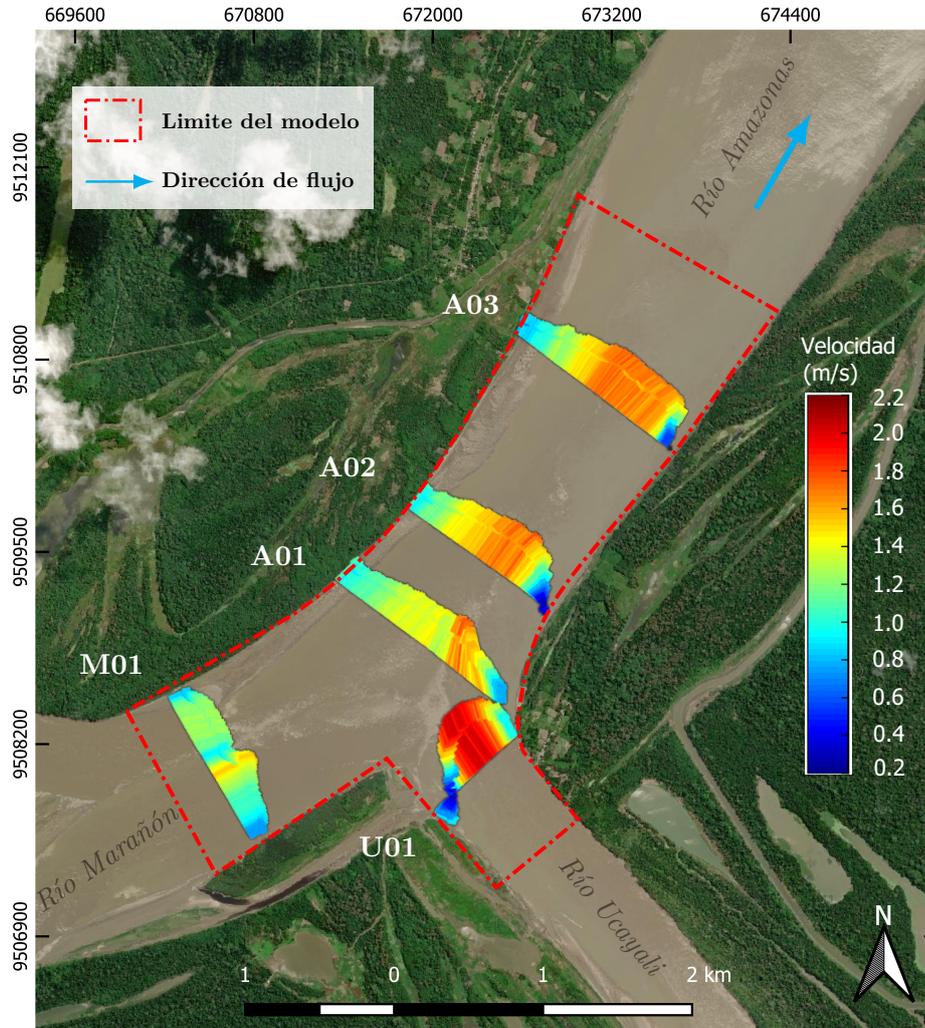


FIGURA N° 5.23: Distribución de la velocidad longitudinal en las secciones medidas en campo (Caso II).

El resultado del modelo numérico mostrado en la Figura N° 5.24, se observa que la máxima velocidad del modelo numérico se encuentra cerca de la margen derecha de la zona de la confluencia. Además, se puede distinguir la influencia del río Ucayali y el río Marañón respectivamente en cada margen, donde la margen izquierda presenta una menor velocidad de flujo influenciado por el río Marañón, y en la margen derecha una mayor velocidad influenciada por el río Ucayali.

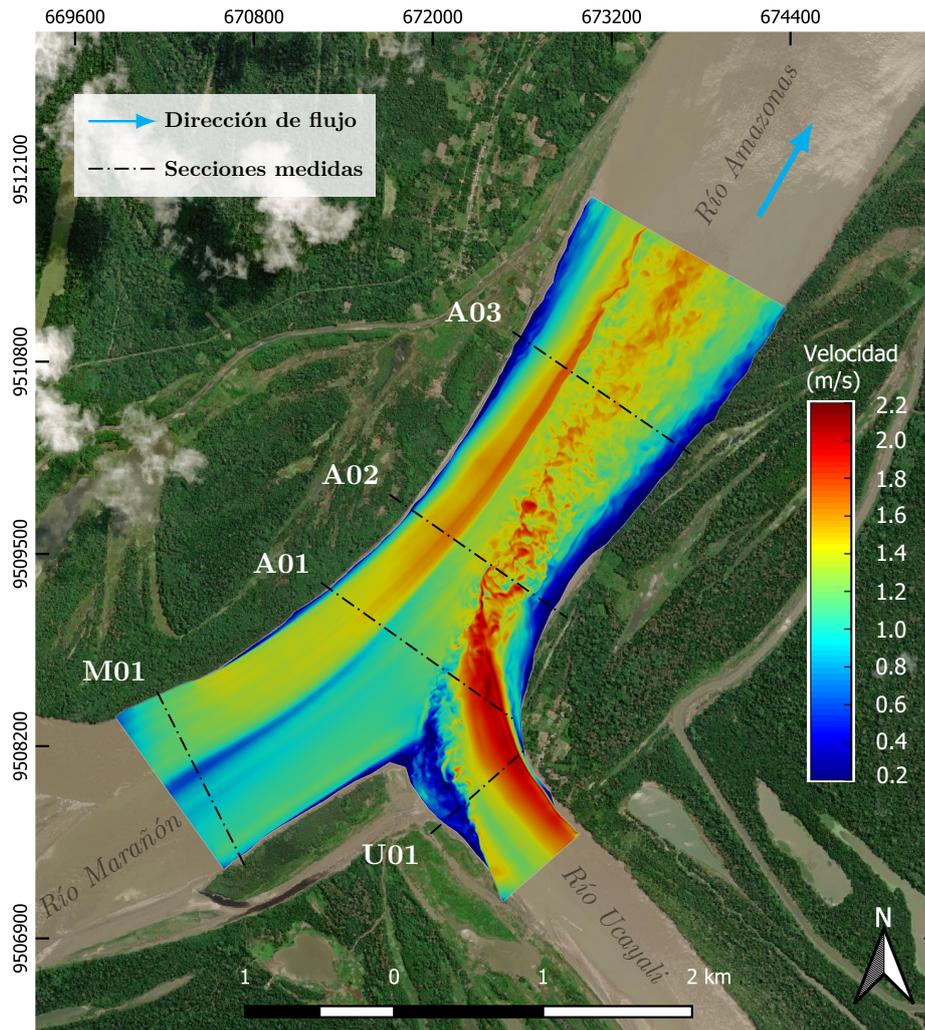


FIGURA N° 5.24: Distribución de la Velocidad longitudinal en el modelo numérico (Caso II).

5.3 DISTRIBUCIÓN DE LA VELOCIDAD TRANSVERSAL

La validación de los modelos numéricos de la confluencia del río Marañón y Ucayali, se realizó mediante las secciones medidas en la zona de la confluencia. Para el Caso I, se utilizaron las velocidades de las secciones A01, A02 y A03 de la Figura N° 3.16. La ubicación de cada sección se muestra en la Figura N° 5.22. Para el Caso II, se utilizaron las velocidades transversales de las secciones A01, A02 y A03 de la Figura N° 3.21. La ubicación de cada sección se muestra en la Figura N° 5.24. En los casos I y II se mantienen las secciones por consistencia y para fines de comparación. Los resultados del modelo numérico presentados en cada sección de estudio son resultados promediados en el tiempo, que ayudan a tener una mejor comprensión de la hidrodinámica de cada sección de estudio.

5.3.1 Validación del modelo numérico tridimensional Caso I

La comparación de la velocidad en la sección A01 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.25, el modelo numérico replica la hidrodinámica de la sección A01. Se observa que la máxima velocidad se encuentra en la margen izquierda, en el medio de la sección se puede observar una velocidad baja, lo que se replicó en el modelo numérico.

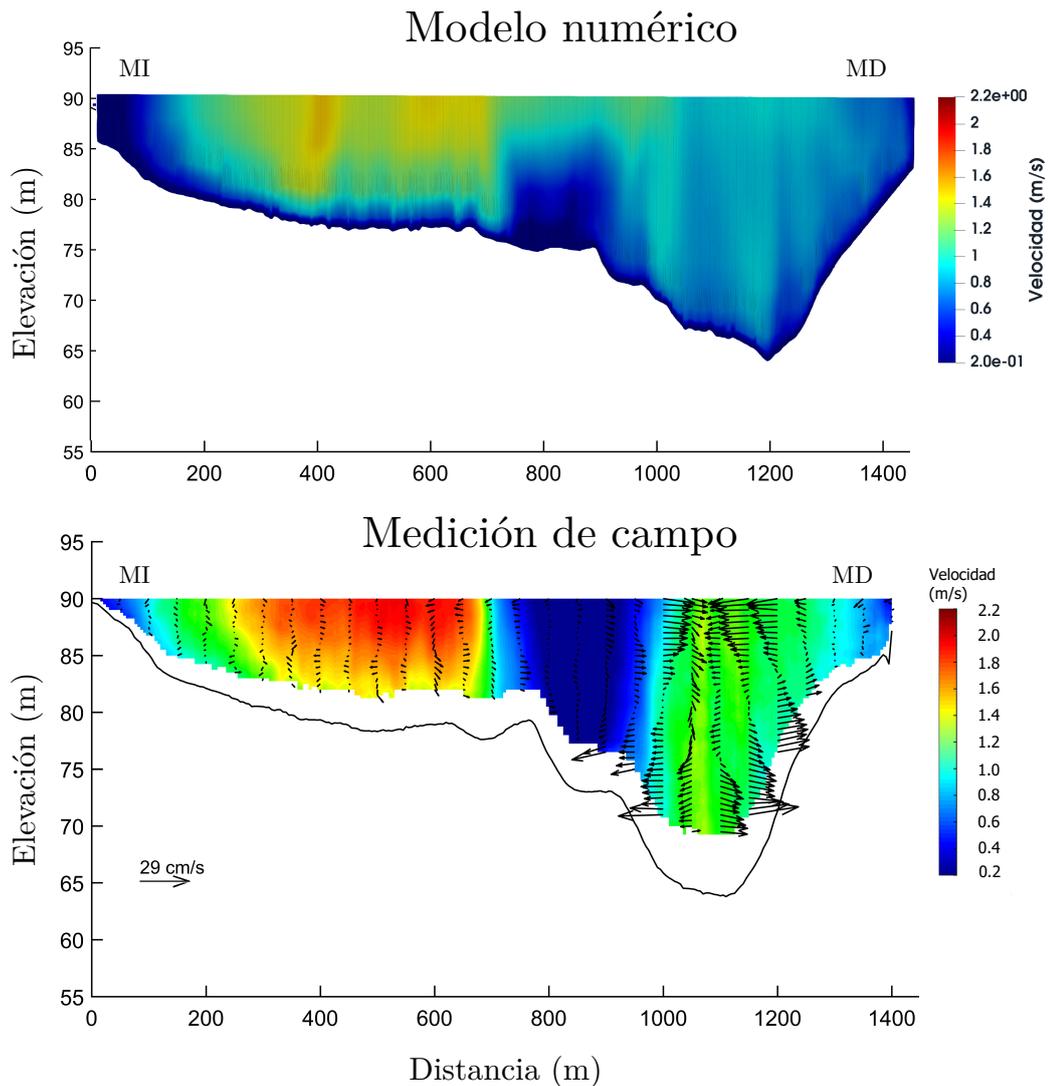


FIGURA N° 5.25: Validación de la sección A01 (Caso I).

Para cuantificar los valores de la diferencia generada entre el modelo numérico y la medición de campo dentro de las secciones de estudio, se presentan las gráficas de velocidad a lo largo del ancho de la sección, a cuatro profundidades distintas, que son el 25 %, 50 %, 75 % y 100 % de la profundidad media (H_{med}) de cada sección.

La Figura N° 5.26, representa la gráfica de la velocidad a lo largo de la sección A01 a una profundidad del 25 % H_{med} . El valor de H_{med} es de 12.7 m este valor fue medido en campo. Para mayor información se recomienda revisar la Tabla N° 3.3.

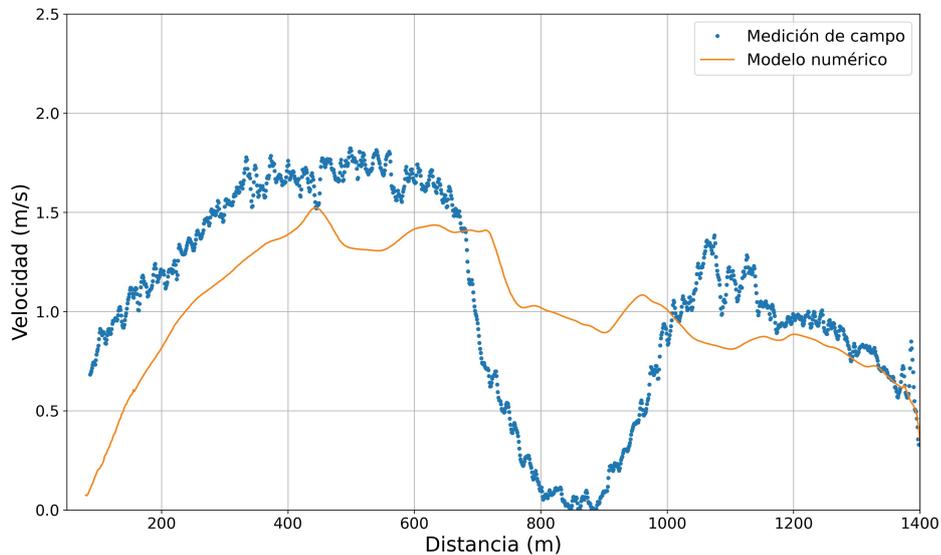


FIGURA N° 5.26: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 25 % H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.26, se muestra que el modelo numérico sobrestima el valor de la velocidad dentro del tramo de 700 m hasta los 1000 m, mientras en que los tramos restantes se presenta una subestimación con una diferencia pequeña.

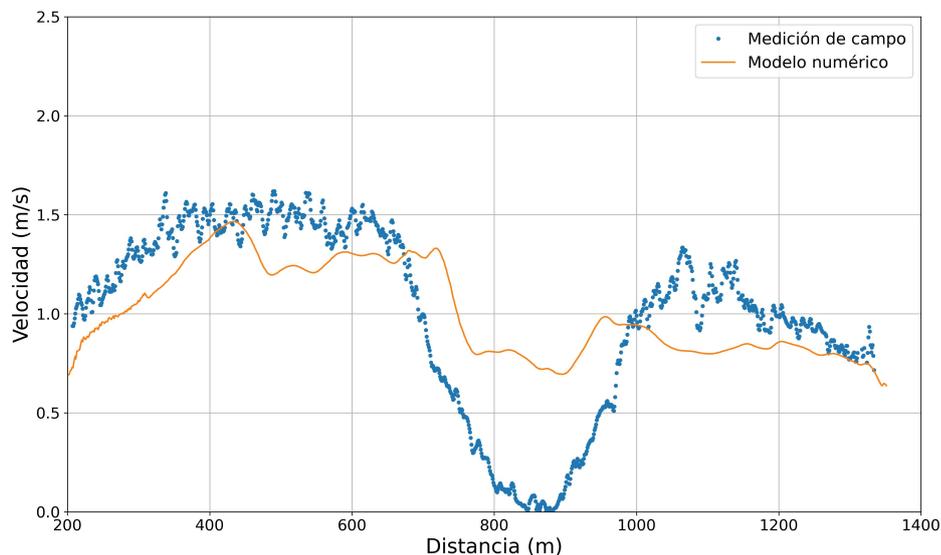


FIGURA N° 5.27: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 50 % H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.27, muestra una mejor concordancia del modelo numérico con las mediciones de campo. Se puede observar que la sobreestimación entre el tramo

de 700 m hasta los 1000 m se ha reducido en comparación con la Figura N° 5.26. De la Figura N° 5.28 y la Figura N° 5.29, se observa que el modelo numérico se ajusta muy bien a la medición de campo, a mayor profundidad existe una menor diferencia entre los resultados de modelo numérico comparado con la medición de campo.

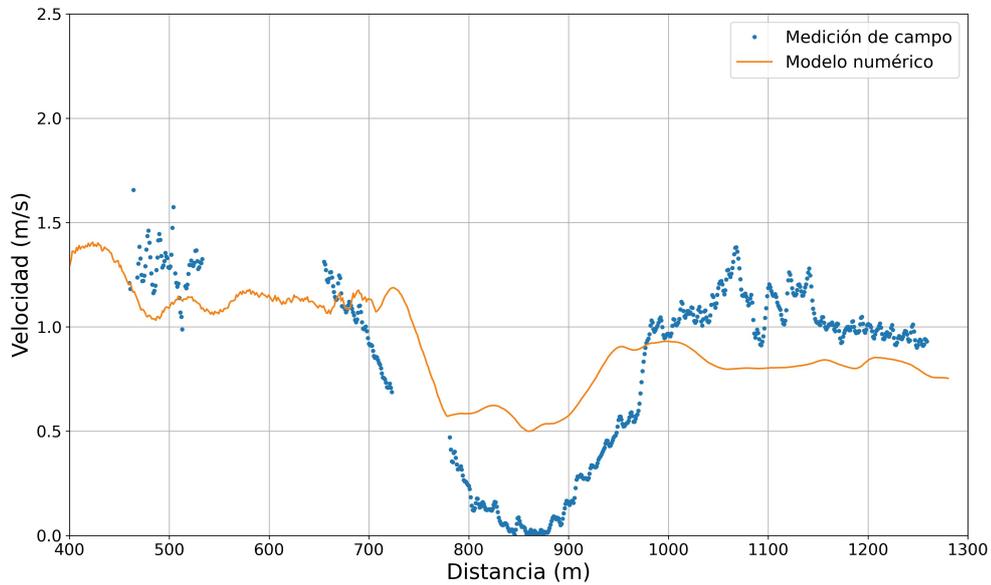


FIGURA N° 5.28: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 75% H_{med} (Caso I).

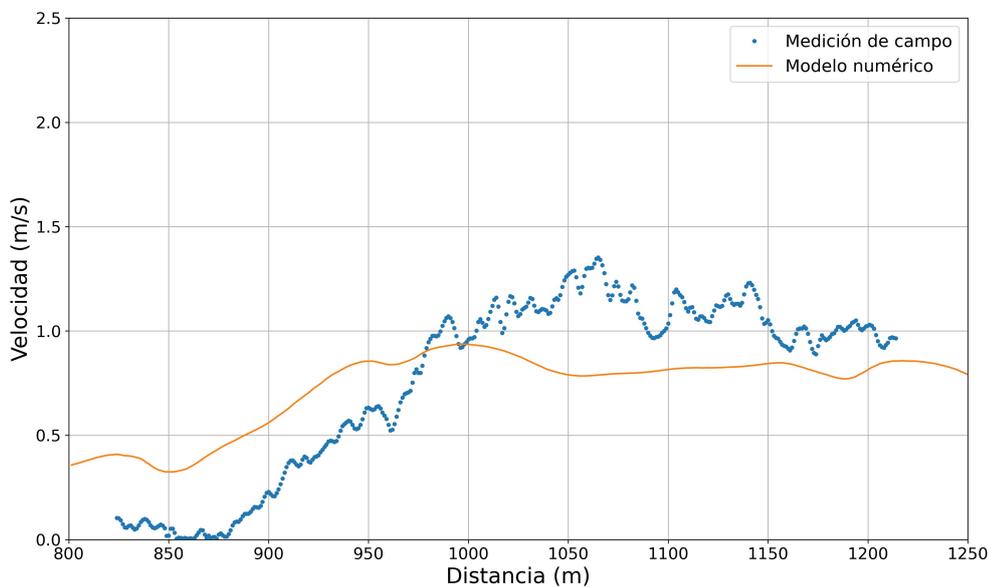


FIGURA N° 5.29: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 100% H_{med} (Caso I).

La comparación de la velocidad en la sección A02 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.30, el modelo numérico replica la

hidrodinámica de la sección A02. Se observa que la máxima velocidad se encuentra en la margen izquierda, y cerca de la margen derecha se puede observar una menor velocidad, comportamiento que fue replicado en el modelo numérico.

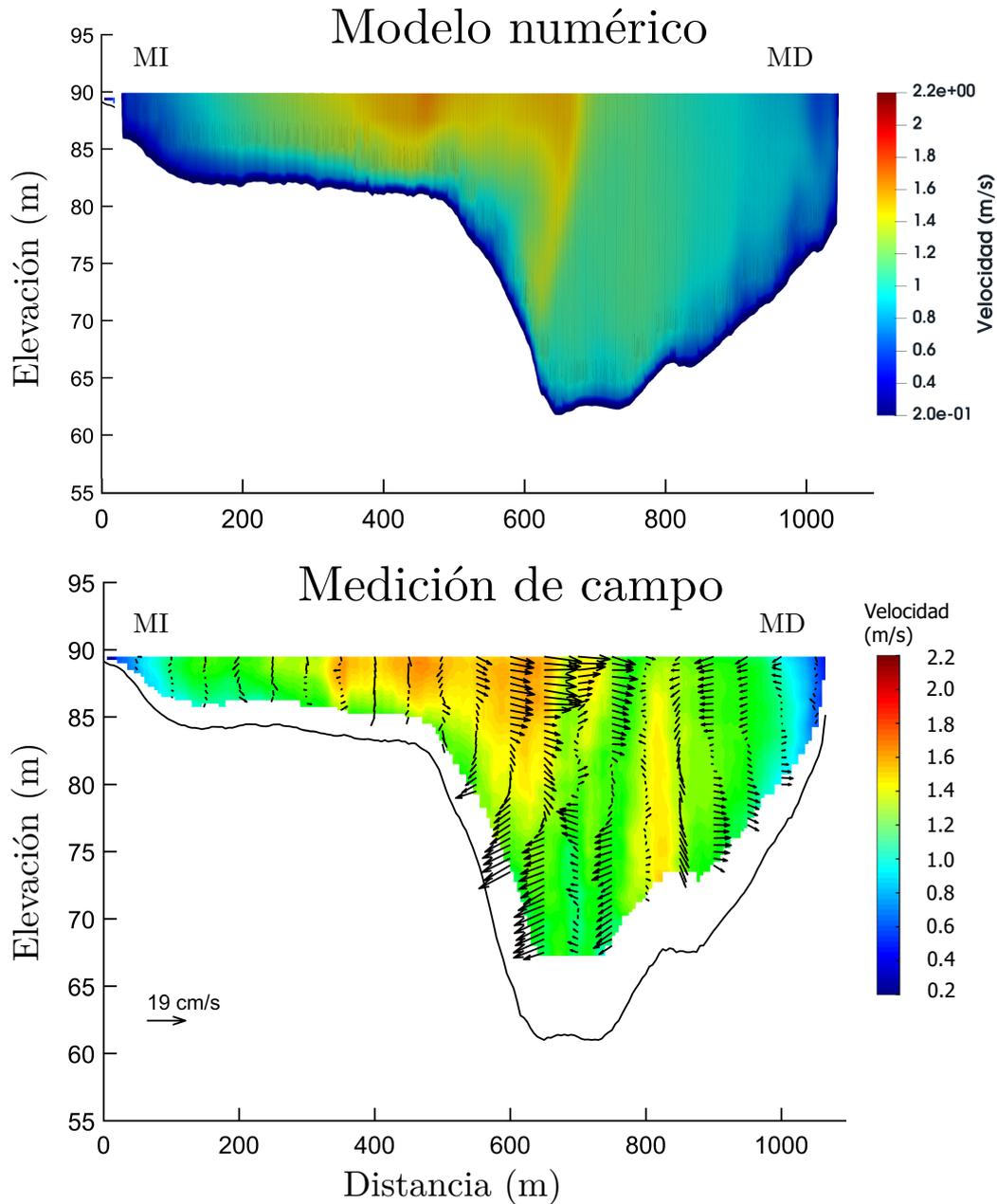


FIGURA N° 5.30: Validación de la sección A02 (Caso I).

La Figura N° 5.31, representa la gráfica de la velocidad a lo largo de la sección A02 a una profundidad del 25 % H_{med} . El valor de H_{med} es de 13 m este valor fue medida en campo, para mayor información revisar la Tabla N° 3.3. La Figura N° 5.31, se muestra que el modelo numérico se ajusta muy bien a la medición de campo, y que

solo en el tramo de 800 m hasta los 1000 m existe una ligera subestimación.

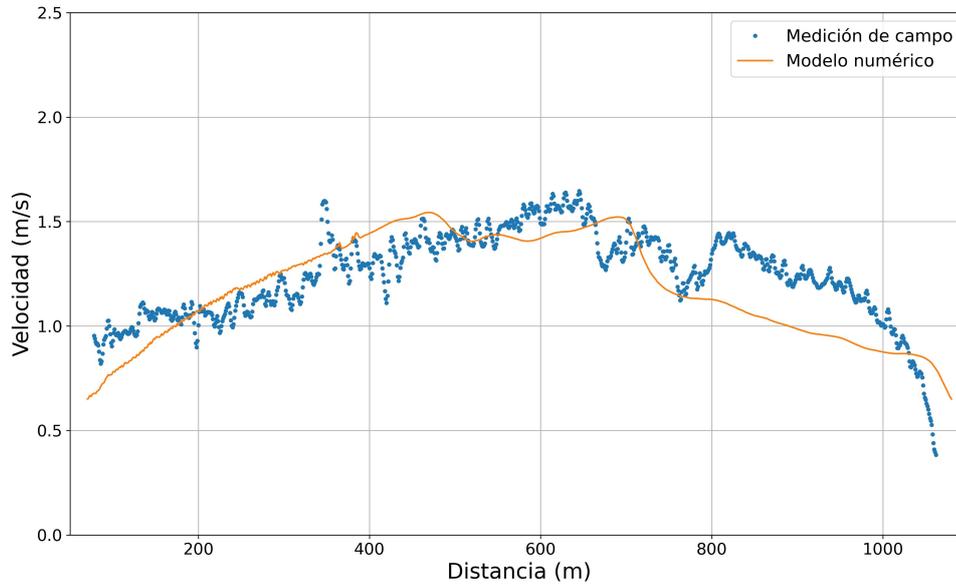


FIGURA N° 5.31: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 25% H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.32, muestra un buen ajuste del modelo numérico con respecto a las mediciones de campo, y se conserva la subestimación de modelo numérico como en el caso de la Figura N° 5.31.

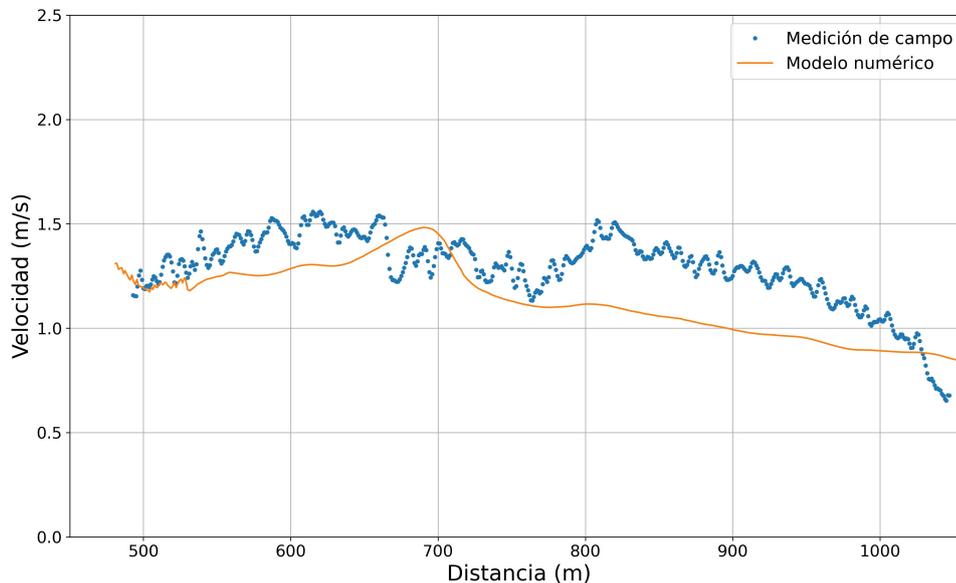


FIGURA N° 5.32: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 50% H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.33 y la Figura N° 5.34, se observa que el modelo numérico se ajusta muy bien a la medición de campo, a mayor profundidad existe una menor diferencia entre los resultados de modelo numérico comparado con la medición de campo.

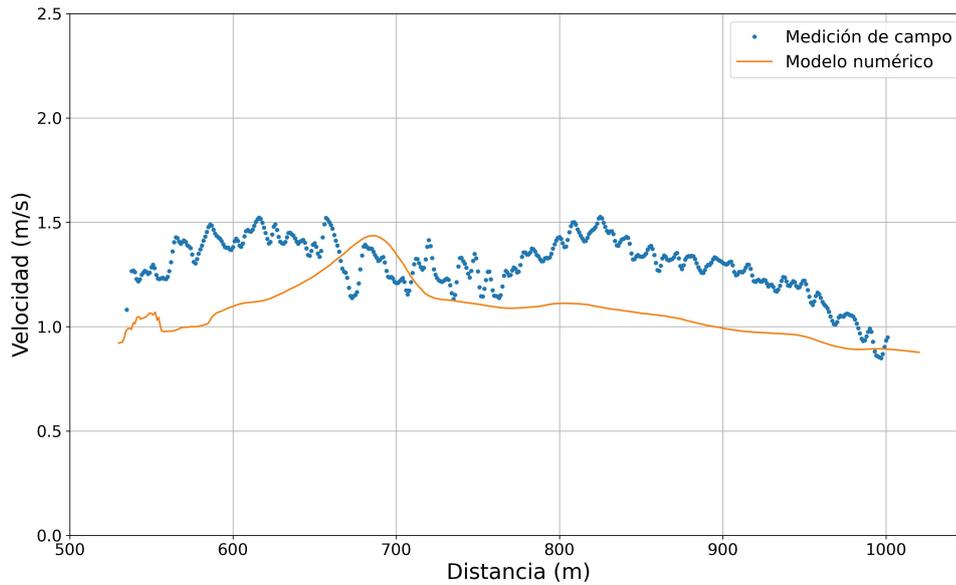


FIGURA N° 5.33: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 75% H_{med} (Caso I).

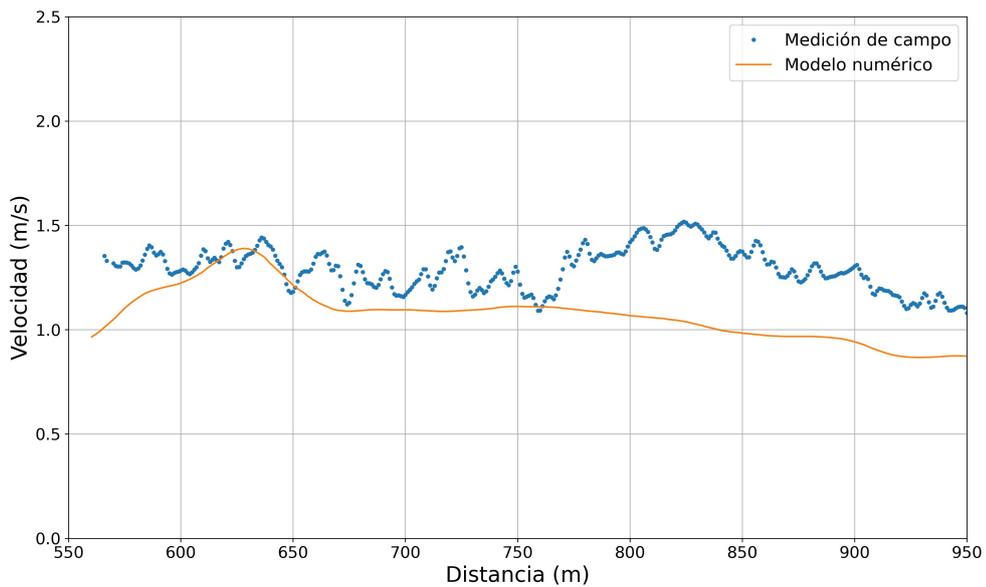


FIGURA N° 5.34: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 100% H_{med} (Caso I).

La comparación de la velocidad en la sección A03 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.35, el modelo numérico replicó la hidrodinámica de la sección A03. Se observa que la máxima velocidad se encuentra en la margen izquierda, y cerca a la margen derecha se puede observar una menor velocidad, la cual fue replicada por el modelo numérico.

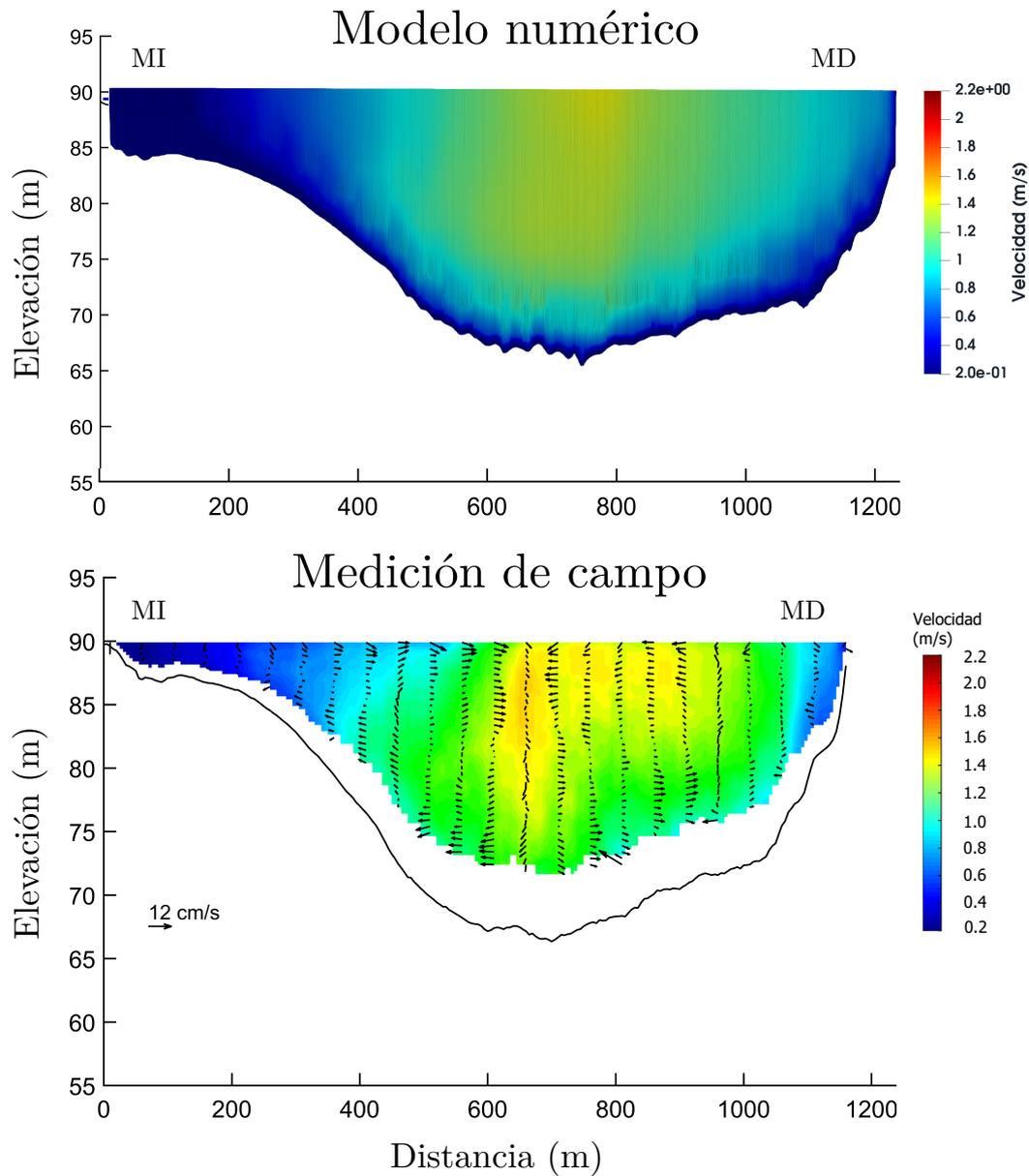


FIGURA N° 5.35: Validación de la sección A03 (Caso I).

La Figura N° 5.36, representa la gráfica de la velocidad a lo largo de la sección A02 a una profundidad del 25 % H_{med} . El valor de H_{med} es de 14.1 m este valor fue medida en campo, para mayor información revisar la Tabla N° 3.3. La Figura N° 5.36, muestra que el modelo numérico se ajusta de manera adecuada a la medición de campo, y que solo en el tramo de 800 m hasta los 1100 m existe una pequeña subestimación.

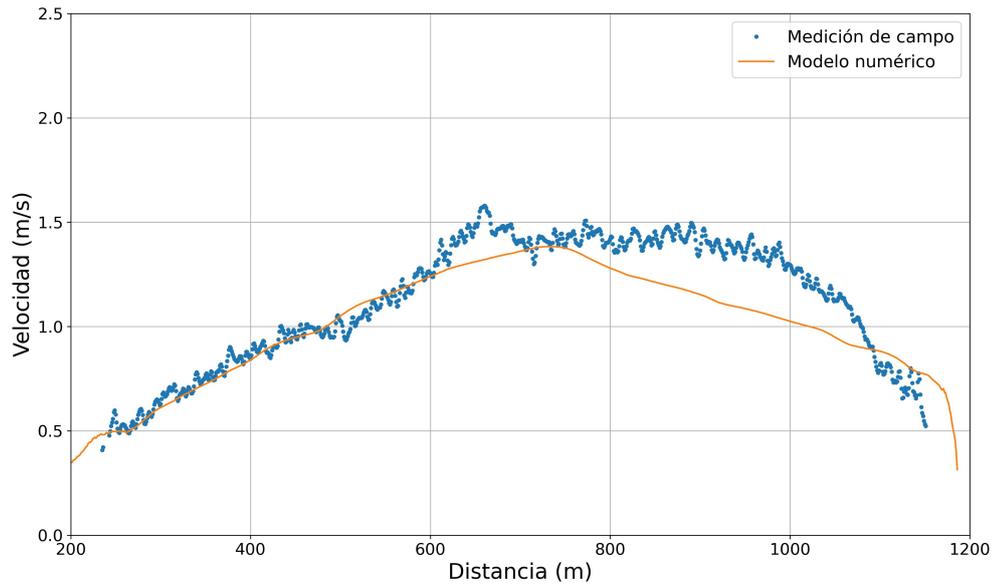


FIGURA N° 5.36: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 25% H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.37, muestra un buen ajuste del modelo numérico con respecto a las mediciones de campo, y la subestimación de modelo numérico es menor comparado con el caso de la Figura N° 5.31.

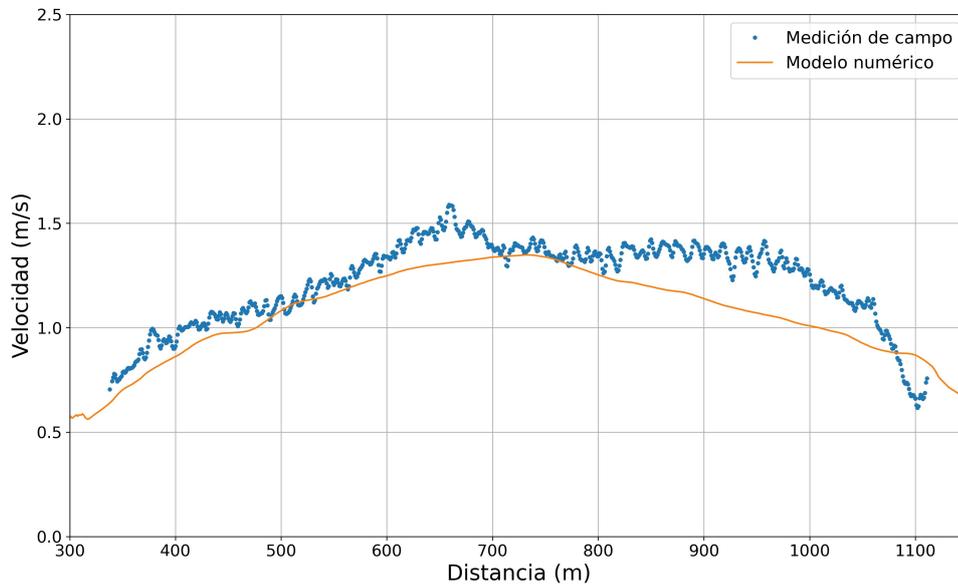


FIGURA N° 5.37: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 50% H_{med} (Caso I).

La Figura N° 5.38 y la Figura N° 5.39, se observa que el modelo numérico se ajusta adecuadamente a la medición de campo, a mayor profundidad existe un mejor ajuste de los resultados del modelo numérico comparado con la medición de campo.

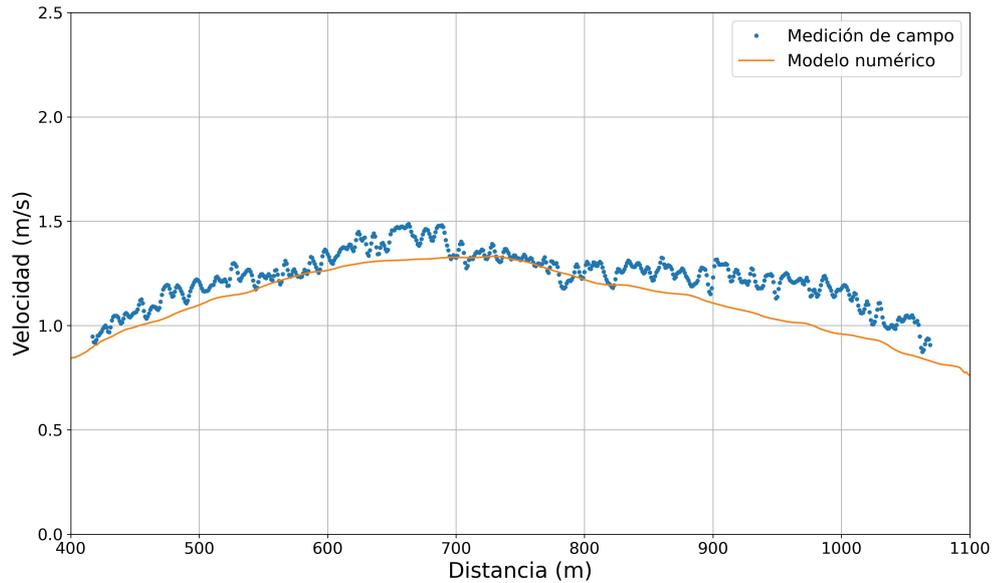


FIGURA N° 5.38: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 75% H_{med} (Caso I).

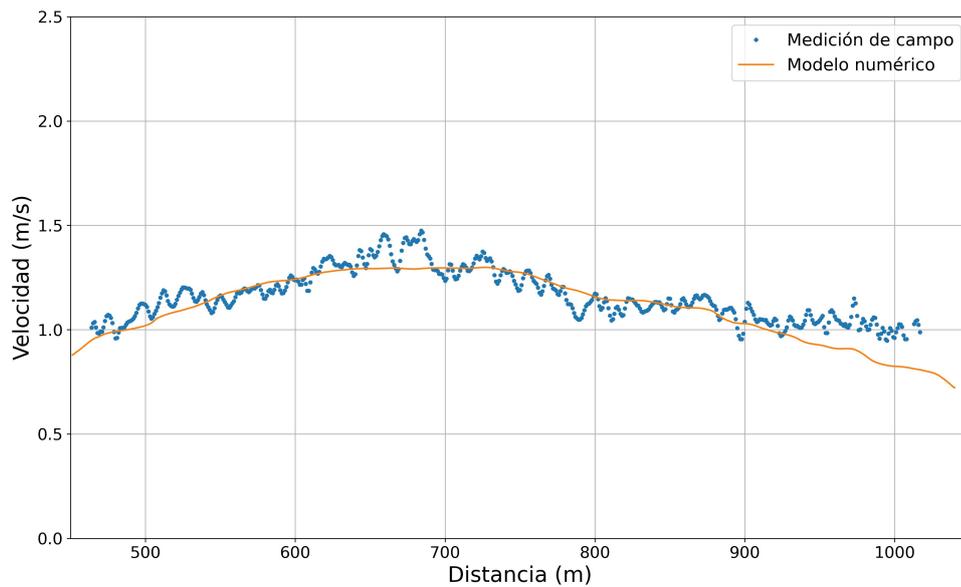


FIGURA N° 5.39: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 100% H_{med} (Caso I).

5.3.2 Validación del modelo numérico tridimensional Caso II

La comparación de la velocidad en la sección A01 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.40, el modelo numérico replica la hidrodinámica de la sección A01. Se observa que la máxima velocidad se encuentra en la margen derecha de la sección, esta velocidad se encuentra influenciado por el río Ucayali.

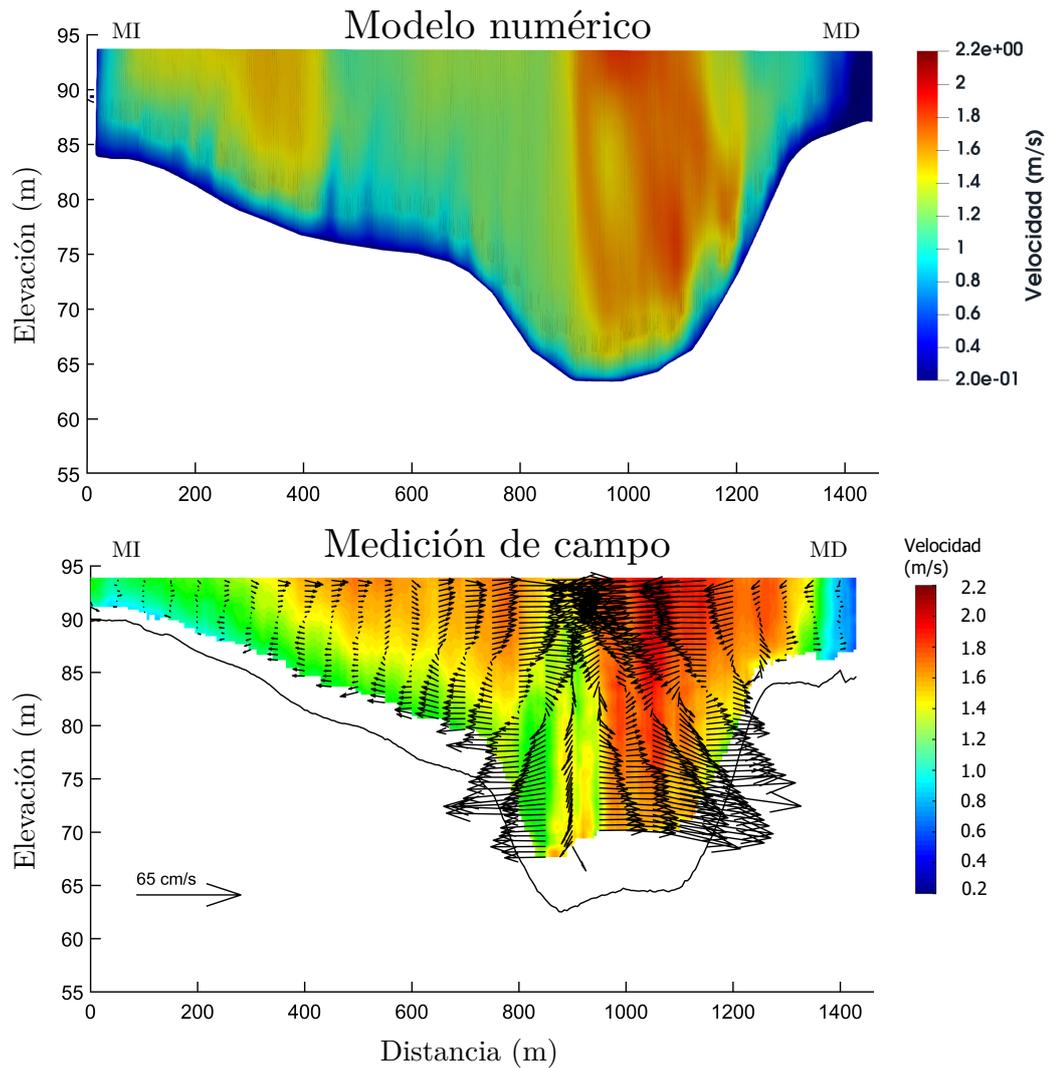


FIGURA N° 5.40: Validación de la sección A01 (Caso II).

La Figura N° 5.41, representa la gráfica de la velocidad a lo largo de la sección A01 a una profundidad del $25\%H_{med}$. El valor de H_{med} es de 16 m este valor fue medida en campo, para mayor información revisar la Tabla N° 3.6. La Figura N° 5.41 muestra que el modelo numérico subestima el valor de la velocidad en algunas zonas de la sección, no obstante la diferencia entre el modelo numérico y la medición de campo es pequeña.

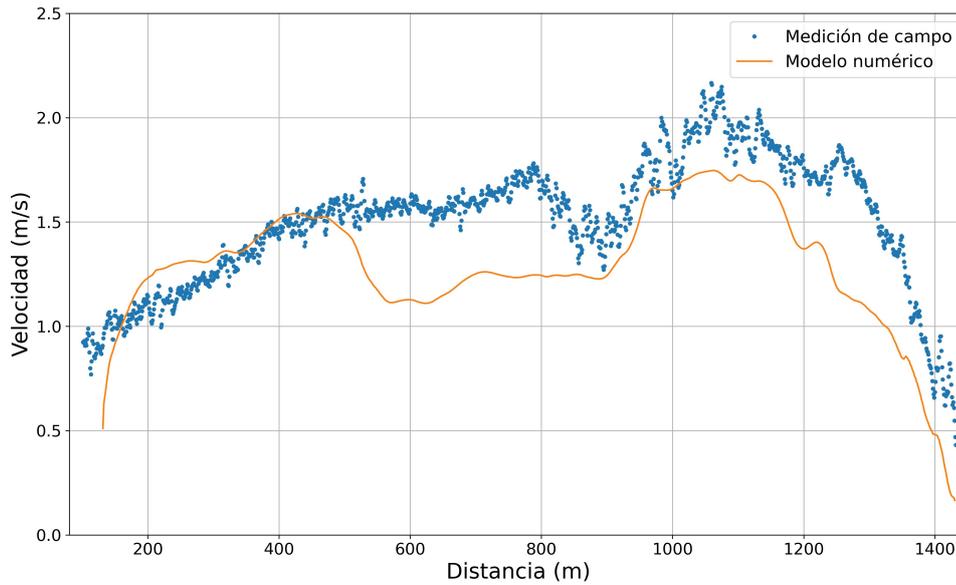


FIGURA N° 5.41: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 25% H_{med} (Caso II).

La Figura N° 5.42, muestra una mejor concordancia del modelo numérico con las mediciones de campo, se puede observar que la sobrestimación entre el tramo de 600 m hasta los 800 m se ha reducido en comparación con la Figura N° 5.41.

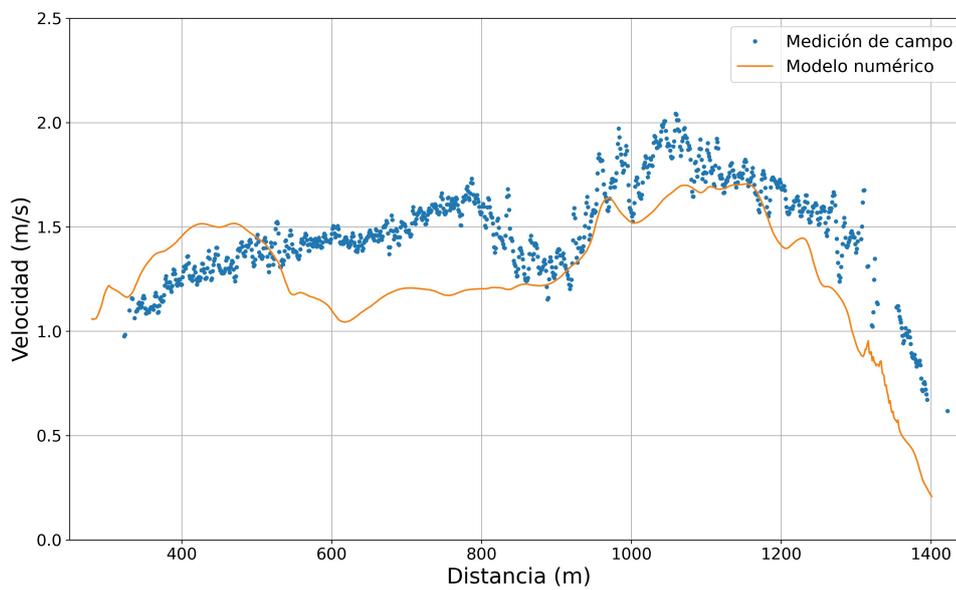


FIGURA N° 5.42: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 50% H_{med} (Caso II).

La Figura N° 5.43 y la Figura N° 5.44, se observa que el modelo numérico se ajusta muy bien a la medición de campo, a mayor profundidad existe una menor diferencia entre los resultados de modelo numérico comparado con la medición de campo.

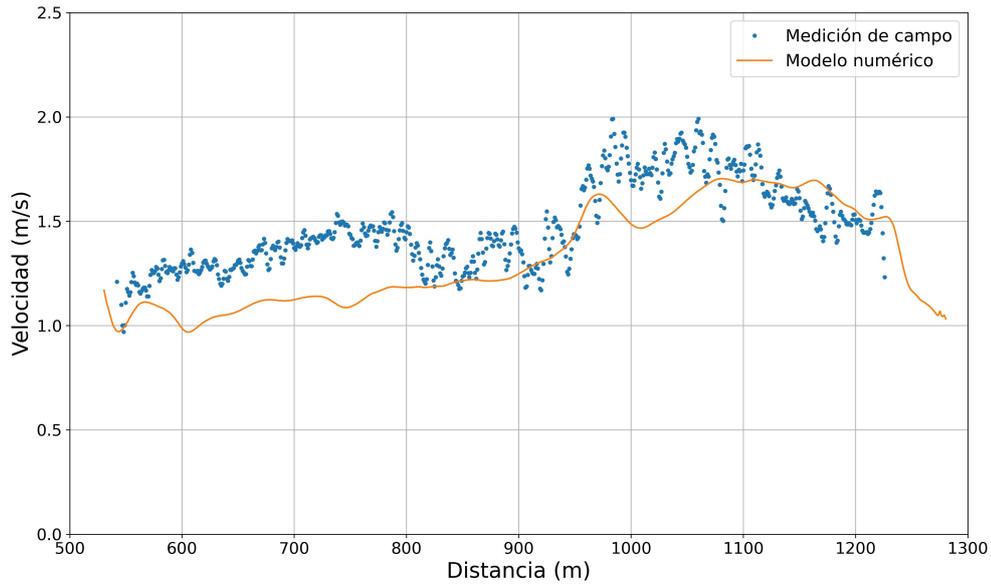


FIGURA N° 5.43: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 75% H_{med} (Caso II).

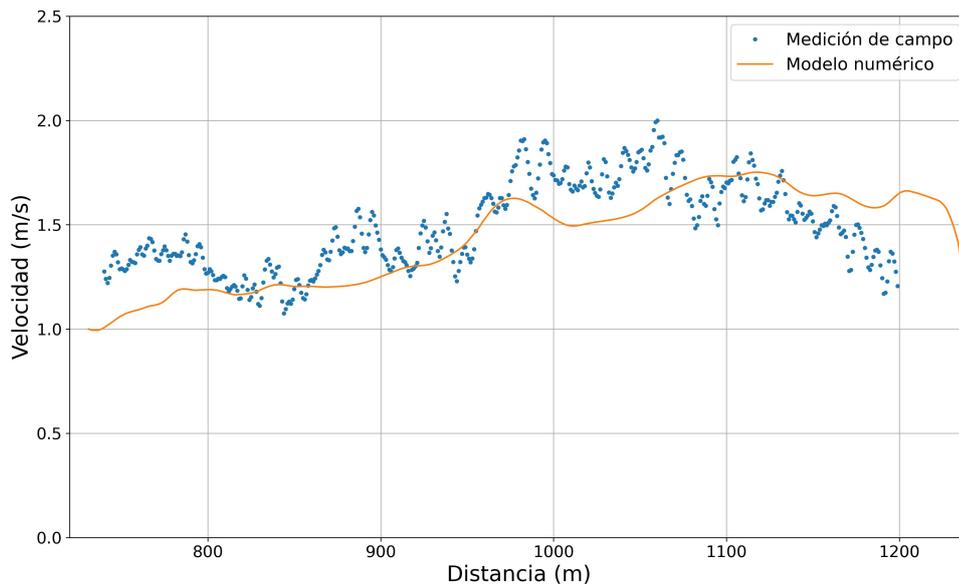


FIGURA N° 5.44: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A01 a una profundidad del 100% H_{med} (Caso II).

La comparación de la velocidad en la sección A02 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.45, el modelo numérico replica la hidrodinámica de la sección A02. Se observa que la máxima velocidad se encuentra en el centro de la sección.

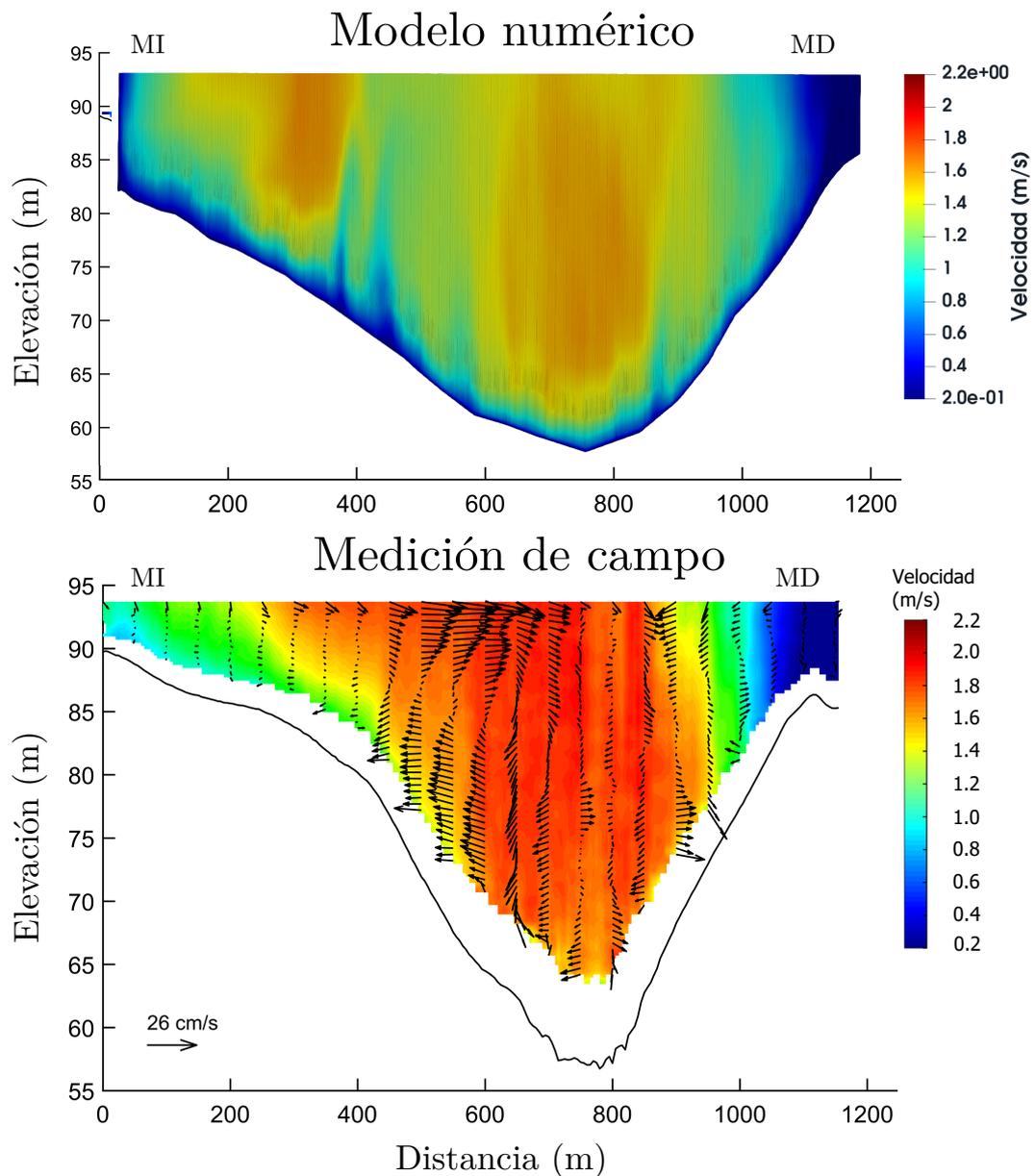


FIGURA N° 5.45: Validación de la sección A02 (Caso II).

La Figura N° 5.46, representa la gráfica de la velocidad a lo largo de la sección A02 a una profundidad del 25 % H_{med} . El valor de H_{med} es de 17.8 m este valor fue medida en campo, para mayor información revisar la Tabla N° 3.6. La Figura N° 5.46, se observa que modelo numérico presenta una sobreestimación en el tramo de 100 m hasta los 300 m, mientras que subestima entre el tramo de 400 m hasta los 900 m a las mediciones de campo realizadas.

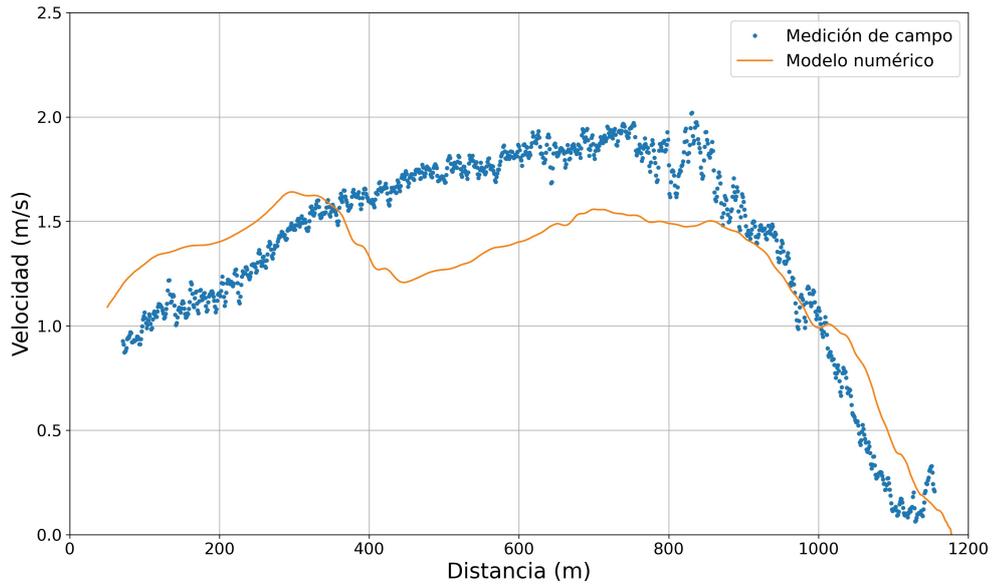


FIGURA N° 5.46: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 25% H_{med} (Caso II).

La Figura N° 5.47, muestra un buen ajuste del modelo numérico con respecto a las mediciones de campo, y la diferencia de la subestimación de modelo numérico con respecto a la medición de campo es menor.

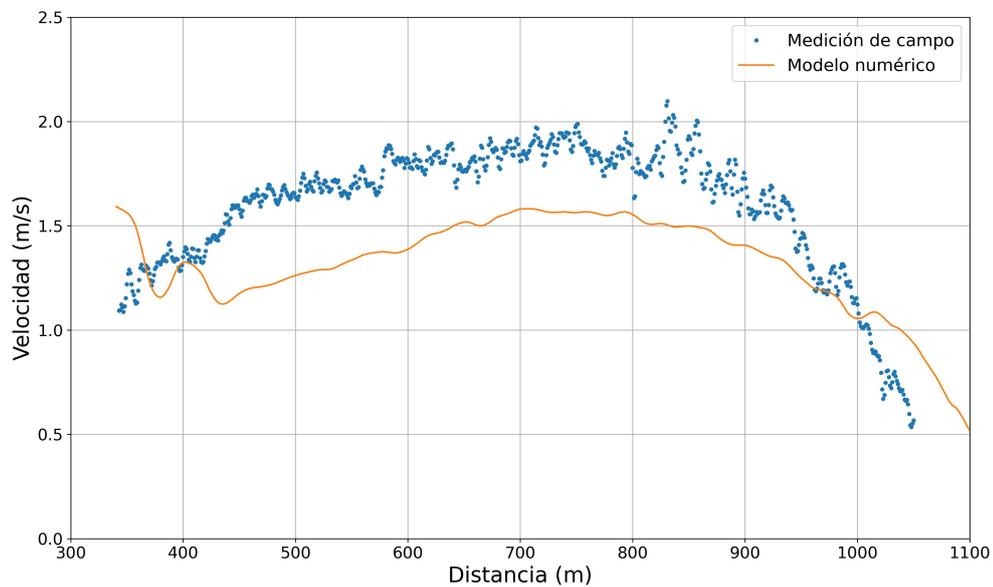


FIGURA N° 5.47: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 50% H_{med} (Caso II).

La Figura N° 5.48 y la Figura N° 5.49, se observa que el modelo numérico se ajusta muy bien a la medición de campo, a mayor profundidad existe un mejor ajuste de los resultados del modelo numérico comparado con la medición de campo.

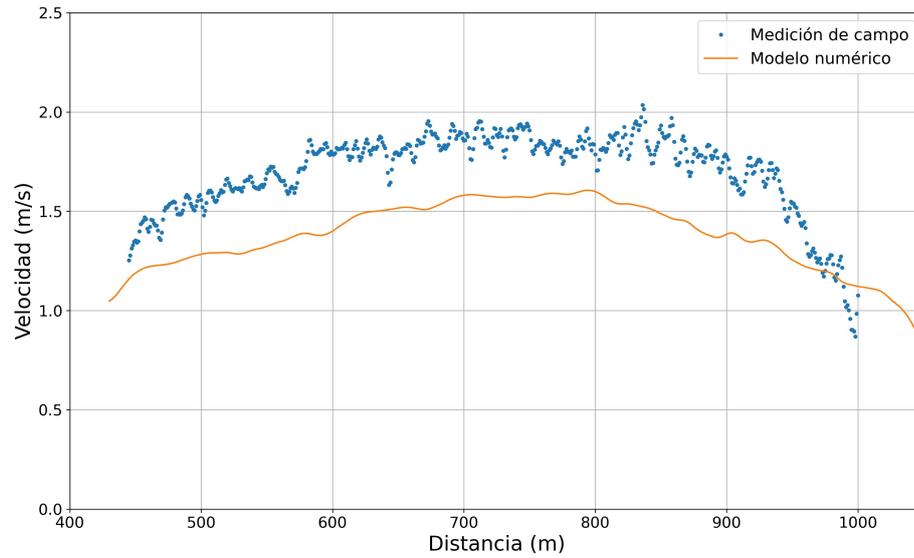


FIGURA N° 5.48: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 75% H_{med} (Caso II).

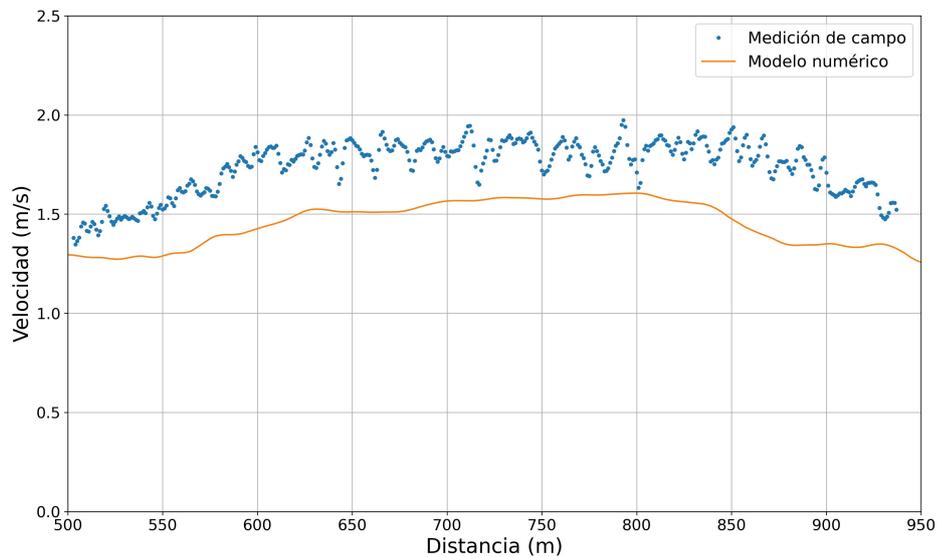


FIGURA N° 5.49: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A02 a una profundidad del 100% H_{med} (Caso II).

La comparación de la velocidad en la sección A03 entre el modelo numérico y la medición de campo se muestra en la Figura N° 5.50, el modelo numérico replicó la hidrodinámica de la sección A03. Se observa que la máxima velocidad se encuentra al centro de la sección y cerca de la margen izquierda.

No obstante, se puede observar una diferencia en la forma de la sección entre el modelo numérico y la medición de campo, a pesar de que la batimetría del modelo del Caso II fue medida en temporada de creciente, esta medición corresponde a una fecha distinta a la medición de la sección A03, para mayor información revisar

el capítulo 3.3.2.

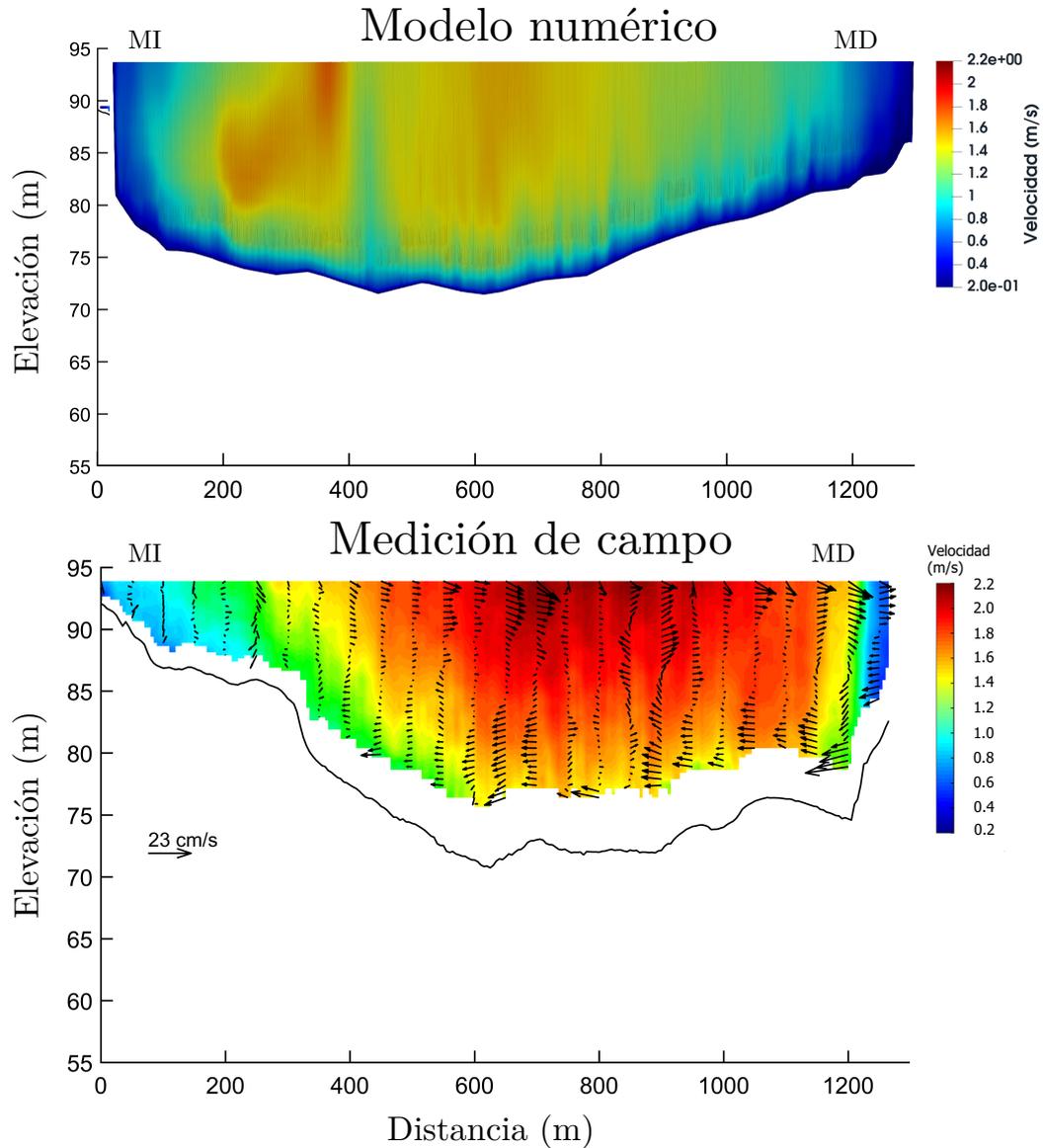


FIGURA N° 5.50: Validación de la sección A03 (Caso II).

La Figura N° 5.51, representa la gráfica de la velocidad a lo largo de la sección A03 a una profundidad del $25\%H_{med}$. El valor de H_{med} es de 15.8 m este valor fue medida en campo, para mayor información revisar la Tabla N° 3.6. La Figura N° 5.51, se muestra que el modelo numérico se ajusta muy bien a la medición de campo, y que en el tramo de 500 m hasta los 1200 m existe una subestimación del modelo numérico.

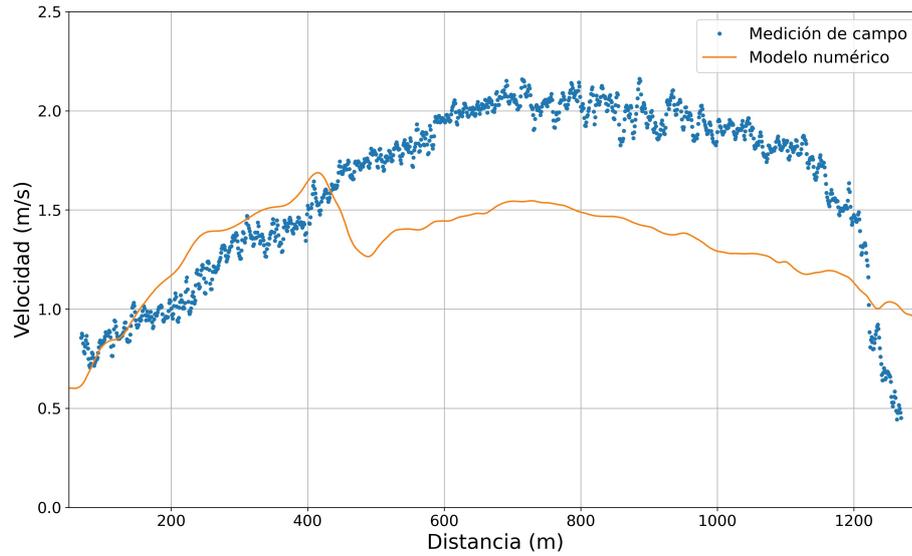


FIGURA N° 5.51: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 25% H_{med} (Caso II).

La Figura N° 5.52, muestra un buen ajuste del modelo numérico con respecto a las mediciones de campo, y la subestimación de modelo numérico es menor comparado con el caso de la Figura N° 5.51.

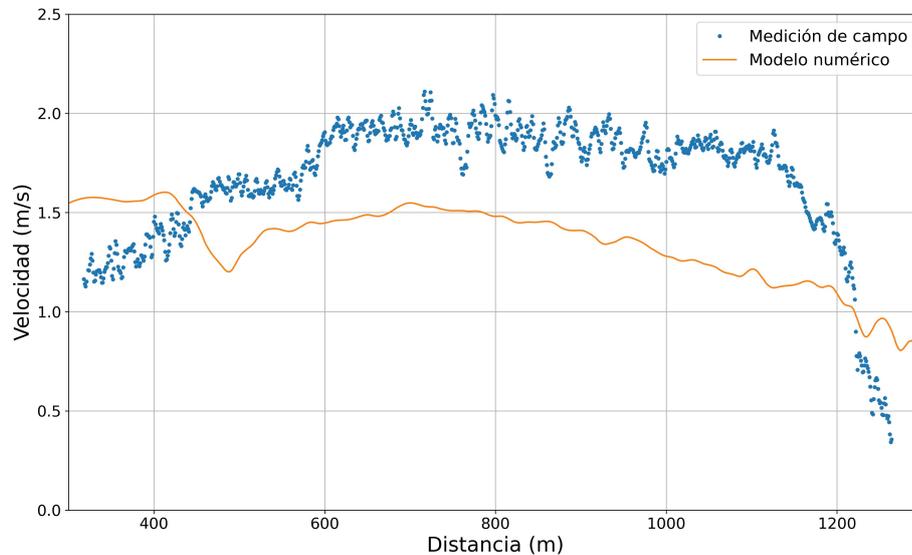


FIGURA N° 5.52: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 50% H_{med} (Caso II).

La Figura N° 5.53 y la Figura N° 5.54, se observa que el modelo numérico se ajusta muy bien a la medición de campo, a mayor profundidad existe un mejor ajuste de los resultados del modelo numérico comparado con la medición de campo.

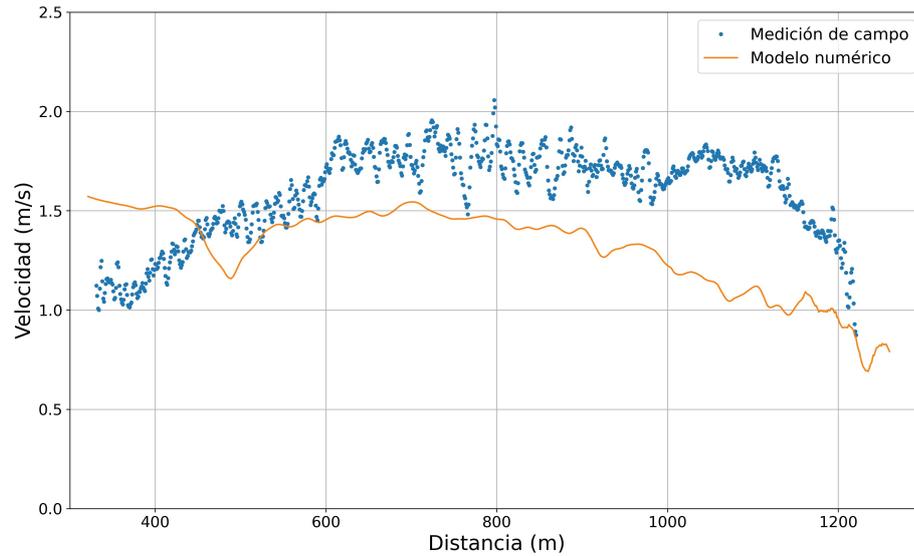


FIGURA N° 5.53: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 75% H_{med} (Caso II).

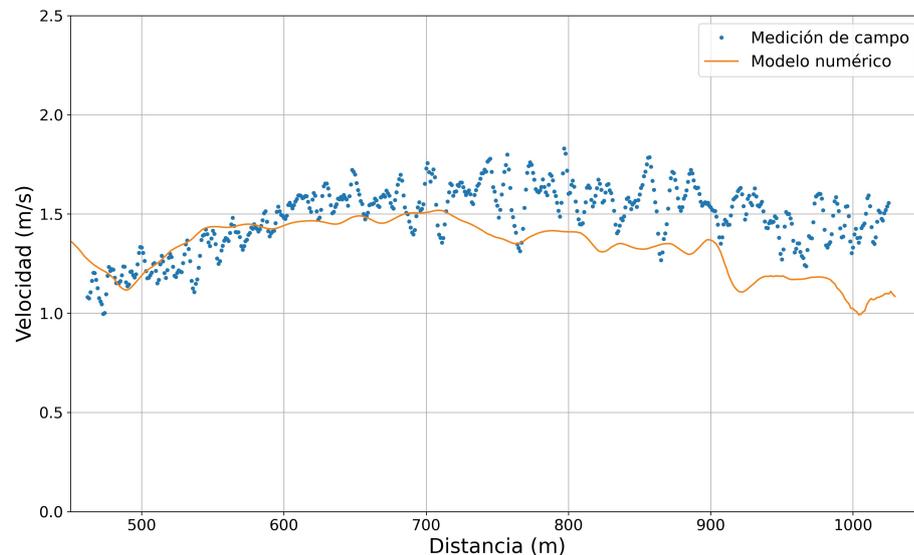


FIGURA N° 5.54: Gráfica de velocidad a lo largo del ancho de la sección A03 a una profundidad del 100% H_{med} (Caso II).

5.4 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO SECUNDARIO

El comportamiento del flujo secundario dentro del modelo numérico tridimensional, fue validada con los resultados del flujo secundario medido en campo. El flujo secundario en las mediciones de campo fueron graficados a partir de los vectores de velocidad transversal y vertical, la Figura N° 5.56 representa el flujo secundario representado con vectores de color negro en la sección transversal. En el caso del modelo numérico, el flujo secundario fue graficado a partir de la descomposición de la velocidad del flujo principal (representado por los colores) en cada sección. La

velocidad del modelo numérico en cada sección, fue descompuesta en la dirección horizontal “X” y en dirección vertical “Z”.

5.4.1 Desarrollo del flujo secundario en el Caso I

En la Figura N° 5.55, se puede observar la velocidad transversal en la dirección “X” y la velocidad vertical en la dirección “Z” del modelo numérico en la sección A01. Se observa que la dirección de la velocidad se grafica con flechas de color amarillo indicando la dirección de la velocidad.

En la Figura N° 5.55 se observa que la máxima velocidad en la dirección “Z” hacia abajo está representada por una zona de color azul, mientras que la máxima velocidad con dirección hacia arriba está representada con una zona de color rojo. Se observa dos zonas marcadas de dirección hacia abajo entre los tramos de 900 m a 1250 m, y a los costados de estos se ve una velocidad con dirección hacia arriba.

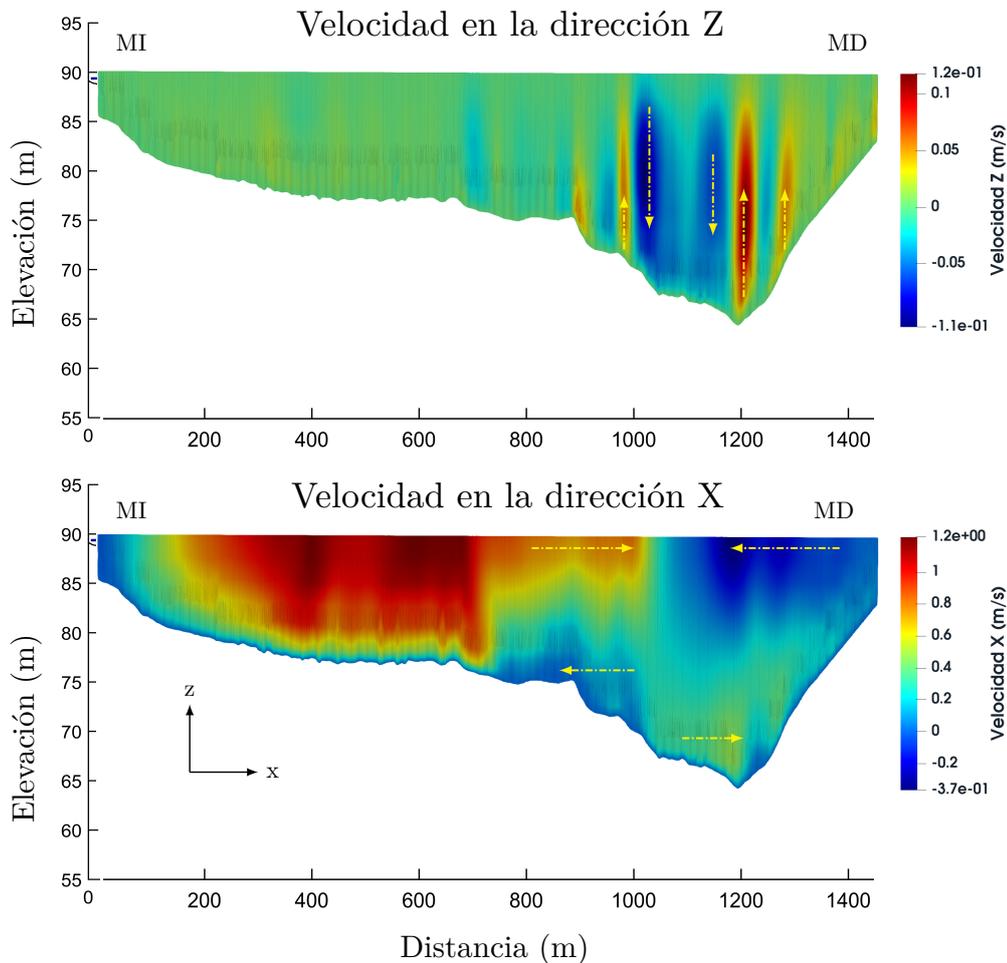


FIGURA N° 5.55: Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A01 (Caso I).

La velocidad en dirección "X", se observa que la máxima velocidad con dirección hacia la margen derecha está representada por un color rojo, mientras que la (máxima) velocidad con dirección hacia la margen izquierda está representada con un color azul. Además, se observa que cerca a la superficie del agua se presenta una convergencia de los vectores de la velocidad, mientras que en el fondo de la sección se presenta una divergencia de la velocidad entre los tramos de 900 m a 1250 m.

Luego del analizar la velocidad transversal y vertical del modelo numérico (Figura N° 5.55), se grafica el flujo secundario en la sección A01 y fue comparada con el resultado de la medición de campo. La Figura N° 5.56, muestra el resultado del flujo secundario del modelo numérico en la sección A01, se observa que el modelo numérico logró replicar los dos flujos secundarios que giran en sentido contrario.

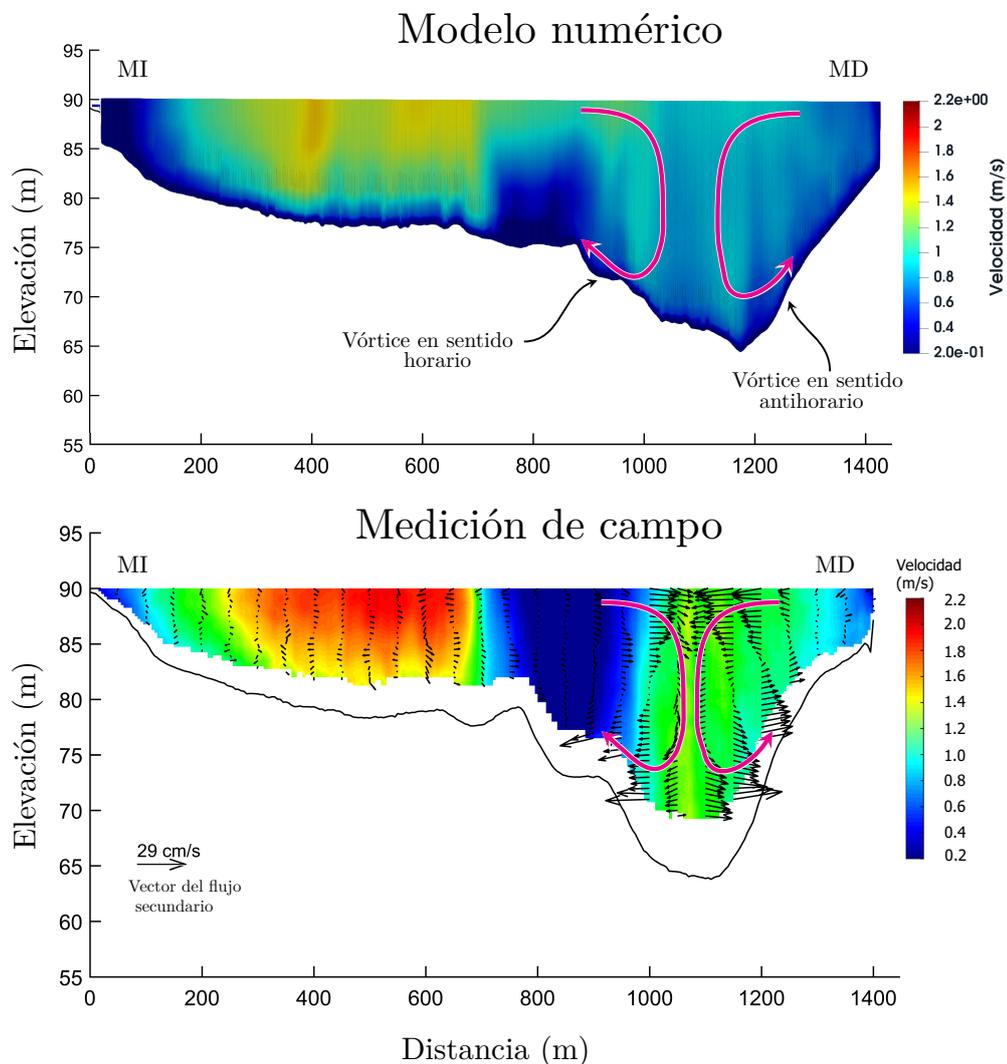


FIGURA N° 5.56: Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A01 (Caso I).

En la Figura N° 5.56 se muestran dos vórtices en la sección transversal. En el lado izquierdo se forma un vórtice en sentido horario y en la margen derecha un vórtice en antihorario. Estos flujos secundarios son convergentes en la superficie, y luego descienden para divergir en el lecho y posteriormente ascender a las márgenes (Figura N° 5.56). El flujo secundario dentro del modelo se encuentra un poco más separado en comparación con la medición de campo, no obstante ambos se encuentran entre el tramo de 800 m a 1200 m aproximadamente.

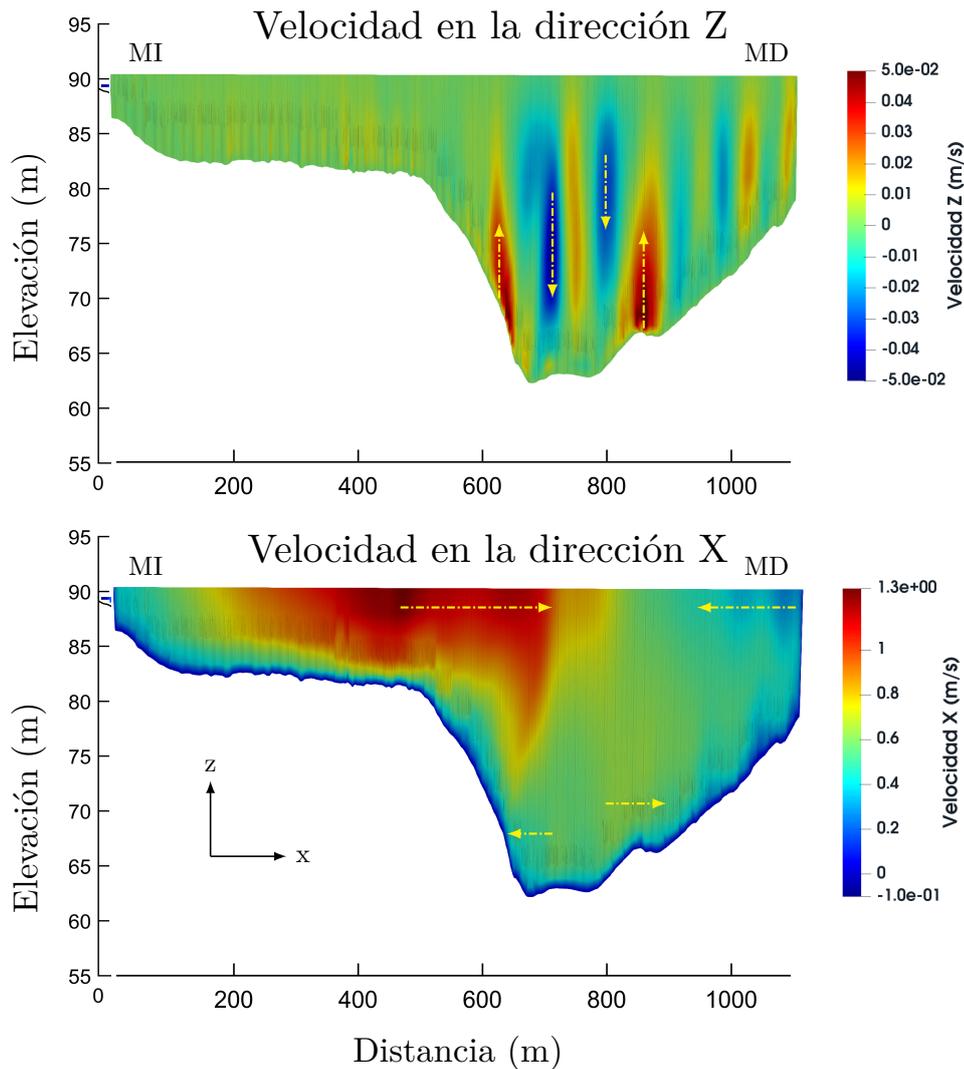


FIGURA N° 5.57: Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A02 (Caso I).

En la Figura N° 5.57, se puede observar la velocidad transversal en la dirección "X" y la velocidad vertical en la dirección "Z" del modelo numérico en la sección A02. Se observa que la dirección de la velocidad se grafica con flechas de color amarillo indicando la dirección de la velocidad. Se muestra la velocidad en la dirección "Z",

se observa dos zonas de velocidad con dirección hacia abajo, y a su vez a los costados de estos una velocidad con dirección hacia arriba entre los tramos de 600 m a 1000 m.

La velocidad en dirección "X", se observa que cerca a la superficie del agua se presenta una convergencia de los vectores de la velocidad, mientras que en el fondo de la sección se presenta una divergencia de la velocidad entre los tramos de 600 m a 1000 m.

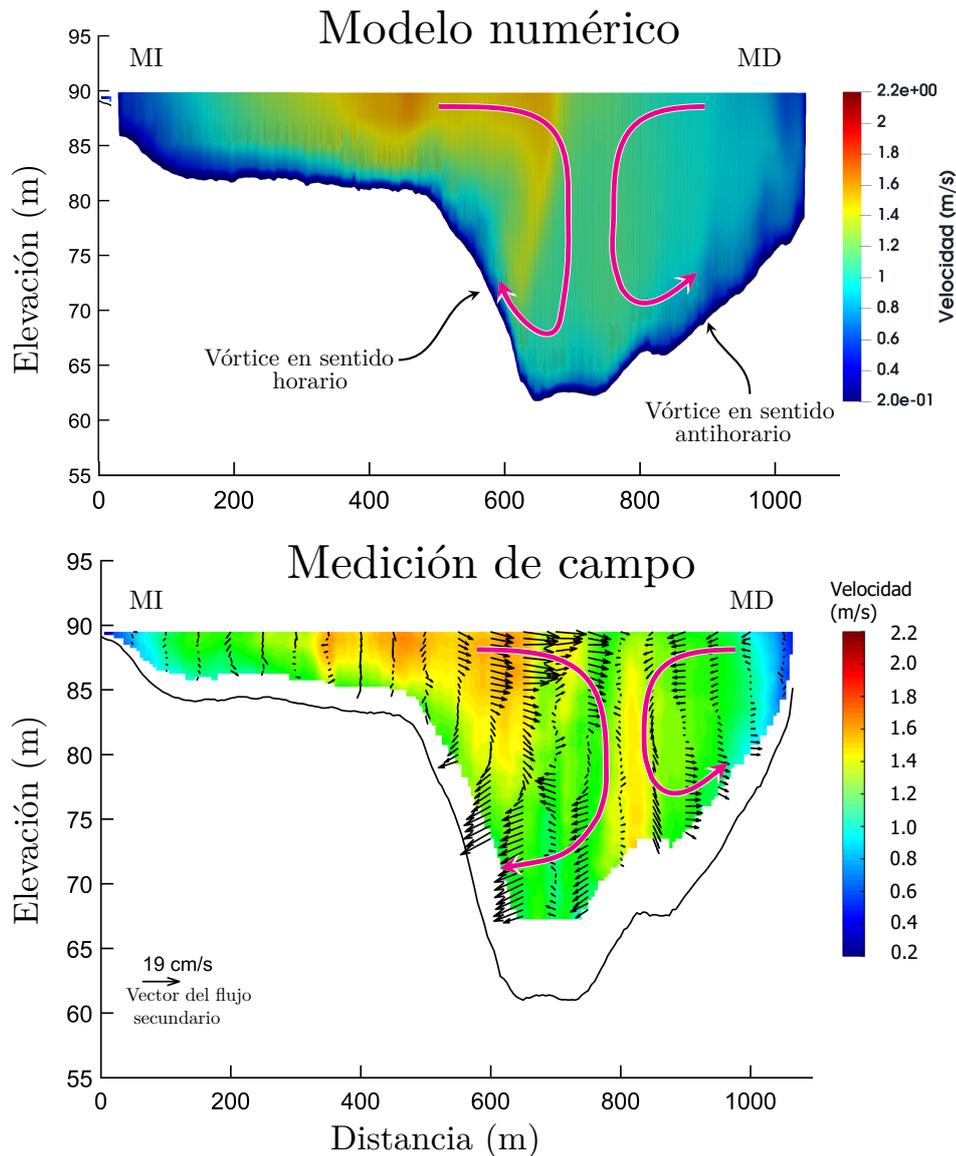


FIGURA N° 5.58: Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A02 (Caso I).

Luego de analizar la velocidad transversal y vertical del modelo numérico (Figura N° 5.57), se grafica el flujo secundario en la sección A02 y fue comparada con el

resultado de la medición de campo. La Figura N° 5.58, muestra el resultado del flujo secundario del modelo numérico en la sección A02, se observa que el modelo numérico logró replicar los dos flujos secundarios que giran en sentido contrario.

Estos flujos secundarios son convergentes (se encuentran) en la superficie, y luego descienden para divergir (se alejan) en el lecho y posteriormente ascender a las márgenes (Figura N° 5.58). El flujo secundario dentro del modelo se encuentra un poco más a la margen izquierda en comparación con la medición de campo, no obstante ambos se encuentran en el tramo de 600 m a 1000 m aproximadamente.

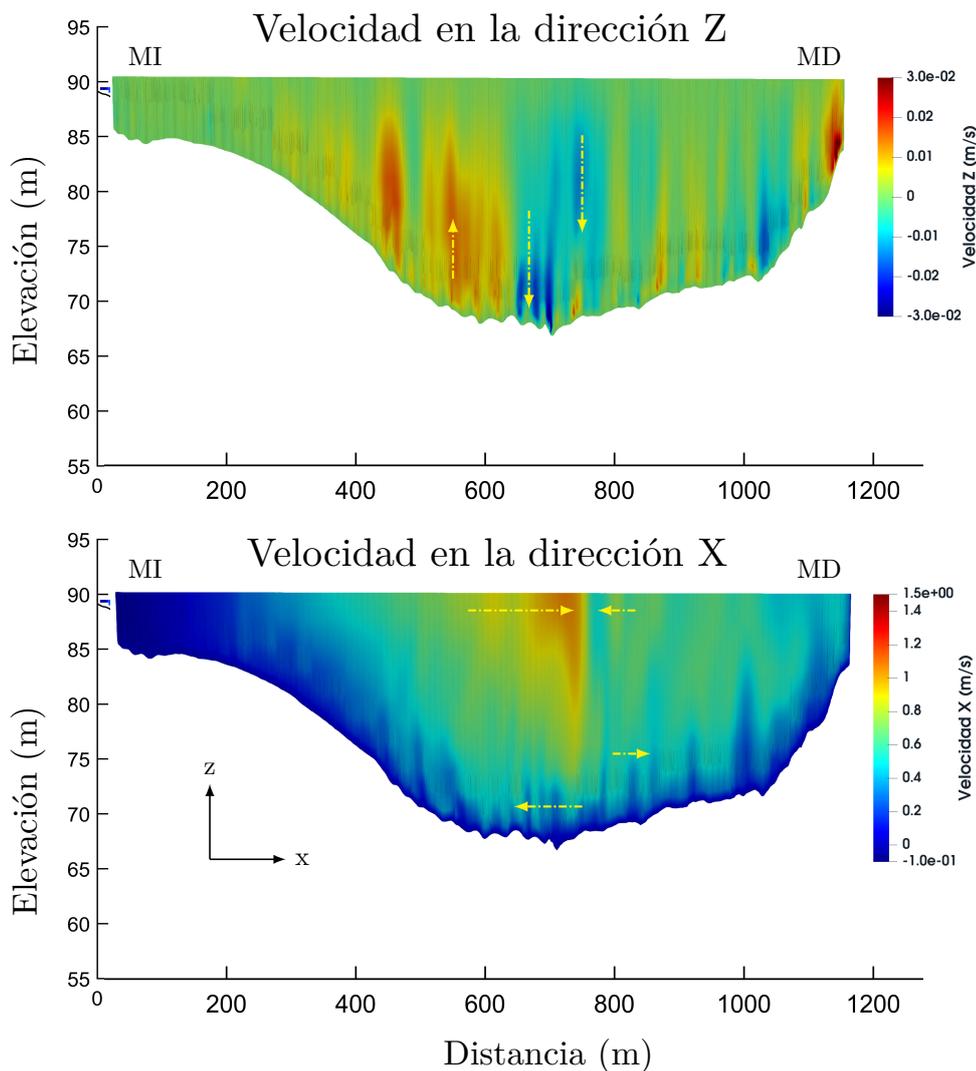


FIGURA N° 5.59: Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A03 (Caso I).

En la Figura N° 5.59, se puede observar la velocidad transversal en la dirección “X” y la velocidad vertical en la dirección “Z” del modelo numérico en la sección A03. La dirección de la velocidad se grafica con flechas de color amarillo indicando la

dirección de la velocidad. Se muestra la velocidad en la dirección “Z”, se observa dos zonas de velocidad con dirección hacia abajo, y a su vez a los costados de estos una velocidad con dirección hacia arriba entre los tramos de 500 m a 900 m.

La velocidad en dirección “X”, se observa que cerca a la superficie del agua se presenta una convergencia de los vectores de la velocidad, mientras que en el fondo de la sección se presenta una divergencia de la velocidad entre los tramos de 500 m a 900 m.

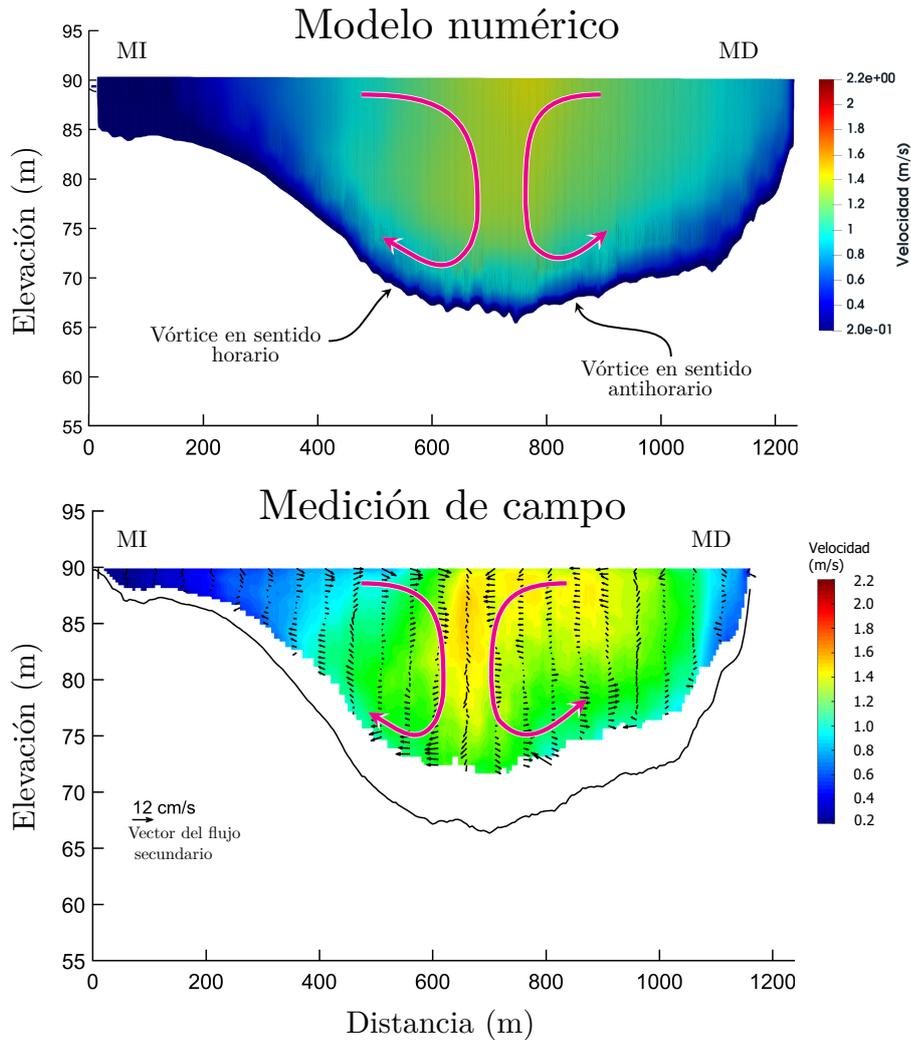


FIGURA N° 5.60: Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A03 (Caso I).

Luego del analizar la velocidad transversal y vertical del modelo numérico (Figura N° 5.59), se grafica el flujo secundario en la sección A03 y fue comparada con el resultado de la medición de campo. La Figura N° 5.60, muestra el resultado del flujo secundario del modelo numérico en la sección A3, se observa que el modelo numérico logro replicar los dos flujos secundarios que giran en sentido contrario.

Estos flujos secundarios son convergentes en la superficie, y luego descienden para divergir en el lecho y posteriormente ascender a los márgenes (Figura N° 5.60). El flujo secundario se encuentra entre el tramo de 500 m a 900 m aproximadamente.

5.4.2 Desarrollo del flujo secundario en el Caso II

En la Figura N° 5.61, se puede observar la velocidad transversal en la dirección "X" y la velocidad vertical en la dirección "Z" del modelo numérico en la sección A01. Se observa que la dirección de la velocidad se grafica con flechas de color amarillo indicando la dirección de la velocidad.

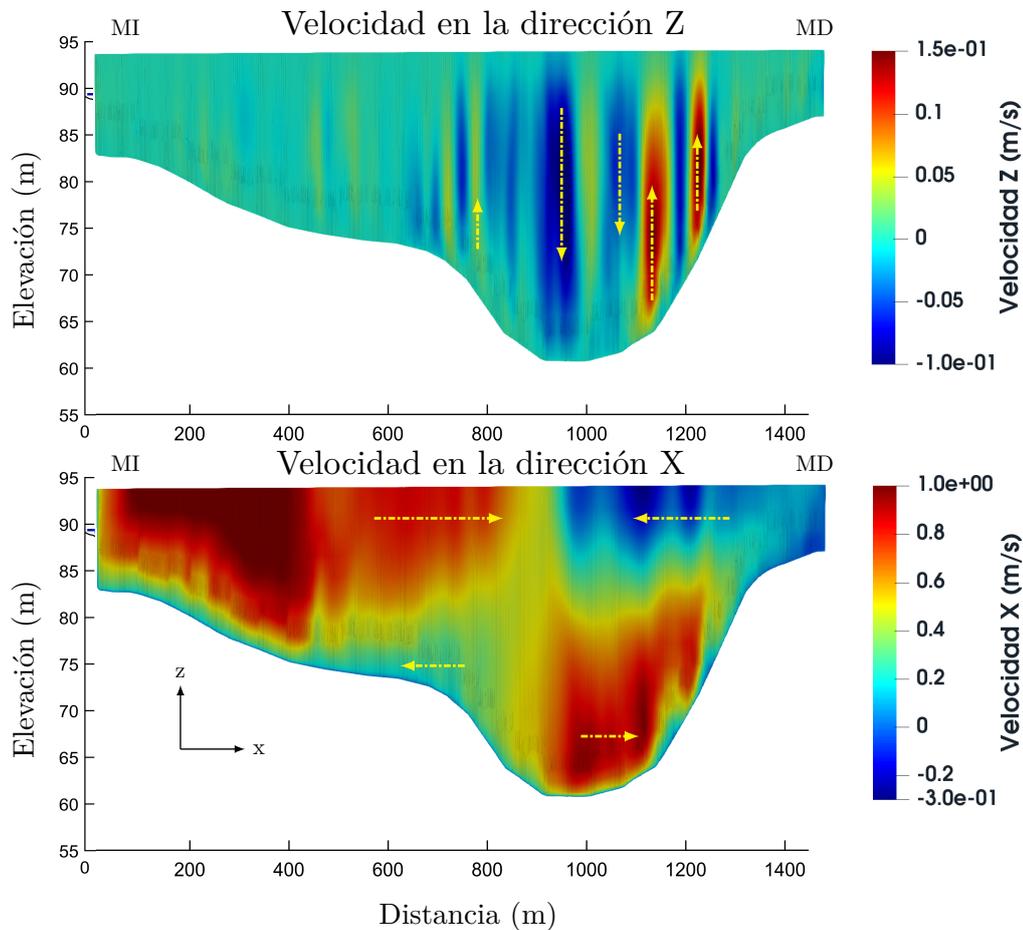


FIGURA N° 5.61: Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A01 (Caso II).

En la Figura N° 5.61 la velocidad en la dirección "Z", se observa que la máxima velocidad con dirección hacia abajo está representada por una zona de color azul, mientras que la máxima velocidad con dirección hacia arriba está representada con una zona de color rojo. Por lo tanto, se observa dos zonas marcadas de dirección hacia abajo entre los tramos de 800 m a 1200 m, y a su vez a los costados de estos

una velocidad con dirección hacia arriba, siendo más fuerte en la margen derecha de la sección.

La velocidad en dirección “X”, se observa que la máxima velocidad con dirección hacia la margen derecha está representada por un color rojo, mientras que la máxima velocidad con dirección hacia la margen izquierda está representada con un color azul. Además, se observa que cerca a la superficie del agua se presenta una convergencia de los vectores de la velocidad, mientras que en el fondo de la sección se presenta una divergencia de la velocidad entre los tramos de 500 m a 1300 m.

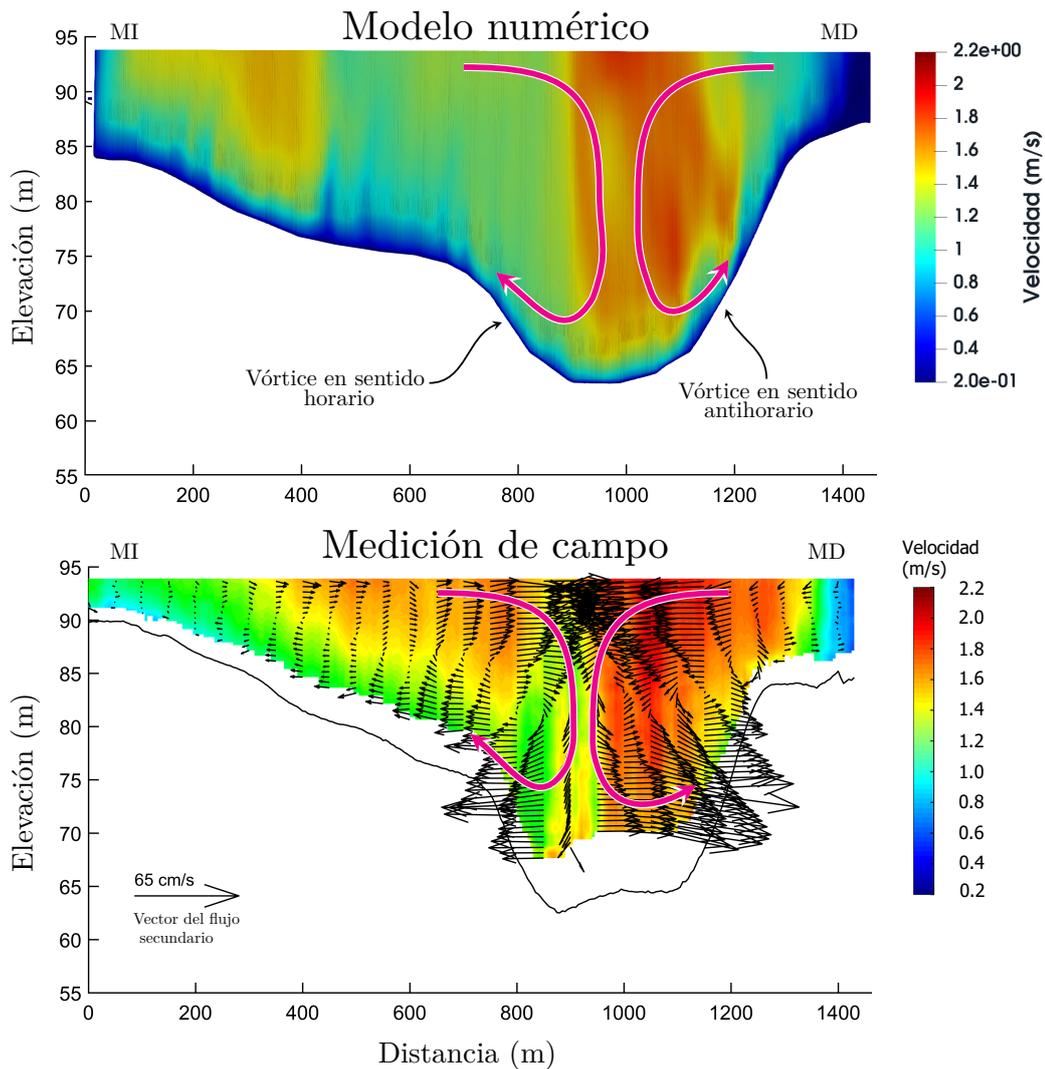


FIGURA N° 5.62: Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A01 (Caso II).

Luego del analizar la velocidad transversal y vertical del modelo numérico (Figura N° 5.61), se grafica el flujo secundario en la sección A01 y fue comparada con el resultado de la medición de campo. La Figura N° 5.62, muestra el resultado del

flujo secundario del modelo numérico en la sección A01, se observa que el modelo numérico logro replicar los dos flujos secundarios que giran en sentido contrario.

Estos flujos secundarios son convergentes en la superficie, y luego descienden para divergir en el lecho y posteriormente ascender a los márgenes (Figura N° 5.62). El flujo secundario dentro del modelo se encuentra un poco más a la margen derecha en comparación con la medición de campo, no obstante ambos se encuentran entre el tramo de 600 m a 1200 m aproximadamente.

En la Figura N° 5.63, se puede observar la velocidad transversal en la dirección "X" y la velocidad vertical en la dirección "Z" del modelo numérico en la sección A02. Se observa que la dirección de la velocidad se grafica con flechas de color amarillo indicando la dirección de la velocidad. Se muestra la velocidad en la dirección "Z", se observa dos zonas de velocidad con dirección hacia abajo, y a su vez a los costados de estos una velocidad con dirección hacia arriba entre los tramos de 500 m a 900 m.

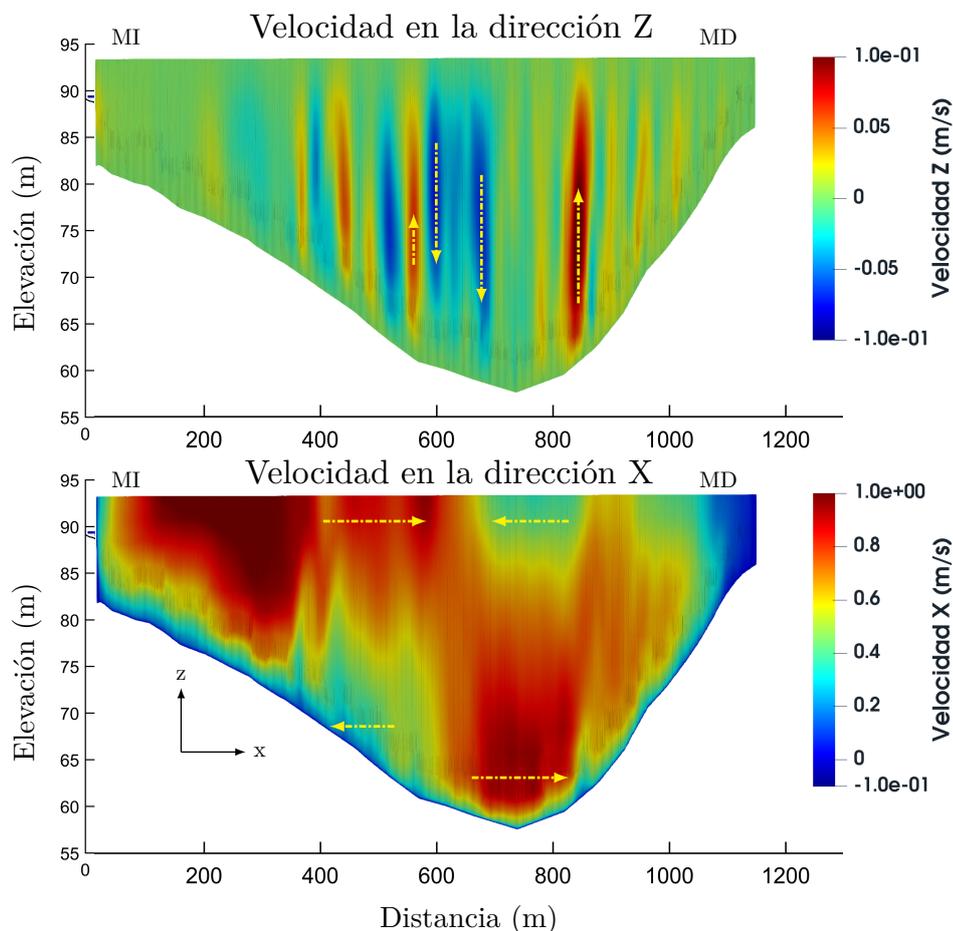


FIGURA N° 5.63: Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A02 (Caso II).

La velocidad en dirección "X", se observa que cerca a la superficie del agua se presenta una convergencia de los vectores de la velocidad, mientras que en el fondo de la sección se presenta una divergencia de la velocidad entre los tramos de 400 m a 1000 m.

Luego del analizar la velocidad transversal y vertical del modelo numérico (Figura N° 5.63), se grafica el flujo secundario en la sección A02 y fue comparada con el resultado de la medición de campo. La Figura N° 5.64, muestra el resultado del flujo secundario del modelo numérico en la sección A02, se observa que el modelo numérico logro replicar los dos flujos secundarios que giran en sentido contrario.

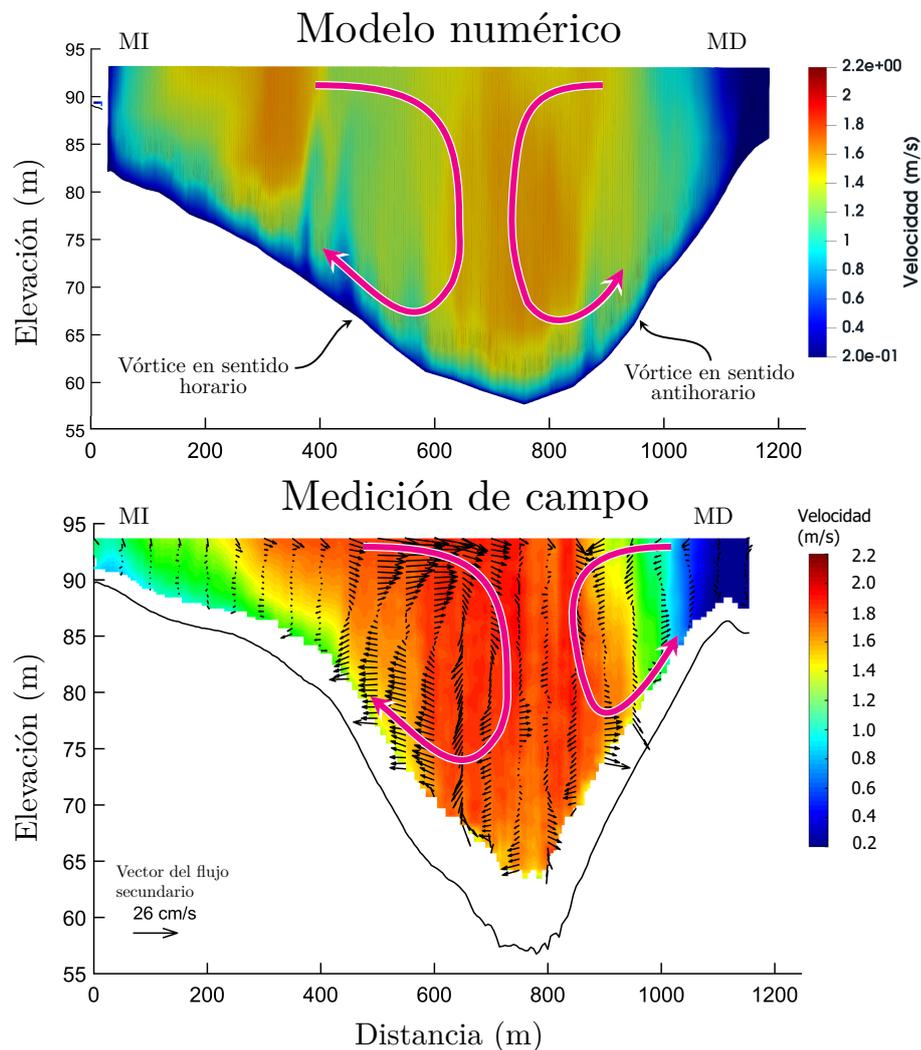


FIGURA N° 5.64: Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A02 (Caso II).

Estos flujos secundarios son convergentes en la superficie, y luego descienden para divergir en el lecho y posteriormente ascender a los márgenes (Figura N° 5.64). El flujo secundario dentro del modelo se encuentra un poco más a la margen izquierda

en comparación con la medición de campo, no obstante ambos se encuentran entre el tramo de 400 m a 1000 m aproximadamente.

En la Figura N° 5.65, se puede observar la velocidad transversal en la dirección “X” y la velocidad vertical en la dirección “Z” del modelo numérico en la sección A03. Se observa que la dirección de la velocidad se grafica con flechas de color amarillo indicando la dirección de la velocidad. Se muestra la velocidad en la dirección “Z”, se observa una zona de velocidad uniforme en toda la sección, lo que indica que no existe una velocidad máxima en medio de la sección.

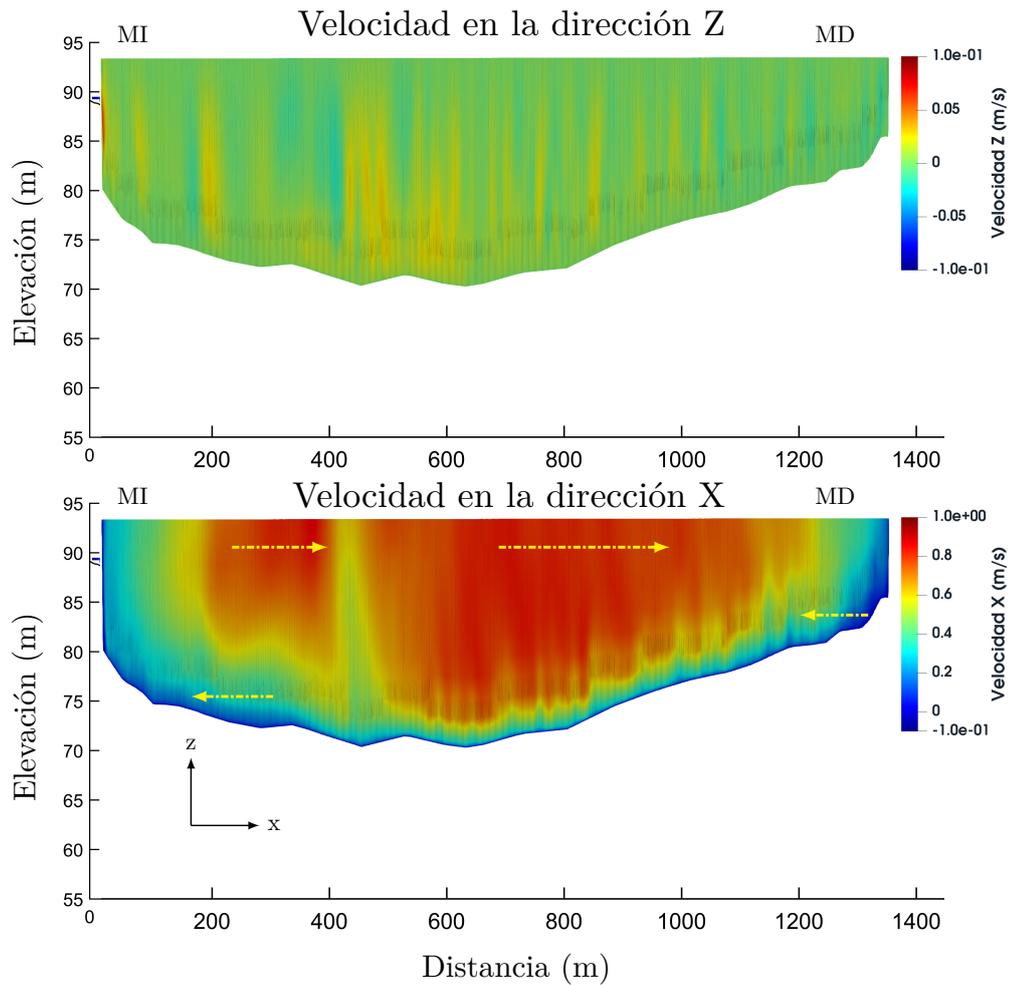


FIGURA N° 5.65: Distribución de la velocidad transversal y vertical del modelo numérico en la sección A03 (Caso II).

La velocidad en dirección “X”, se observa que cerca a la superficie del agua se presenta los vectores de velocidad con dirección hacia la margen derecha, mientras que en el fondo de la sección se presenta una velocidad con dirección hacia la margen izquierda.

Luego del analizar la velocidad transversal y vertical del modelo numérico (Figura

N° 5.65), se grafica el flujo secundario en la sección A03 y fue comparada con el resultado de la medición de campo. La Figura N° 5.66, muestra el resultado del flujo secundario del modelo numérico en la sección A3, se observa que el modelo numérico logro replicar el único flujo secundario formado en gran parte de la sección, el cual tiene un sentido horario.

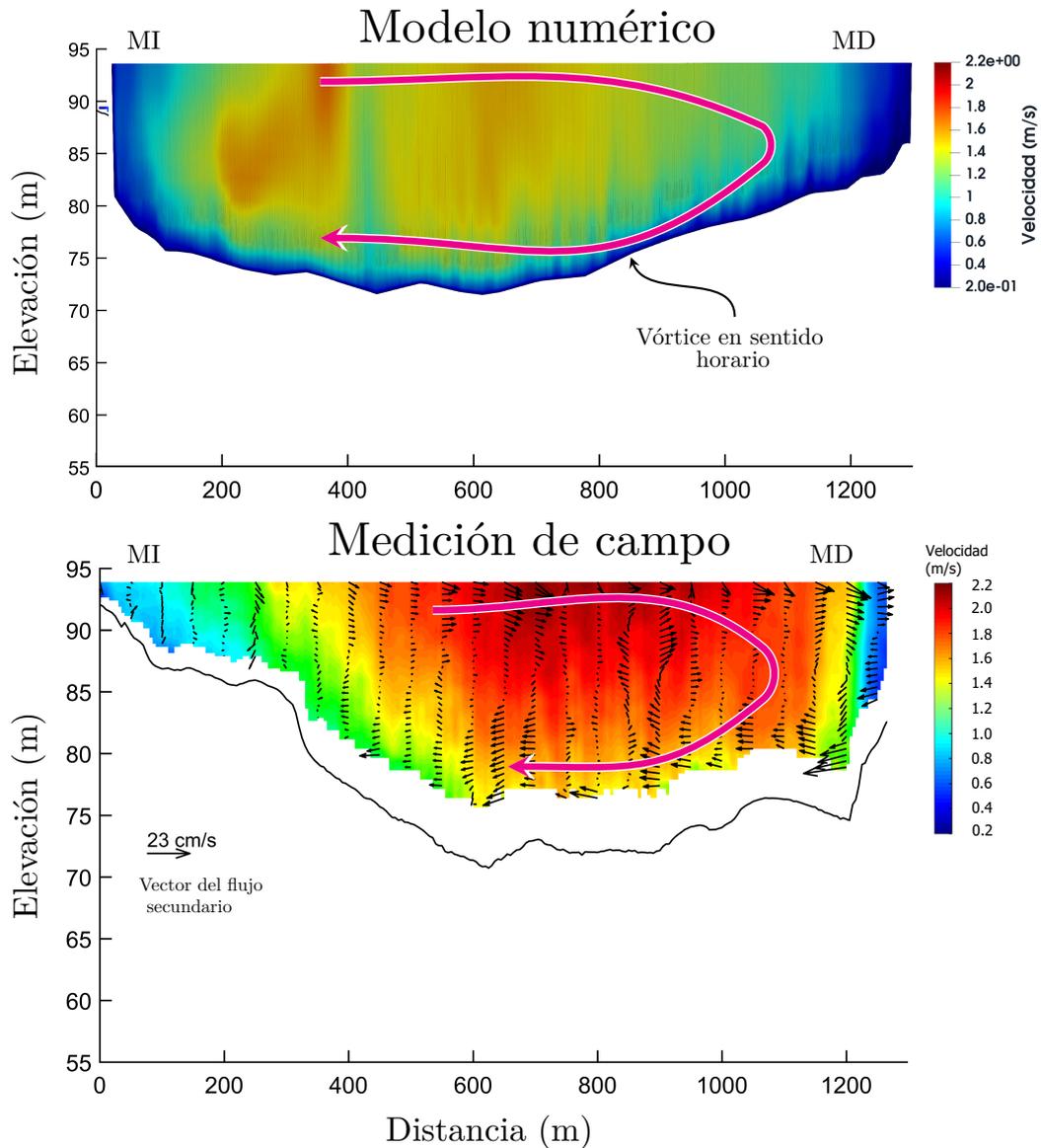


FIGURA N° 5.66: Comparación del flujo secundario entre el modelo numérico y la medición de campo en la sección A03 (Caso II).

5.5 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.5.1 Análisis comparativo de los casos de estudio

En la Figura N° 5.67 muestra los resultados de los dos casos de estudio, donde el Caso I representa la simulación de la temporada de vaciante y el Caso II representa la simulación de la temporada de creciente. Investigaciones previas en confluencias de grandes ríos, se mencionaba que los flujos secundarios eran débiles y especialmente limitados debido a la gran diferencia entre el ancho y la profundidad del río. No obstante, de acuerdo a los resultados de los modelos numéricos, se observa que en los dos casos de estudio se llegaron a formar los flujos secundarios, los cuales fueron concordantes con la medición de campo.

La distribución de la velocidad en planta en el Caso I de la Figura N° 5.67, muestra que la máxima velocidad dentro de la zona de la confluencia está influenciada por el río Marañón. Mientras que en el Caso II, la máxima velocidad dentro de la zona de la confluencia está influenciado por el río Ucayali. La aceleración del flujo dentro de la zona de la confluencia, se encuentra influenciada por la relación de cantidad de movimiento (M_r) de los ríos Marañón y Ucayali. Para el Caso I el valor de $M_r = 0.17$ y para el Caso II el valor de $M_r = 1.15$, estos valores fueron presentados en la Tabla N° 5.1 y para mayor información de M_r revisar la ecuación 2.49.

A pesar de que la relación entre el ancho y la profundidad es grande dentro de la zona de la confluencia, en la presente investigación se observó la presencia de flujos secundarios de gran tamaño. En el Caso I para la sección A01 se pudo observar que el flujo secundario ocupó el 25 % del ancho de la sección, mientras que en el Caso II para la misma sección el flujo secundario ocupó y 60 % del ancho de la sección. Estos resultados indican que el flujo secundario dentro del Caso II es de mayor extensión y presenta una mayor velocidad comparado con el Caso I.

La evolución del flujo secundario, dentro de los dos casos de estudio, presenta una diferencia en su desarrollo aguas abajo. Para el Caso I, se observa que dentro de la sección A01 se forma dos vórtices que giran en sentido contrario los cuales se mantienen en la sección A02 y llega hasta la sección A03, mientras que en el Caso II los flujos secundarios contrarrotantes se mantienen hasta la sección A02 para luego desarrollarse en un solo flujo secundario (vórtice de sentido horario) en la sección A03.

Se observa que el flujo secundario en el Caso I se encuentra limitado dentro de la zona de mayor profundidad, el cual es conocida como la fosa de erosión y se puede observar en la Figura N° 3.12 el cual está representado de color azul y presenta la menor elevación. En el Caso II, la fosa de erosión se encuentra en la Figura N° 3.17.

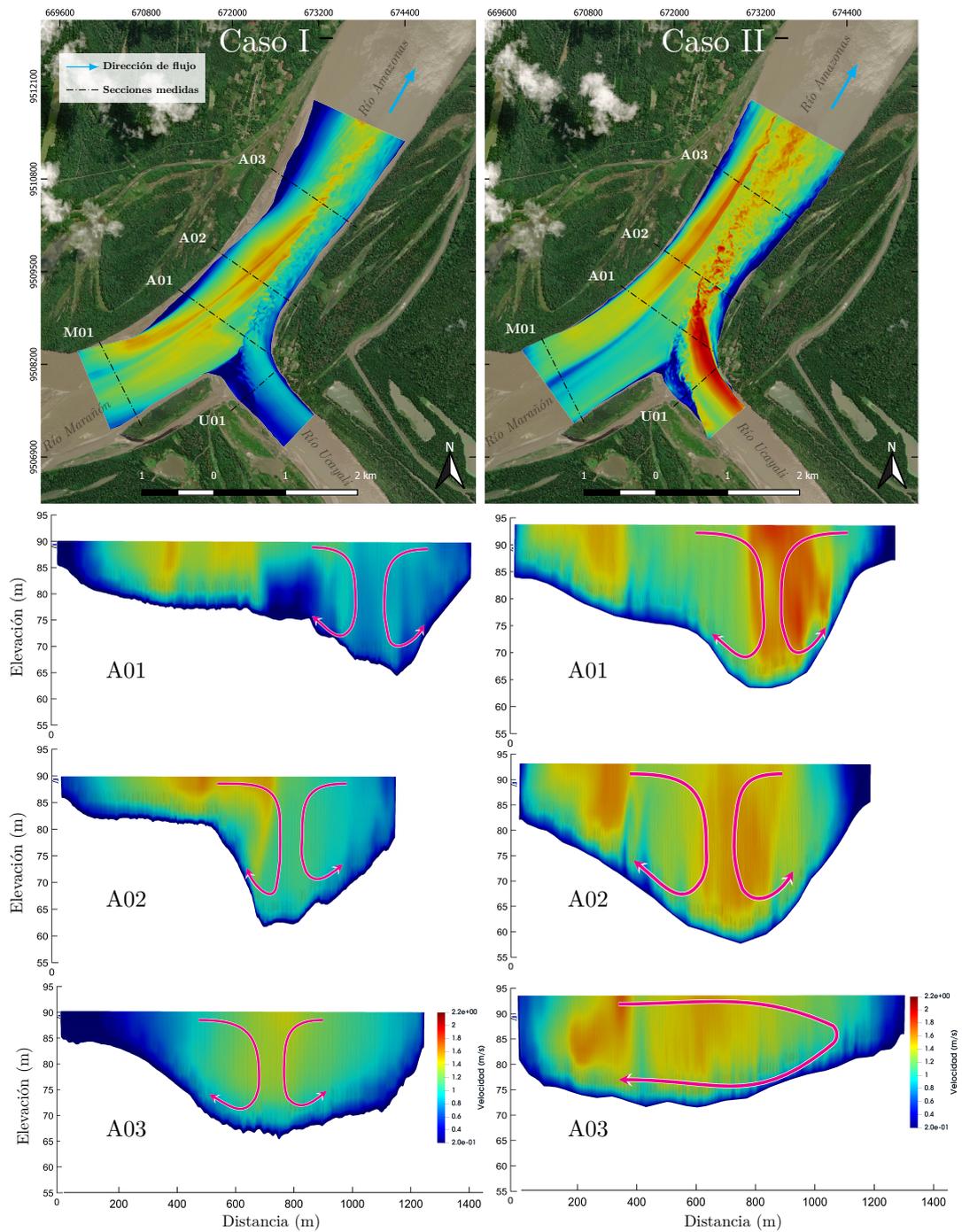


FIGURA N° 5.67: Comparación de los resultado de los modelos numéricos tridimensionales.

De acuerdo a la presente investigación, el flujo secundario se encuentra relacionado con la fosa de erosión, ya que permite el movimiento de sedimentos en dicha zona. En el Caso I se puede observar que los flujos secundarios, tuvieron una larga duración hasta la sección A03 y que a su vez la fosa de erosión se extendió hasta

dicha zona. Mientras que en el Caso II, la fosa de erosión solo se extendió hasta la sección A02 de la misma manera que los flujos secundarios contrarrotantes.

La Figura N° 5.68 muestra una vista tridimensional de los dos casos de estudio, se puede observar el desarrollo del flujo desde los tributarios aguas arriba hacia la confluencia hasta el punto de salida aguas abajo. Se puede observar el desarrollo del flujo mediante las secciones escaladas seis veces su altura, y cada sección se encuentra ubicada a cada 500 m.

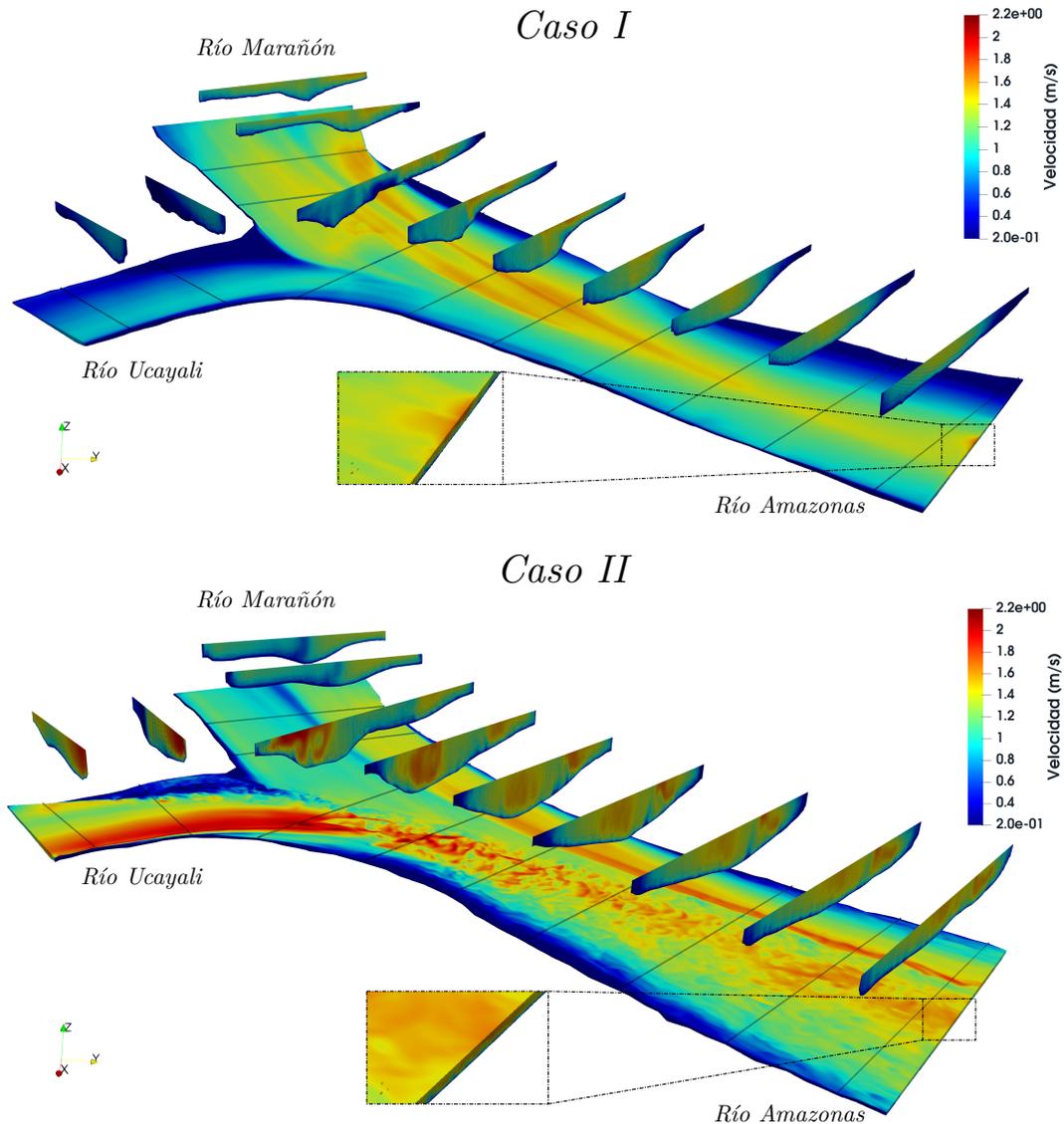


FIGURA N° 5.68: Modelos numéricos tridimensionales.

5.5.2 Rendimiento del modelo numérico tridimensional

Para una mejor evaluación de los modelos desarrollados en la presente investigación, se analizó el rendimiento de cada modelo numérico. El rendimiento fue evaluado a través del índice del error cuadrático medio (*RMSE*) y el coeficiente de determinación (R^2), ambas métricas permiten evaluar el ajuste del modelo a las mediciones realizadas en campo. Donde *RMSE* está representada por la siguiente ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (5.1)$$

Donde N es el número de observaciones, \hat{y}_i son los valores predichos, y_i son los valores observados. *RMSE* indica la precisión con la que un modelo puede predecir el valor de una variable medida en campo en términos absolutos.

El coeficiente de determinación R^2 está expresando por la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (5.2)$$

Donde \bar{y}_i representa el valor promedio de los valores predichos. R^2 indica que tan bien las variables del modelo pueden explicar la variación en la variable medida en campo. Tanto el R^2 como el *RMSE* cuantifican el ajuste del modelo a los datos de campo.

En la Tabla N° 5.2 se presentan los valores de *RMSE* y de R^2 calculados, para cada sección y a diferentes profundidades. Para el Caso I en la sección de ingreso U01 perteneciente al río Ucayali, se puede observar que los valores de *RMSE* son menos en comparación con el Caso II, y para el R^2 es mayor comparado con el Caso II, lo que indica que en el Caso I se tuvo una mejor representación del flujo para la sección U01. Para la sección M01 que representa el ingreso del río Marañón, se puede observar que el Caso I tuvo una mejor representación del flujo porque tiene el menor *RMSE* y el mayor R^2 .

En la sección A01 ambos casos tuvieron una representación similar, se puede observar que el Caso II tuvo un valor menor de *RMSE* que el Caso I. No obstante, los valores R^2 son cercanos para ambos casos, por lo tanto, ambos casos tuvieron un comportamiento similar. En la sección A02, se observa que el Caso I tuvo un mejor valor del *RMSE* y el Caso II tuvo un mejor valor R^2 , por lo que se puede decir que ambos modelos se comportaron bien. Finalmente, la sección A03, se puede observar claramente que el Caso I tuvo un mejor valor de *RMSE* y R^2 por lo que se comportó mejor que el Caso II.

En general se puede decir que el modelo numérico tridimensional del Caso I tuvo un mejor comportamiento comparado con el modelo numérico tridimensional del Caso II, no obstante ambos modelos lograron replicar la hidrodinámica de las mediciones en campo y lograron replicar los flujos secundarios. La diferencia del Caso II se debe especialmente a la diferencia de la batimetría utilizada en la construcción del modelo numérico y la batimetría usada para la validación del modelo en las secciones de estudio. Además, las condiciones de ingreso del Caso II podrían mejorar, generando unos modelos previos aguas arriba de las secciones U01 y M01.

TABLA N° 5.2: Rendimiento del modelo numérico tridimensional

Rendimiento del modelo numérico					
Sección	Profundidad	Caso I		Caso II	
		RMSE	R^2	RMSE	R^2
U01	$0.20H_{med}$	0.17	0.91	0.57	0.59
	$0.40H_{med}$	0.16	0.92	0.53	0.60
	$0.60H_{med}$	0.13	0.93	0.49	0.56
	$0.80H_{med}$	0.15	0.77	0.39	0.67
M01	$0.20H_{med}$	0.17	0.85	0.15	0.41
	$0.40H_{med}$	0.16	0.80	0.13	0.40
	$0.60H_{med}$	0.26	0.82	0.10	0.56
	$0.80H_{med}$	0.25	0.70	0.08	0.50
A01	$0.25H_{med}$	0.32	0.63	0.31	0.54
	$0.50H_{med}$	0.24	0.51	0.27	0.45
	$0.75H_{med}$	0.31	0.58	0.20	0.63
	H_{med}	0.26	0.75	0.18	0.50
A02	$0.25H_{med}$	0.13	0.74	0.30	0.69
	$0.50H_{med}$	0.13	0.69	0.31	0.61
	$0.75H_{med}$	0.13	0.61	0.31	0.76
	H_{med}	0.24	0.46	0.29	0.62
A03	$0.25H_{med}$	0.09	0.93	0.40	0.57
	$0.50H_{med}$	0.11	0.88	0.37	0.53
	$0.75H_{med}$	0.10	0.84	0.28	0.51
	H_{med}	0.05	0.82	0.11	0.55

En la sección A03, la sección más alejada de la confluencia, el campo de velocidades simulado tiene una mayor similitud que en las secciones ubicadas aguas arriba, A01 y A02. Esto se debe a que el flujo se logra desarrollar en dirección aguas abajo en la dirección principal del flujo.

CONCLUSIONES

La presente investigación permitió profundizar en el conocimiento de los flujos secundarios, los cuales son estructuras complejas que se desarrollan en las confluencias fluviales, representando así un reto para la hidráulica fluvial. Influyen en el transporte de sedimentos y en la morfología de la confluencia mediante la erosión y sedimentación. Para ello, se estudió la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali mediante un modelo numérico tridimensional. Los resultados muestran que los modelos construidos representan los flujos secundarios observados en campo.

Se estudió la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali, mediante modelos numéricos tridimensionales, para dos casos de estudio. El Caso I estudió el comportamiento del flujo durante la temporada de vaciante y el Caso II para la temporada de creciente. Los cuales fueron construidos, calibrados y validados en base a un programa experimental de mediciones de campo, de la hidrodinámica de algunas secciones en sus afluentes y en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali.

Se presentó una metodología para la construcción de modelos tridimensionales en confluencias fluviales. Se construyó el modelo numérico tridimensional mediante el software OpenFOAM de código abierto, para el estudio de la hidrodinámica en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Y su construcción se realizó con la información medida en campo.

Se estableció un procedimiento de simulación, calibración y validación de la hidrodinámica en confluencias fluviales de grandes ríos amazónicos mediante un modelo numérico tridimensional el cual utilizó el modelo de turbulencia LES, implementado en OpenFOAM y se empleó un clúster de alto rendimiento (HPC) para la simulación. El modelo permitió estudiar el comportamiento del flujo secundario dentro de ella. Los resultados de las simulaciones ejecutadas en la presente tesis son mucho más detallados que los datos medidos en campo. Los cuales pueden servir para realizar un estudio más exhaustivo del comportamiento de la interfaz de mezcla, las estructuras turbulentas formadas, la influencia de la densidad en la evolución de la mezcla y los esfuerzos cortantes de lecho en la zona de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali.

El modelo numérico tridimensional del Caso I presentó una mejor calibración de las secciones U01 que pertenece al río Ucayali y la sección M01 que pertenece al río Marañón, en comparación con el modelo numérico tridimensional del Caso II. No obstante, el valor de la velocidad presenta una pequeña subestimación comparada con las mediciones de campo realizadas en dichas secciones.

Ambos modelos numéricos tridimensionales presentaron un ajuste adecuado con

la distribución de la velocidad en planta de las mediciones en campo. Sin embargo, en el Caso I, la máxima velocidad dentro de la confluencia se encuentra influenciada por el río Marañón. Y en el Caso II, la máxima velocidad dentro de la confluencia se encuentra influenciada por el río Ucayali.

Los resultados de la distribución de la velocidad en las secciones A01, A02 y A03 de ambos modelos numéricos tridimensionales se ajustan a la distribución de la velocidad medida en campo. Sin embargo, el modelo numérico tridimensional del Caso I presentó un mejor ajuste comparado con el modelo numérico tridimensional del Caso II. Esta diferencia del Caso II, puede atribuirse a la batimetría utilizada en la construcción del modelo numérico y la batimetría medida en campo para la validación de las secciones de estudio, a pesar de no pertenecer a la misma fecha ambos fueron medidos en temporada de creciente.

En ambos modelos numéricos tridimensionales se formaron dos flujos secundarios, que giran en direcciones opuestas dentro de la zona de la confluencia, los cuales fueron contrastados con las mediciones en campo. A pesar de la gran diferencia entre el ancho y la profundidad dentro de la zona de la confluencia, se observaron flujos secundarios de gran tamaño. Dentro de la sección A01, para el Caso I el flujo secundario ocupó el 25 % del ancho de la sección, mientras que en el Caso II ocupó el 60 % del ancho del canal. Este resultado indica que los flujos secundarios en el Caso II son de mayor extensión y presentan una mayor velocidad.

La evolución de los flujos secundarios dentro de los dos modelos numéricos tridimensionales presenta una diferencia. A pesar de que los flujos secundarios en el Caso I son de menor tamaño y menor velocidad, permanecen aguas abajo hasta la sección A03 y se encuentran limitados por la fosa de erosión. En cambio, en el Caso II, los flujos secundarios contrarrotantes (dos flujos secundarios uno con sentido horario y el otro con sentido antihorario) solo permanecen hasta la sección A02 mientras que aguas abajo se desvanece, llegando a formarse un solo flujo secundario en la sección A03 ocupando gran parte de la sección.

Del análisis de rendimiento del modelo numérico tridimensional se puede decir que el modelo numérico tridimensional del Caso I presentó un mejor comportamiento comparado con el Caso II, debido a que el Caso I presentó un menor valor de $RMSE$ y un mayor valor de R^2 en comparación con el Caso II. No obstante, ambos modelos numéricos tridimensionales lograron replicar la hidrodinámica y los flujos secundarios medidos en campo. Esta diferencia en el análisis de rendimiento está relacionado con la batimetría y la condiciones iniciales del Caso II.

La presente tesis permitirá a los profesionales del área de la hidráulica fluvial contar con mayores elementos de juicio al considerar estudiar el comportamiento en tramos de ríos y confluencias fluviales de gran tamaño, donde se presentan pa-

trones de flujo tridimensionales los cuales son replicados mediante la simulación de los grandes vórtices (LES, Large Eddy Simulation en inglés). Mediante este modelo se puede identificar la mayor zona de turbulencia dentro de la confluencia, por lo tanto, permite conocer la mayor zona de erosión en el fondo de lecho. Además, la mayor zona de turbulencia se caracteriza por el mayor transporte de sedimentos en suspensión, y esto es muy relevante al momento de ubicar puntos de muestreo de transporte de sedimentos en suspensión en secciones de gran tamaño como el caso de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali que puede llegar alcanzar los 2 km. Estos estudios permitirán ajustar los diseños o la intervención que se hagan en los cauces o en las orillas con la finalidad de controlar la erosión en las márgenes, facilitar el tráfico fluvial y permitir proyectar obras hidráulicas, como puertos fluviales.

RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un modelo numérico tridimensional extendido en dirección aguas arriba de las condiciones de borde de cada afluente, para poder tener una mejor representación de la distribución de las velocidades en los ingresos de cada afluente. Esto es, porque en los tramos aguas arriba del ingreso de cada afluente existe una curva de meandro que genera un flujo secundario e influye en la hidrodinámica de la zona de la confluencia, lo cual debería ser considerado en las condiciones de borde aguas arriba de modelos numéricos tridimensionales de confluencias fluviales.

La presente tesis utilizó el modelo de turbulencia LES para la simulación de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali. Se recomienda implementar otros modelos de turbulencia dentro de modelo numérico tridimensional, y poder realizar una comparación de resultados entre los demás modelos y las mediciones de campo. Esto permitiría realizar un análisis costo-beneficio de cada modelo de turbulencia que puede ser expresado en horas de cómputo y mejor ajuste del modelo.

Se recomienda estudiar la influencia de los flujos secundarios dentro de la fosa de erosión y expresar los resultados en valores de esfuerzo cortante en el lecho de la zona de la confluencia fluvial. A su vez, se recomienda estudiar la influencia de la interfaz de mezcla en la formación de los flujos secundarios, y analizar las estructuras turbulentas formadas en la zona de la interfaz de mezcla.

La presente tesis consideró un modelo numérico tridimensional de densidad constante para ambos afluentes. Se recomienda realizar un modelo numérico tridimensional que considere la diferencia de densidad en cada afluente, debido a que cada afluente presenta una temperatura distinta y una concentración de sedimento en suspensión distinta en cada afluente. Estos factores influyen en la densidad de cada afluente y por tanto, la diferencia de densidad podría influir en el desarrollo de los flujos secundarios.

Se recomienda estudiar a fondo la dinámica de fluidos computacional (CFD), porque presenta las bases teóricas de la construcción del modelo numérico tridimensional en el área de la hidráulica fluvial. A su vez se recomienda aprender OpenFOAM que es una herramienta poderosa dentro del CFD y de acceso libre, y muy potente para la construcción de modelos a gran escala, como el caso de la confluencia de los ríos Marañón y Ucayali.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, J., Ortals, C., Paredes, J., & Vizcarra, J. (2014). The birthplace of the Amazon River, the confluence of the Marañón and Ucayali rivers. *AGU Fall Meeting Abstracts, 2014*, 3558.
- Abad, J. D., Mendoza, A., Arceo, K., Torres, Z., Valverde, H., Medina, G., ... Berezowsky, M. (2022). Planform dynamics and cut-off processes in the lower Ucayali River, Peruvian Amazon. *Water, 14*(19), 3059.
<https://doi.org/10.3390/w14193059>
- Abad, J. D., Vizcarra, J., Paredes, J., Montoro, H., Frias, C., & Holguin, C. (2013). *Morphodynamics of the upper Peruvian Amazonian rivers, implications into fluvial transportation*. EUT Edizioni Università di Trieste.
<http://hdl.handle.net/10077/8822>
- Anderson, J. D. (1992). Governing equations of fluid dynamics. *Computational fluid dynamics: an introduction*, (pp 15–51). Springer.
- Apsley, D. (2007). CFD calculation of turbulent flow with arbitrary wall roughness. *Flow, Turbulence and combustion, 78*, 153–175.
- Ashmore, P., Ferguson, R., Prestegard, K., Ashworth, P., & Paola, C. (1992). Secondary flow in anabranch confluences of a braided, gravel-bed stream. *Earth Surface Processes and Landforms, 17*(3), 299–311.
- Ashmore, P., & Parker, G. (1983). Confluence scour in coarse braided streams. *Water Resources Research, 19*(2), 392–402.
- Bathurst, J., Thorne, C., & Hey, R. (1977). Direct measurements of secondary currents in river bends. *Nature, 269*(5628), 504–506.
- Bathurst, J. C., Hey, R. D., & Thorne, C. R. (1979). Secondary flow and shear stress at river bends. *Journal of the Hydraulics Division, 105*(10), 1277–1295.
- Best, J. L. (1986). The morphology of river channel confluences. *Progress in Physical Geography, 10*(2), 157–174.
- Best, J. L. (1987). Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. *The Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (SEPM) Recent Developments in Fluvial Sedimentology, 39*, 27–35.
- Best, J. L., & Roy, A. G. (1991). Mixing-layer distortion at the confluence of channels of different depth. *Nature, 350*(6317), 411–413.

- Biron, P., Roy, A., Best, J. L., & Boyer, C. J. (1993). Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels. *Geomorphology*, 8(2-3), 115–129.
- Biron, P. M., Buffin-Bélanger, T., & Martel, N. (2019). Three-dimensional turbulent structures at a medium-sized confluence with and without an ice cover. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(15), 3042–3056.
- Biron, P. M., Roy, A., & Best, J. (1996). Turbulent flow structure at concordant and discordant open-channel confluences. *Experiments in Fluids*, 21(6), 437–446.
- Booij, R. (2003). Measurements and large eddy simulations of the flows in some curved flumes. *Journal of turbulence*, 4(1), 008.
- Bouchez, J., Lajeunesse, E., Gaillardet, J., France-Lanord, C., Dutra-Maia, P., & Maurice, L. (2010). Turbulent mixing in the Amazon River: The isotopic memory of confluences. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(1-2), 37–43.
- Boyer, C., Roy, A. G., & Best, J. L. (2006). Dynamics of a river channel confluence with discordant beds: Flow turbulence, bed load sediment transport, and bed morphology. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 111(F4). <https://doi.org/10.1029/2005JF000458>
- Bradbrook, K., Biron, P., Lane, S., Richards, K., & Roy, A. (1998). Investigation of controls on secondary circulation in a simple confluence geometry using a three-dimensional numerical model. *Hydrological processes*, 12(8), 1371–1396.
- Bradbrook, K., Lane, S., & Richards, K. (2000). Numerical simulation of three-dimensional, time-averaged flow structure at river channel confluences. *Water resources research*, 36(9), 2731–2746. <https://doi.org/10.1029/2000WR900011>
- Bradbrook, K., Lane, S., Richards, K., Biron, P., & Roy, A. (2001). Role of bed discordance at asymmetrical river confluences. *Journal of hydraulic engineering*, 127(5), 351–368.
- Brito, M., Canelas, O., Leal, J., & Cardoso, A. (2014). 3D numerical simulation of flow at a 70° open-channel confluence. *MEFTE 2014*, 1100, 177.
- Cable, M. (2009). *An evaluation of turbulence models for the numerical study of forced and natural convective flow in atria* (Unpublished doctoral dissertation). Queen's University.
- Chai, X., & Mahesh, K. (2012). Dynamic-equation model for large-eddy simulation of compressible flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 699, 385–413.

- Cheng, Z., & Constantinescu, G. (2020). Stratification effects on hydrodynamics and mixing at a river confluence with discordant bed. *Environmental Fluid Mechanics*, 20(4), 843–872.
- Centro de Investigación y Tecnología del Agua. (2022). *Ríos danzantes guía metodológicas para el desarrollo de línea base física de los ríos en Andes-Amazonía*. Universidad de Ingeniería y Tecnología.
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., Sukhodolov, A., & Kirkil, G. (2011). Structure of turbulent flow at a river confluence with momentum and velocity ratios close to 1: Insight provided by an eddy-resolving numerical simulation. *Water Resources Research*, 47(5).
<https://doi.org/10.1029/2010WR010018>
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., & Sukhodolov, A. (2012). Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment entrainment capacity of coherent flow structures at a stream confluence. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F4).
<https://doi.org/10.1029/2012JF002452>
- Constantinescu, G. (2014). LE of shallow mixing interfaces: a review. *Environmental Fluid Mechanics*, 14, 971–996.
- Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., & Sukhodolov, A. (2016). Influence of planform geometry and momentum ratio on thermal mixing at a stream confluence with a concordant bed. *Environmental Fluid Mechanics*, 16, 845–873.
- Courant, R., Friedrichs, K., & Lewy, H. (1928). Über die partiellen differenzgleichungen der mathematischen physik. *Mathematische annalen*, 100(1), 32–74.
- Duguay, J., Biron, P., & Buffin, B. T. (2022). Large-scale turbulent mixing at a mesoscale confluence assessed through drone imagery and eddy-resolved modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(1), 345–363.
<https://doi.org/10.1002/esp.5251>
- Einstein, H., & Shen, H. (1964). A study on meandering in straight alluvial channels. *Journal of Geophysical Research*, 69(24), 5239–5247.
- Ferziger, J. H., Perić, M., & Street, R. L. (2002). *Computational methods for fluid dynamics* (Vol. 3). Springer.
- Foias, C., Manley, O. P., Rosa, R. M., & Temam, R. (2001). Estimates for the energy cascade in three-dimensional turbulent flows. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series I-Mathematics*, 333(5), 499–504.
- Gaudet, J. M., & Roy, A. G. (1995). Effect of bed morphology on flow mixing length at river confluences. *Nature*, 373(6510), 138–139.

- Guerrero, L., Flores, G., Valverde, H., Chicchon, H., Estrada, Y., Naito, K., ... Abad, J. D. (2019). The birthplace of the Amazon River, a confluence of meandering and anabranching rivers. In *Agu fall meeting abstracts* (Vol. 2019, pp. EP51E–2162).
- Guillén-Ludeña, S., Franca, M., Cardoso, A., & Schleiss, A. (2016). Evolution of the hydromorphodynamics of mountain river confluences for varying discharge ratios and junction angles. *Geomorphology*, *255*, 1–15.
- Gutierrez, R. R., Abad, J. D., Choi, M., & Montoro, H. (2014). Characterization of confluences in free meandering rivers of the Amazon basin. *Geomorphology*, *220*, 1–14.
- Guyot, J. L., Bazan, H., Fraizy, P., Ordonez, J. J., Armijos, E., & Laraque, A. (2007). Suspended sediment yields in the Amazon basin of Perú: a first estimation. *IAHS publication*, *314*(3).
- Hardy, R., Lane, S., Ferguson, R., & Parsons, D. (2003). Assessing the credibility of a series of computational fluid dynamic simulations of open channel flow. *Hydrological processes*, *17*(8), 1539–1560.
- Hardy, R., Lane, S., Lawless, M. R., Best, J., Elliott, L., & Ingham, D. (2005). Development and testing of a numerical code for treatment of complex river channel topography in three-dimensional CFD models with structured grids. *Journal of Hydraulic Research*, *43*(5), 468–480.
- Hardy, R. J., Lane, S. N., Ferguson, R. I., & Parsons, D. R. (2007). Emergence of coherent flow structures over a gravel surface: A numerical experiment. *Water resources research*, *43*(3).
<https://doi.org/10.1029/2006WR004936>
- Herrero, H. S., Lozada, J. M. D., García, C. M., Szupiany, R. N., Best, J., & Pagot, M. (2018). The influence of tributary flow density differences on the hydrodynamic behavior of a confluent meander bend and implications for flow mixing. *Geomorphology*, *304*, 99–112.
- Holzmann, T. (2016). Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®. *University of Loeben*.
- Horna, M. D., Constantinescu, G., Rhoads, B., Lewis, Q., & Sukhodolov, A. (2020). Density effects at a concordant bed natural river confluence. *Water Resources Research*, *56*(4). <https://doi.org/10.1029/2019WR026217>
- Issa, R. I. (1986). Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of computational physics*, *62*(1), 40–65.
- Jirka, G. H. (2004). Mixing and dispersion in rivers. In *River flow* (pp. 13–27).

- Kalkwijk, J. T., & De Vriend, H. J. (1980). Computation of the flow in shallow river bends. *Journal of Hydraulic Research*, 18(4), 327–342.
- Katopodes, N. D. (2019). *Free-surface flow*. Butterworth-Heinemann.
- Kazhdan, M., & Hoppe, H. (2013). Screened poisson surface reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, 32(3), 1–13.
- Keller, E. (1972). Development of alluvial stream channels: a five-stage model. *Geological Society of America Bulletin*, 83(5), 1531–1536.
- Keylock, C., Hardy, R., Parsons, D., Ferguson, R., Lane, S., & Richards, K. (2005). The theoretical foundations and potential for large-eddy simulation (LES) in fluvial geomorphic and sedimentological research. *Earth-Science Reviews*, 71(3-4), 271–304.
- Khosronejad, A., Ghazian Arabi, M., Angelidis, D., Bagherizadeh, E., Flora, K., & Farhadzadeh, A. (2019). Comparative hydrodynamic study of rigid-lid and level-set methods for LES of open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 145(1).
- Lane, S., & Ferguson, R. (2005). Modelling reach-scale fluvial flows. *Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics*, (pp. 215–269). While online Library.
- Lane, S. N., Bradbrook, K., Richards, K., Biron, P., & Roy, A. (2000). Secondary circulation cells in river channel confluences: measurement artefacts or coherent flow structures? *Hydrological processes*, 14(11-12), 2047–2071.
- Lane, S. N., Parsons, D. R., Best, J. L., Orfeo, O., Kostaschuk, R., & Hardy, R. J. (2008). Causes of rapid mixing at a junction of two large rivers: Río Paraná and Río Paraguay, Argentina. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F2). <https://doi.org/10.1029/2006JF000745>
- Laraque, A., Guyot, J. L., & Filizola, N. (2009). Mixing processes in the Amazon River at the confluences of the Negro and Solimões rivers, encontro das águas, Manaus, Brazil. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(22), 3131–3140.
- Launder, B., & Spalding, D. (1974). *The numerical computation of turbulent flows. computer methods in applied mechanics and energy*, 3, 269–289.
- Leite, R. M., Blanckaert, K., Roy, A., & Schleiss, A. J. (2012). Flow and sediment dynamics in channel confluences. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117(F1). <https://doi.org/10.1029/2011JF002171>
- Leite, R. M., Blanckaert, K., & Schleiss, A. J. (2016). Local tributary widening for river rehabilitation. *Ecohydrology*, 9(2), 204–217.

- Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L. (2015). Rates and patterns of thermal mixing at a small stream confluence under variable incoming flow conditions. *Hydrological Processes*, 29(20), 4442–4456.
- McLelland, S., Ashworth, P., & Best, J. (1996). The origin and downstream development of coherent flow structures at channel junctions. *Coherent flow structures in open channels*, (pp. 459–490). Jhon Wile and Sons.
- McLelland, S., Ashworth, P., Best, J., Roden, J., & Klaassen, G. (1999). Flow structure and transport of sand-grade suspended sediment around an evolving braid bar, Jamuna River, Bangladesh. *Fluvial sedimentology VI*, 43–57.
- Mosley, M. P. (1976). An experimental study of channel confluences. *The journal of geology*, 84(5), 535–562.
- Nelson, J. M., & Smith, J. D. (1989). Flow in meandering channels with natural topography. *River meandering*, 12, 69–102.
- Nittrouer, C. A., & DeMaster, D. J. (1986). Sedimentary processes on the Amazon continental shelf: past, present and future research. *Continental Shelf Research*, 6(1-2), 5–30.
- Paredes Riveros, M. (2016). *Proyecciones de máxima creciente de los ríos Amazonas, Marañón, Ucayali y Huallaga*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.
- Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Kostaschuk, R. A., Hardy, R. J., Orfeo, O., ... Szupiany, R. N. (2008). Large river channel confluences. *River confluences, tributaries and the fluvial network*, (pp. 73–91). Jhon While and Sons.
- Parsons, D. R., Best, J. L., Lane, S. N., Orfeo, O., Hardy, R. J., & Kostaschuk, R. (2007). Form roughness and the absence of secondary flow in a large confluence diffuence, Río Paraná, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(1), 155–162. <https://doi.org/10.1002/esp.1457>
- Parsons, D. R., Jackson, P., Czuba, J. A., Engel, F., Rhoads, B. L., Oberg, K., ... Riley, J. (2013). Velocity mapping toolbox (VMT): A processing and visualization suite for moving-vessel ADCP measurements. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(11), 1244–1260.
- Puhakka, M., Kalliola, R., Rajasilta, M., & Salo, J. (1992). River types, site evolution and successional vegetation patterns in Peruvian Amazonia. *Journal of Biogeography*, 651–665.
- Ramón, C. L., Hoyer, A. B., Armengol, J., Dolz, J., & Rueda, F. J. (2013). Mixing and circulation at the confluence of two rivers entering a meandering reservoir.

- Water Resources Research*, 49(3), 1429–1445.
<https://doi.org/10.1002/wrcr.20131>
- Ramos, P. X., Schindfessel, L., Pêgo, J. P., & De Mulder, T. (2019). Flat vs. curved rigid-lid LES computations of an open-channel confluence. *Journal of Hydroinformatics*, 21(2), 318–334.
<https://doi.org/10.2166/hydro.2019.109>
- Rhoads, B. L., & Kenworthy, S. T. (1995). Flow structure at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology*, 11(4), 273–293.
- Rhoads, B. L., & Kenworthy, S. T. (1999). On secondary circulation, helical motion and Rozovskii-based analysis of time-averaged two-dimensional velocity fields at confluences. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 24(4), 369–375.
- Rhoads, B. L., Riley, J. D., & Mayer, D. R. (2009). Response of bed morphology and bed material texture to hydrological conditions at an asymmetrical stream confluence. *Geomorphology*, 109(3-4), 161–173.
- Riley, J. D., Rhoads, B. L., Parsons, D. R., & Johnson, K. K. (2015). Influence of junction angle on three-dimensional flow structure and bed morphology at confluent meander bends during different hydrological conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(2), 252–271.
- Rozovskii, I. (1954). Concerning the question of velocity distribution in stream bends. *DAN URSR Rep.*
- Rutherford, J. C. (1994). *River mixing*. John Wiley and Sons, Chichester, England.
- Schindfessel, L., Creëlle, S., & De Mulder, T. (2015). Flow patterns in an open channel confluence with increasingly dominant tributary inflow. *Water*, 7(9), 4724–4751. <https://doi.org/10.3390/w7094724>
- Shaheed, R., Mohammadian, A., & Kheirkhah Gildeh, H. (2019). A comparison of standard $k-\varepsilon$ and realizable $k-\varepsilon$ turbulence models in curved and confluent channels. *Environmental Fluid Mechanics*, 19, 543–568.
- Shumate, E. D. (1998). *Experimental description of flow at an open-channel junction*. [Tesis de maestría]. University of Iowa.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. the basic experiment. *Monthly weather review*, 91(3), 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091%3C0099:GCEWTP%3E2.3.CO;2)
- Smith, R., & Daish, N. (1991). Dispersion far downstream of a river junction. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3(5), 1102–1109.

- Song, C. G., Seo, I. W., & Do Kim, Y. (2012). Analysis of secondary current effect in the modeling of shallow flow in open channels. *Advances in water resources*, 41, 29–48.
- Sotiropoulos, F. (2005). Introduction to statistical turbulence modelling for hydraulic engineering flows. *Computational fluid dynamics: Applications in environmental hydraulics*, (pp. 91–120). Wiley online Library.
- Stoesser, T., Rodi, W., & Jirka, G. (2004). Large-eddy simulation of flow over rough channel beds. En M. Greco, A. Carravetta & R. Della (Eds.), *Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2004* (pp 265–270). Taylor & Francis Group.
- Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Best, J. L., & Parsons, D. R. (2007). Comparison of fixed-and moving-vessel flow measurements with an adp in a large river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(12), 1299–1309.
- Szupiany, R. N., Amsler, M. L., Parsons, D. R., & Best, J. L. (2009). Morphology, flow structure, and suspended bed sediment transport at two large braid-bar confluences. *Water Resources Research*, 45(5).
<https://doi.org/10.1029/2008WR007428>
- Tang, H., Zhang, H., & Yuan, S. (2018). Hydrodynamics and contaminant transport on a degraded bed at a 90-degree channel confluence. *Environmental Fluid Mechanics*, 18, 443–463.
- Tennekes, H., Lumley, J. L., Lumley, J. L., et al. (1972). *A first course in turbulence*. MIT press.
- Thorne, C. R., Zevenbergen, L., Pitlick, J., Rais, S., Bradley, J., & Julien, P. (1985). Direct measurements of secondary currents in a meandering sand-bed river. *Nature*, 315(6022), 746–747.
- Van Driest, E. R. (1956). On turbulent flow near a wall. *Journal of the aeronautical sciences*, 23(11), 1007–1011.
- Van Rijn, L. C. (1984). Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *Journal of hydraulic engineering*, 110(12), 1733–1754.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education.
- Villar, R. E., Martinez, J. M., Guyot, J. L., Fraizy, P., Armijos, E., Crave, A., ... Lavado, W. (2012). The integration of field measurements and satellite observations to determine river solid loads in poorly monitored basins. *Journal of hydrology*, 444, 221–228.
- Wallis, E., Nally, R. M., & Lake, P. S. (2008). A bayesian analysis of physical habitat changes at tributary confluences in cobble-bed upland streams of the

- Acheron River basin, Australia. *Water resources research*, 44(11).
<https://doi.org/10.1029/2008WR006831>
- Ward, N. D., Krusche, A. V., Sawakuchi, H. O., Brito, D. C., Cunha, A. C., Moura, J. M. S., ... Richey, J. E. (2015). The compositional evolution of dissolved and particulate organic matter along the lower Amazon River—óbidos to the ocean. *Marine Chemistry*, 177, 244–256.
- Weber, L. J., Schumate, E. D., & Mawer, N. (2001). Experiments on flow at a 90 open-channel junction. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(5), 340–350.
- Wilcox, D. C. (1988). Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA journal*, 26(11), 1299–1310.
- Wooding, R., Bradley, E. F., & Marshall, J. (1973). Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. *Boundary-Layer Meteorology*, 5(3), 285–308.
- Yakhot, V., Orszag, S., Thangam, S., Gatski, T., & Speziale, C. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 4(7), 1510–1520.
- Yang, Q., Liu, T., Lu, W., & Wang, X. (2013). Numerical simulation of confluence flow in open channel with dynamic meshes techniques. *Advances in Mechanical Engineering*, 5, 860431. <https://doi.org/10.1155/2013/860431>
- Yuan, S., Tang, H., Li, K., Xu, L., Xiao, Y., Gualtieri, C., ... Melville, B. (2021). Hydrodynamics, sediment transport and morphological features at the confluence between the Yangtze River and the Poyang Lake. *Water Resources Research*, 57(3). <https://doi.org/10.1029/2020WR028284>
- Yuan, S., Tang, H., Xiao, Y., Qiu, X., & Xia, Y. (2018). Water flow and sediment transport at open-channel confluences: an experimental study. *Journal of Hydraulic Research*, 56(3), 333–350.

ANEXOS

ANEXO A: Códigos para la creación de la malla	181
ANEXO B: Verificación de la Calidad de malla	194

ANEXO A: CÓDIGOS PARA LA CREACIÓN DE LA MALLA

A continuación, se presentan los códigos utilizados para la construcción de la malla del modelo numérico tridimensional para cada caso de estudio. El paso previo para la construcción de la malla del modelo, es crear la malla base, la cual fue creada a partir de la aplicación “blockMesh” mediante el Código A.1 para el Caso I y el Código A.2 para el Caso II. El paso siguiente es refinar el modelo de acuerdo a la batimetría de la confluencia. El refinamiento se realiza mediante la aplicación del “snappyHexMesh” mediante el Código A.3 para el Caso I y el Código A.4 para el Caso II.

Código para el blockMesh del Caso I

```
1 /*-----*\
2 |=====|
3 | \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
4 | \\ / O p e r a t i o n | Version: 2112 |
5 | \\ / A n d | Website: www.openfoam.com |
6 | \\ / M a n i p u l a t i o n |
7 /*-----*\
8 FoamFile
9 {
10     version      2112;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     object       blockMeshDict;
14 }
15 // ***** //
16 convertToMeters 1;
17
18 xMin    669538;
19 xMax    674407;
20
21 yMin    9506792;
22 yMax    9511779;
23
24 zMin     55;
25 zMax    90.4;
26
27 cellsize 2.5;
28 cellsize1 2.5;
29
30 nbDirX    #calc "floor (((xMax)-(xMin))/cellsize)";
31 nbDirY    #calc "floor (((yMax)-(yMin))/cellsize)";
32 nbDirZ    #calc "floor (((zMax)-(zMin))/cellsize1)";
33
34 vertices
```

```
35 (
36 ($xMin $yMin $zMin ) // 0
37 ($xMin $yMin $zMax ) // 1
38
39 ($xMax $yMin $zMin ) // 2
40 ($xMax $yMin $zMax ) // 3
41
42 ($xMin $yMax $zMin ) // 4
43 ($xMin $yMax $zMax ) // 5
44
45 ($xMax $yMax $zMin ) // 6
46 ($xMax $yMax $zMax ) // 7
47
48 );
49
50 blocks
51 (
52 hex ( 0 2 6 4 1 3 7 5) ($nbDirX $nbDirY $nbDirZ)
    simpleGrading (1 1 1)
53 );
54
55 edges
56 (
57 );
58
59 boundary
60 (
61     xmin
62     {
63         type patch;
64         faces
65         (
66             (1 0 4 5)
67         );
68     }
69
70     xmax
71     {
72         type patch;
73         faces
74         (
75             (2 3 7 6)
76         );
77     }
78
79     top
80     {
81         type symmetryPlane;
82         faces
```



```
7 /*-----*/
8 FoamFile
9 {
10     version      2112;
11     format       ascii;
12     class        dictionary;
13     object       blockMeshDict;
14 }
15 // ***** //
16 convertToMeters 1;
17
18 xMin    669648;
19 xMax    676780;
20
21 yMin    9507003;
22 yMax    9515459;
23
24 zMin     55;
25 zMax    94.4;
26
27 cellsize 2.5;
28 cellsize1 2.5;
29
30 nbDirX    #calc "floor (((xMax)-(xMin))/cellsize)";
31 nbDirY    #calc "floor (((yMax)-(yMin))/cellsize)";
32 nbDirZ    #calc "floor (((zMax)-(zMin))/cellsize1)";
33
34 vertices
35 (
36     (xMin yMin zMin ) // 0
37     (xMin yMin zMax ) // 1
38
39     (xMax yMin zMin ) // 2
40     (xMax yMin zMax ) // 3
41
42     (xMin yMax zMin ) // 4
43     (xMin yMax zMax ) // 5
44
45     (xMax yMax zMin ) // 6
46     (xMax yMax zMax ) // 7
47
48 );
49
50 blocks
51 (
52     hex ( 0 2 6 4 1 3 7 5) (nbDirX nbDirY nbDirZ)
53         simpleGrading (1 1 1)
54 );
```

```
55 edges
56 (
57 );
58
59 boundary
60 (
61     xmin
62     {
63         type patch;
64         faces
65         (
66             (1 0 4 5)
67         );
68     }
69
70     xmax
71     {
72         type patch;
73         faces
74         (
75             (2 3 7 6)
76         );
77     }
78
79     top
80     {
81         type symmetryPlane;
82         faces
83         (
84             (1 5 7 3)
85         );
86     }
87
88     wall_bottom
89     {
90         type wall;
91         faces
92         (
93             (0 4 6 2)
94         );
95     }
96
97     wall_ymax
98     {
99         type wall;
100        faces
101        (
102            (4 5 7 6)
103        );
```



```
28     ucayaliBoundary.stl
29     {
30         type          triSurfaceMesh;
31     name            ucayali;
32     }
33
34     maranonBoundary.stl
35     {
36         type          triSurfaceMesh;
37     name            maranon;
38     }
39
40     nearDownstream.stl
41     {
42         type          triSurfaceMesh;
43     name            downstream;
44     }
45
46 };
47
48 castellatedMeshControls
49 {
50     maxLocalCells 30000000;
51     maxGlobalCells 100000000;
52     minRefinementCells 0;
53     maxLoadUnbalance 0.10;
54     nCellsBetweenLevels 2;
55
56     features
57     (
58     );
59
60     refinementSurfaces
61     {
62         wall_bathy
63         {
64             level (1 1);
65         }
66         ucayali
67         {
68             level (1 1);
69         }
70         maranon
71         {
72             level (1 1);
73         }
74         downstream
75         {
76             level (1 1);
```

```
77     }
78   }
79
80   resolveFeatureAngle 30;
81
82   refinementRegions
83   {
84     /*refinementBoxMixing
85     {
86       mode inside;
87       levels ((0.0 2));
88     }*/
89   }
90
91   locationInMesh (672303 9509002 85);
92   allowFreeStandingZoneFaces true;
93 }
94
95 snapControls
96 {
97   nSmoothPatch 3;
98   tolerance 4.0;
99   nSolveIter 30;
100  nRelaxIter 5;
101  nFeatureSnapIter 10;
102  implicitFeatureSnap false;
103  explicitFeatureSnap true;
104  multiRegionFeatureSnap true;
105 }
106
107 addLayersControls
108 {
109   relativeSizes false;
110
111   layers
112   {
113     wall_bathy
114     {
115       nSurfaceLayers 4;
116     }
117     /*ucayali
118     {
119       nSurfaceLayers 1;
120     }
121     maranon
122     {
123       nSurfaceLayers 1;
124     }
125     downstream
```

```
126     {
127         nSurfaceLayers 1;
128     }*/
129
130 }
131
132 expansionRatio 1.2;
133 thickness 1.10;
134 minThickness 0.2;
135
136 nGrow 0;
137
138 featureAngle 180;
139 nRelaxIter 5;
140 nSmoothSurfaceNormals 1;
141 nSmoothNormals 3;
142 nSmoothThickness 10;
143 maxFaceThicknessRatio 0.5;
144 maxThicknessToMedialRatio 0.3;
145 minMedianAxisAngle 90;
146 nBufferCellsNoExtrude 0;
147 nLayerIter 50;
148 }
149
150 meshQualityControls
151 {
152     maxNonOrtho 65;
153     maxBoundarySkewness 20;
154     maxInternalSkewness 4;
155     maxConcave 80;
156     minVol 1e-13;
157     minTetQuality 1e-30;
158     minArea -1;
159     minTwist 0.05;
160     minDeterminant 0.001;
161     minFaceWeight 0.05;
162     minVolRatio 0.01;
163     minTriangleTwist -1;
164     nSmoothScale 4;
165     errorReduction 0.75;
166 }
167
168 writeFlags
169 (
170     scalarLevels
171 );
172
173
174 mergeTolerance 1e-6;
```



```
44     }
45     /*refinementBoxMixing
46     {
47         type searchableBox;
48         min ( 98 100 68);
49         max ( 104 115 70);
50     }*/
51 };
52
53 castellatedMeshControls
54 {
55     maxLocalCells 25000000;
56     maxGlobalCells 100000000;
57     minRefinementCells 0;
58     maxLoadUnbalance 0.10;
59     nCellsBetweenLevels 2;
60
61     features
62     (
63     );
64
65     refinementSurfaces
66     {
67         wall_bathy
68         {
69             level (1 1);
70         }
71         ucayali
72         {
73             level (1 1);
74         }
75         maranon
76         {
77             level (1 1);
78         }
79         downstream
80         {
81             level (1 1);
82         }
83     }
84
85     resolveFeatureAngle 30;
86
87     refinementRegions
88     {
89         /*refinementBoxMixing
90         {
91             mode inside;
92             levels ((0.0 2));
```

```
93     */
94   }
95
96   locationInMesh (672303 9509002 85);
97   allowFreeStandingZoneFaces true;
98 }
99
100 snapControls
101 {
102   nSmoothPatch 3;
103   tolerance 4.0;
104   nSolveIter 30;
105   nRelaxIter 5;
106   nFeatureSnapIter 10;
107   implicitFeatureSnap true;
108   explicitFeatureSnap false;
109   multiRegionFeatureSnap true;
110 }
111
112 addLayersControls
113 {
114   relativeSizes false;
115
116   layers
117   {
118     wall_bathy
119     {
120       nSurfaceLayers 4;
121     }
122     /*ucayali
123     {
124       nSurfaceLayers 1;
125     }
126     maranon
127     {
128       nSurfaceLayers 1;
129     }
130     downstream
131     {
132       nSurfaceLayers 1;
133     }
134     */
135   }
136
137   expansionRatio 1.2;
138   thickness 1.1;
139   minThickness 0.2;
140
141   nGrow 0;
```



```

36     cell zones:          0
37
38 Overall number of cells of each type:
39     hexahedra:          21576509
40     prisms:             70610
41     wedges:             20
42     pyramids:           0
43     tet wedges:         3941
44     tetrahedra:         15
45     polyhedra:          1439489
46 Breakdown of polyhedra by number of faces:
47     faces    number of cells
48         4    88218
49         5    49847
50         6    43969
51         7    175830
52         8    78676
53         9    954797
54        10     144
55        12    25091
56        15    22321
57        18     596
58
59 Checking topology...
60     Boundary definition OK.
61     Cell to face addressing OK.
62     Point usage OK.
63     Upper triangular ordering OK.
64     Face vertices OK.
65     Number of regions: 1 (OK).
66
67 Checking patch topology for multiply connected surfaces...
68
69     Patch    Faces    Points    Surface
70     topology
71         top    1031315  1037613  ok (non-closed singly
72     connected)
73         wall_bathy  4052592  4143102  ok (non-closed singly
74     connected)
75         ucayali    4145     4613    ok (non-closed singly
76     connected)
77         maranon    8824     9766    ok (non-closed singly
78     connected)
79         downstream  12753    13899    ok (non-closed singly
80     connected)
81
82 Checking faceZone topology for multiply connected surfaces...
83     No faceZones found.
84
85 Checking basic cellZone addressing...
    
```