

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE FLUJO EN MODELOS FÍSICOS CON LA CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD PHOTRON FASTCAM MINI UX100 Y PROCESAMIENTO EN MATLAB

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MENCION HIDRÁULICA**

**BERNARDO ORTEGA TERRA
bernardo.ortega@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. PABLO VERA ROMERO M.Sc.
pablo.vera@epn.edu.ec**

**CO-DIRECTOR: Ing. XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE M.Sc.
ximena.hidalgo@epn.edu.ec**

Quito, marzo 2020

Declaración

Yo, Bernardo Ortega Terra, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

BERNARDO ORTEGA TERRA

Certificación

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Bernardo Ortega Terra, bajo mi supervisión.

Ing. PABLO VERA ROMERO M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. XIMENA HIDALGO BUSTAMANTE M.Sc.

CO-DIRECTOR DE PROYECTO

Agradecimientos

Quiero expresar mi más grande agradecimiento a mis padres Monica y Pedro, quienes gracias a su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más. Agradezco a mi patria Brasil por su apoyo e inspiración, y al Ecuador por acogerme por estos últimos años tan esenciales de mi vida.

“Água mole em pedra dura, tanto bate até que fura.” (proverbio popular brasileiro)

Contenidos

| | |
|--|-----------|
| Declaración | 2 |
| Certificación..... | 3 |
| Agradecimientos | 4 |
| Contenidos..... | 5 |
| Índice de Figuras | 10 |
| Índice de Tablas | 17 |
| Lista de Símbolos..... | 20 |
| Lista de Abreviaturas | 22 |
| Resumen | 25 |
| Abstract..... | 27 |
| Presentación..... | 29 |
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1 Antecedentes | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 3 |
| 1.2.1 Objetivo General | 3 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos..... | 3 |
| 1.3 Justificación | 4 |
| 1.3.1 Justificación Teórica | 4 |
| 1.3.2 Justificación Metodológica | 5 |
| 1.3.3 Justificación Práctica | 6 |
| 2. Marco Conceptual y Estado del Arte | 8 |
| 2.1 Marco Conceptual..... | 8 |
| 2.1.1 Flujo a Superficie Libre^[1]..... | 8 |
| 2.1.1.1 Concepto de Caudal y Velocidad Media^[2]..... | 9 |
| 2.1.1.2 Viscosidad^[3] | 12 |
| 2.1.1.3 Perfil de Velocidad^[4]..... | 13 |
| 2.1.1.4 Número de Reynolds^[5]..... | 14 |
| 2.1.1.5 Régimen de Flujo^[6]..... | 15 |
| 2.1.2 Instrumentos de Medición de Velocidad de Flujo^[7]..... | 16 |
| 2.1.2.1 Métodos Intrusivos. | 16 |
| 2.1.2.1.1 Molinetes. | 17 |
| 2.1.2.1.1 Velocímetro Acústico Doppler..... | 18 |
| 2.1.2.1.2 Perfilador de Velocidad Acústico Doppler. | 20 |

| | | |
|-------------|--|----|
| 2.1.2.1.3 | <i>Electromagnético</i> ^[8] | 22 |
| 2.1.2.1 | Métodos No Intrusivos | 22 |
| 2.1.2.1.1 | <i>Visualización</i> | 23 |
| 2.1.2.1.1.1 | Trazadores Químicos..... | 24 |
| 2.1.2.1.1.2 | Velocimetría de Imágenes de Partículas..... | 25 |
| 2.1.2.1.1.3 | Velocimetría de Seguimiento de Partícula..... | 27 |
| 2.1.2.1.2 | <i>Radar</i> ^[9] | 29 |
| 2.2 | Estado del Arte | 30 |
| 3. | Metodología de Medición / Análisis de Velocimetría | 34 |
| 3.1 | Cámara de Alta Velocidad Photron | 34 |
| 3.1.1 | <i>Descripción Técnica del Equipo</i> | 34 |
| 3.1.2 | <i>Programa PFV</i> | 39 |
| 3.2 | Programa Matlab | 40 |
| 3.3 | Manejo Estadístico de Información | 44 |
| 3.4 | Instalaciones Donde se Realizan las Pruebas | 45 |
| 3.5 | Método Práctico para Grabación | 50 |
| 3.5.1 | <i>Precauciones de Uso General</i> | 50 |
| 3.5.2 | <i>Recomendaciones para el Programa PFV</i> | 51 |
| 3.5.3 | <i>Recomendaciones de Uso de la Cámara de Alta Velocidad</i> | 53 |
| 3.5.4 | <i>Recomendaciones de Iluminación</i> | 58 |
| 3.5.5 | <i>Recomendaciones del Dispositivo de Inyección de Trazador Químico</i> | 60 |
| 3.6 | Rutina de Programación | 61 |
| 3.6.1 | <i>Organización y Delimitación de Información Relevante para el Análisis</i> | 62 |
| 3.6.2 | <i>Secciones Temporales</i> | 64 |
| 3.6.3 | <i>Comparación de Capas de Colores</i> | 65 |
| 3.6.4 | <i>Conversión de Unidades</i> | 67 |
| 3.6.5 | <i>Cálculo de Velocidades</i> | 69 |
| 3.6.6 | <i>Filtrado de Datos</i> | 69 |
| 3.6.7 | <i>Obtención de Resultados</i> | 72 |
| 3.7 | Ejemplo de Cálculo | 73 |
| 4. | Resultados y Discusiones | 82 |
| 4.1 | Pruebas Experimentales | 82 |
| 4.2 | Plan de Pruebas | 83 |
| 4.3 | Descripción de las Pruebas Experimentales | 83 |
| 4.3.1 | <i>P-01</i> | 83 |
| 4.3.2 | <i>P-02</i> | 85 |
| 4.3.3 | <i>P-03</i> | 87 |
| 4.3.4 | <i>P-04</i> | 88 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.4 | Ejecución de las Pruebas Experimentales y Resultados | |
| | Obtenidos | 90 |
| 4.4.1 | <i>P-01 (Video 7)</i> | 91 |
| 4.4.2 | <i>P-02 (Video 4)</i> | 98 |
| 4.4.3 | <i>P-03 (Video 4)</i> | 105 |
| 4.4.4 | <i>P-04 (Video 1)</i> | 112 |
| 4.5 | Resumen e Interpretación de Resultados | 119 |
| 4.6 | Medición de Velocidad con Micro Molinete | 120 |
| 4.6.1 | <i>P-01</i> | 121 |
| 4.6.1.1 | Datos de micro molinete | 121 |
| 4.6.1.2 | Comparación de resultados | 123 |
| 4.6.2 | <i>P-02</i> | 124 |
| 4.6.2.1 | Datos de micro molinete | 124 |
| 4.6.2.2 | Comparación de resultados | 126 |
| 4.6.3 | <i>P-03</i> | 126 |
| 4.6.3.1 | Datos de micro molinete | 126 |
| 4.6.3.2 | Comparación de resultados | 127 |
| 4.6.4 | <i>P-04</i> | 128 |
| 4.6.4.1 | Datos de micro molinete | 128 |
| 4.6.4.2 | Comparación de resultados | 130 |
| 4.7 | Resumen e Interpretación de Análisis Comparativo | 130 |
| 4.8 | Clasificación de los Flujos de las Pruebas | 130 |
| 4.9 | Manual Práctico de Use de la Cámara de Alta Velocidad y | |
| | Procesamiento de Velocimetría en Matlab | 131 |
| 4.9.1 | <i>Lista de Componentes Necesarios</i> | 131 |
| 4.9.2 | <i>Ubicación en Canal</i> | 133 |
| 4.9.2.1 | Posicionamiento de Inyector | 133 |
| 4.9.2.2 | Fondo Reflector | 134 |
| 4.9.2.2.1 | <i>Posicionar Cámara</i> | 134 |
| 4.9.2.2.2 | <i>Soporte de Cámara</i> | 135 |
| 4.9.2.2.3 | <i>Orientación Ortogonal y Nivelación</i> | 135 |
| 4.9.2.3 | Posicionar Iluminación | 136 |
| 4.9.3 | <i>Conexión de Cámara</i> | 137 |
| 4.9.3.1 | Computadora y Cámara | 137 |
| 4.9.3.2 | Abrir Programa PFV | 137 |
| 4.9.3.3 | Configurar IP de Conexión | 138 |
| 4.9.4 | <i>Ajuste de Variables de Grabación</i> | 138 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 4.9.4.1 | Enfoque..... | 138 |
| 4.9.4.2 | “Framerate”..... | 139 |
| 4.9.4.3 | Resolución..... | 139 |
| 4.9.4.4 | “Shutter Speed”..... | 139 |
| 4.9.4.5 | Apertura de Lente..... | 140 |
| 4.9.4.6 | “Trigger Mode”..... | 140 |
| 4.9.4.7 | Referencia Espacial..... | 141 |
| 4.9.5 | <i>Preparar Inyector de Trazador</i> | 142 |
| 4.9.5.1 | Posicionar Aparato de Inyección..... | 142 |
| 4.9.5.2 | Posicionar Tubos de Inyección..... | 142 |
| 4.9.6 | <i>Realización de Prueba Experimental</i> | 143 |
| 4.9.6.1 | Inyección de Trazador..... | 143 |
| 4.9.6.2 | Disparo de Cámara..... | 143 |
| 4.9.6.3 | Cortar Video..... | 144 |
| 4.9.6.4 | Guardar Archivo..... | 144 |
| 4.9.7 | <i>Rutina de Programación</i> | 144 |
| 4.9.7.1 | Selección de Video..... | 144 |
| 4.9.7.2 | Definición de Variables..... | 145 |
| 4.9.7.3 | Presentación de Resultados (Antes de Filtrado)..... | 146 |
| 4.9.7.4 | Filtrado de Resultados..... | 147 |
| 4.9.7.5 | Presentación de Resultados Definitivos (Después de Filtrado)..... | 148 |
| 5. | Conclusiones y recomendaciones..... | 149 |
| 5.1 | Conclusiones..... | 149 |
| 5.2 | Trabajo Futuros..... | 152 |
| | Referencias..... | 153 |
| 6. | Anexos..... | 156 |
| 6.1 | Anexo 1: Diagrama Detallado de Pieza entre Cámara Photron y Trípode..... | 157 |
| 6.2 | Anexo 2: Código de Rutina Principal de Análisis de Velocimetría “Rutina_Principal_Velocimetria.m”..... | 158 |
| 6.3 | Anexo 3: Diagrama de Flujo de Rutina de Programación “Rutina_Principal_Velocimetria.m”..... | 163 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 6.4 | Anexo 4: Código de Rutina de Filtrado de Datos | |
| | “Filtrado_Mediana_Movil.m” | 164 |
| 6.5 | Anexo 5: Resultados de Videos Adicionales | 165 |
| 6.5.1 | P-01 | 165 |
| 6.5.1.1 | Video 1..... | 165 |
| 6.5.1.2 | Video 2..... | 170 |
| 6.5.1.3 | Video 3 | 175 |
| 6.5.1.4 | Video 4..... | 180 |
| 6.5.1.5 | Video 5..... | 185 |
| 6.5.1.6 | Video 6..... | 190 |
| 6.5.1.7 | Video 8..... | 195 |
| 6.5.1.8 | Video 9..... | 200 |
| 6.5.2 | P-02 | 205 |
| 6.5.2.1 | Video 1..... | 205 |
| 6.5.2.2 | Video 2 | 210 |
| 6.5.2.3 | Video 3..... | 215 |
| 6.5.3 | P-03 | 220 |
| 6.5.3.1 | Video 1..... | 220 |
| 6.5.3.2 | Video 2..... | 225 |
| 6.5.3.3 | Video 3..... | 230 |
| 6.5.4 | P-04 | 235 |
| 6.5.4.1 | Video 2..... | 235 |
| 6.5.4.2 | Video 3..... | 240 |
| 6.5.4.3 | Video 4..... | 245 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1 Diagrama Explicativo del Concepto de Caudal | 11 |
| Figura 2.2 Gráfica del Comportamiento Mecánico (Esfuerzo Cortante vs. Velocidad de Deformación) de Materiales Newtonianos y no Newtonianos..... | 12 |
| Figura 2.3 Diagrama de Perfil de Velocidades de Flujo | 14 |
| Figura 2.4 Micro Molinete OTT C2. | 17 |
| Figura 2.5 Diagrama de una Sonda de ADV..... | 19 |
| Figura 2.6 Diagrama de Componentes de un ADVP..... | 21 |
| Figura 2.7 Diagrama Método Electromagnético. | 22 |
| Figura 2.8 Ejemplo de Técnicas de Visualización de Flujo (Trazador Químico)..... | 23 |
| Figura 2.9 Técnicas de Inyección de Trazador Químico..... | 25 |
| Figura 2.10 Diagrama Método PIV | 26 |
| Figura 2.11 Resultados de Seguimiento de Partículas Trazadoras Individuales por el Método PTV..... | 28 |
| Figura 2.12 Diagrama de Método por Radar..... | 29 |
| Figura 3.1 Dimensiones y Ubicación de Pernos para Cámara Photron Fastcam Mini Ux100 | 36 |
| Figura 3.2 Pieza Adaptadora de Pernos entre Trípode y Cámara de Alta Velocidad Photron..... | 37 |
| Figura 3.3 Pantalla de Visualización de Archivo Guardado en Programa PFV..... | 39 |
| Figura 3.4 Canal Hidrodinámico de Pendiente Variable del CIERHI-EPN..... | 47 |
| Figura 3.5 Tubo Piezométrico para Medición de Carga Hidrostática del Tanque de Carga del Canal Hidrodinámico del CIERHI-EPN | 47 |
| Figura 3.6 Canal Hidrodinámico de Pendiente Variable del LDH-FICA..... | 49 |
| Figura 3.7 Diafragma y Tubos Piezométricos para Medición de Caudal en Canal Hidrodinámico del LDH-FICA | 49 |
| Figura 3.8 Cámara de Alta Velocidad Photron Fastcam Mini Ux100..... | 50 |
| Figura 3.9 Gráfica Explicativa del Parámetro “Shutter Speed” | 52 |
| Figura 3.10 Gráfica Demostrativa del Posicionamiento Ortogonal de una Cámara Respecto a un Fenómeno Observado | 54 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.11 Esquema Explicativo de Interacción entre una Lente de Enfoque y Sensor de una Cámara | 55 |
| Figura 3.12 Ejemplos de Diámetros de Apertura de Lentes Fotográficas..... | 56 |
| Figura 3.13 Esquema Explicativo de la Relación entre Diámetro de Apertura y Campo de Profundidad..... | 57 |
| Figura 3.14 Diagrama Explicativo de Funcionamiento de una Capucha de Lente | 58 |
| Figura 3.15 Diafragma Explicativo del Efecto de Dispersión de Luz..... | 59 |
| Figura 3.16 Diagrama Descriptivo de Posicionamiento de Cámara y Luz Respecto al Canal Observado..... | 59 |
| Figura 3.17 Espaciamiento Vertical entre Tubos de Inyección de Permanganato de Potasio | 60 |
| Figura 3.18 Dispositivo de Inyección de Trazador Químico | 61 |
| Figura 3.19 Diagrama Explicativo de Ubicación de Secciones Temporales..... | 65 |
| Figura 3.20 Visualización de Intensidades de Colores a lo Largo de una Línea | 66 |
| Figura 3.21 Secciones Temporales..... | 67 |
| Figura 3.22 Función de Conversión de Unidades Longitudinales Entre Imagen (Píxeles) y Fenómeno Observado (mm)..... | 68 |
| Figura 3.23 Gráfica de Valores de Velocidad a lo Largo de la Dimensión Vertical de Lectura | 69 |
| Figura 3.24 Comparación de Series de Datos: (A) Secuencia de Datos Preliminares con Picos Divergentes, (B) Misma Serie de Datos Filtrada por el Método de Mediana Móvil, usando un periodo de $n = 3$ | 71 |
| Figura 3.25 Ejemplo de Gráficas de Velocidad Horizontal (No Filtrada y Filtrada Respectivamente)..... | 73 |
| Figura 3.26 Frames (1-14) de Video Simplificado para Ejemplo de Cálculo | 75 |
| Figura 3.27 Secciones Temporales de Ejemplo de Cálculo | 77 |
| Figura 3.28 Gráfica de Determinación de Diferencias de Tiempo Para Ejemplo de Cálculo..... | 78 |
| Figura 3.29 Gráfica de Determinación de Diferencias de Tiempo para Ejemplo de Cálculo..... | 79 |
| Figura 4.1 Cuadro de Datos Relevantes para Análisis Matricial desde la Perspectiva de la Cámara de Alta Velocidad..... | 82 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.2 Sección Temporal 1 del Video 7 de la Prueba P-01 | 92 |
| Figura 4.3 Sección Temporal 2 del Video 7 de la Prueba P-01 | 93 |
| Figura 4.4 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 7 de la Prueba P-01 | 95 |
| Figura 4.5 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 7 de la Prueba P-01 ... | 96 |
| Figura 4.6 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-02 | 100 |
| Figura 4.7 Sección Temporal 2 del Video 4 de la prueba P-02 | 101 |
| Figura 4.8 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-02 | 102 |
| Figura 4.9 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-02 . | 103 |
| Figura 4.10 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-03..... | 107 |
| Figura 4.11 Sección Temporal 2 del Video 4 de la Prueba P-03..... | 108 |
| Figura 4.12 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-03..... | 109 |
| Figura 4.13 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-03 | 110 |
| Figura 4.14 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-04..... | 114 |
| Figura 4.15 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-04..... | 115 |
| Figura 4.16 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-04..... | 116 |
| Figura 4.17 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-04 | 117 |
| Figura 4.18 Micro Molinete OTT C2 | 121 |
| Figura 4.19 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-01 | 122 |
| Figura 4.20 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-02 | 125 |
| Figura 4.21 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-03 | 127 |
| Figura 4.22 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-04 | 129 |
| Figura 4.23 Ubicación en Canal..... | 133 |
| Figura 4.24 Ubicación de Inyector de Trazador Químico..... | 134 |
| Figura 4.25 Fondo Reflector | 134 |
| Figura 4.26 Soporte de Cámara..... | 135 |
| Figura 4.27 Nivelación de Cámara | 136 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.28 Posicionamiento de Iluminación con Respecto a la Cámara | 136 |
| Figura 4.29 Cámara Conectada a Computadora Mediante PFV | 137 |
| Figura 4.30 Operación de Enfoque de Cámara..... | 139 |
| Figura 4.31 Diferentes Tiempos de Apertura de Diafragma o “Shutter Speed” | 140 |
| Figura 4.32 Diferentes Diámetros de Apertura de Lente..... | 140 |
| Figura 4.33 Gráfica Explicativa de Modo de Disparo Central..... | 141 |
| Figura 4.34 Definición de Referencia Espacial (Regla Cerca de la Cámara y Regla en el Centro del Canal)..... | 142 |
| Figura 4.35 Esquema Gráfico de Organización de Datos..... | 145 |
| Figura 4.36 Gráfica Preliminar de Velocidades | 147 |
| Figura 4.37 Gráficas Preliminar y Definitiva de Velocidades..... | 148 |
| Figura 6.1 Diagrama Detallado de Pieza entre Cámara Photron y Trípode | 157 |
| Figura 6.2 Diagrama de Flujo de Rutina de Programación “Rutina_Principal_Velocimetria.m” | 163 |
| Figura 6.3 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-01 | 166 |
| Figura 6.4 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-01 | 167 |
| Figura 6.5 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-01 | 168 |
| Figura 6.6 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-01 | 169 |
| Figura 6.7 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-01 | 171 |
| Figura 6.8 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-01 | 172 |
| Figura 6.9 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-01 | 173 |
| Figura 6.10 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-01 | 174 |
| Figura 6.11 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-01 | 176 |
| Figura 6.12 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-01 | 177 |
| Figura 6.13 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-01 | 178 |
| Figura 6.14 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-01 | 179 |
| Figura 6.15 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-01 | 181 |
| Figura 6.16 Sección Temporal 2 del Video 4 de la Prueba P-01 | 182 |
| Figura 6.17 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-01 | 183 |

| | |
|--|-----|
| Figura 6.18 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-01 | 184 |
| Figura 6.19 Sección Temporal 1 del Video 5 de la Prueba P-01..... | 186 |
| Figura 6.20 Sección Temporal 2 del Video 5 de la Prueba P-01..... | 187 |
| Figura 6.21 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 5 de la Prueba P-01 | 188 |
| Figura 6.22 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 5 de la Prueba P-01 | 189 |
| Figura 6.23 Sección temporal 1 del Video 6 de la Prueba P-01 | 191 |
| Figura 6.24 Sección Temporal 2 del Video 6 de la Prueba P-01..... | 192 |
| Figura 6.25 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 6 de la Prueba P-01 | 193 |
| Figura 6.26 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 6 de la Prueba P-01 | 194 |
| Figura 6.27 Sección Temporal 1 del Video 8 de la Prueba P-01..... | 196 |
| Figura 6.28 Sección Temporal 2 del Video 8 de la Prueba P-01..... | 197 |
| Figura 6.29 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 8 de la Prueba P-01..... | 198 |
| Figura 6.30 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 8 de la Prueba P-01 | 199 |
| Figura 6.31 Sección Temporal 1 del Video 9 de la Prueba P-01..... | 201 |
| Figura 6.32 Sección Temporal 2 del Video 9 de la Prueba P-01..... | 202 |
| Figura 6.33 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 9 de la Prueba P-01..... | 203 |
| Figura 6.34 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 9 de la Prueba P-01 | 204 |
| Figura 6.35 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-02..... | 206 |
| Figura 6.36 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-02..... | 207 |
| Figura 6.37 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-02..... | 208 |
| Figura 6.38 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-02 | 209 |
| Figura 6.39 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-02..... | 211 |
| Figura 6.40 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-02..... | 212 |
| Figura 6.41 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-02..... | 213 |
| Figura 6.42 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-02 | 214 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.43 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-02 | 216 |
| Figura 6.44 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-02 | 217 |
| Figura 6.45 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-02 | 218 |
| Figura 6.46 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-02 | 219 |
| Figura 6.47 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-03 | 221 |
| Figura 6.48 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-03 | 222 |
| Figura 6.49 Gráfica de Velocidades de flujo del Video 1 de la Prueba P-03 | 223 |
| Figura 6.50 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-03 | 224 |
| Figura 6.51 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-03 | 226 |
| Figura 6.52 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-03 | 227 |
| Figura 6.53 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-03 | 228 |
| Figura 6.54 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-03 | 229 |
| Figura 6.55 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-03 | 231 |
| Figura 6.56 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-03 | 232 |
| Figura 6.57 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-03 | 233 |
| Figura 6.58 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-03 | 234 |
| Figura 6.59 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-04 | 236 |
| Figura 6.60 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-04 | 237 |
| Figura 6.61 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-04 | 238 |
| Figura 6.62 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-04 | 239 |
| Figura 6.63 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-04 | 241 |
| Figura 6.64 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-04 | 242 |
| Figura 6.65 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-04 | 243 |
| Figura 6.66 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-04 | 244 |
| Figura 6.67 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-04 | 246 |
| Figura 6.68 Sección Temporal 2 del Video 4 de la Prueba P-04 | 247 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6.69 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-04 | 248 |
| Figura 6.70 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-04 | 249 |

Índice de Tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 3.1 Componentes Originales de la Cámara Photron Fastcam Mini Ux100 | 35 |
| Tabla 3.2 Resoluciones Máximas Correspondientes a “Framerates” de Grabación | 53 |
| Tabla 3.3 Tabla de Cálculo de Velocidades Horizontales de Ejemplo de Cálculo | 78 |
| Tabla 3.4 Serie de Datos de Coordenadas en el Eje Y & Velocidades para Ejemplo de Filtrado | 80 |
| Tabla 3.5 Aplicación de Método de Mediana Móvil para Ejemplo de Filtrado..... | 81 |
| Tabla 4.1 Plan de Pruebas | 83 |
| Tabla 4.2 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-01..... | 84 |
| Tabla 4.3 Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para la Prueba P-01..... | 85 |
| Tabla 4.4 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-02..... | 86 |
| Tabla 4.5 Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para Prueba P-02..... | 86 |
| Tabla 4.6 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-03..... | 88 |
| Tabla 4.7 Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para la Prueba P-03..... | 88 |
| Tabla 4.8 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-04..... | 89 |
| Tabla 4.9 Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para la Prueba P-04..... | 90 |
| Tabla 4.10 Datos de Entrada para el Video 7 de la Prueba P-01 | 91 |
| Tabla 4.11 Resultados Finales para el Video 7 de la Prueba P-01 | 97 |
| Tabla 4.12 Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-01 por Visualización..... | 98 |
| Tabla 4.13 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-02 | 99 |
| Tabla 4.14 Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-02 | 104 |
| Tabla 4.15 Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-02 por Visualización..... | 105 |
| Tabla 4.16 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-03 | 106 |
| Tabla 4.17 Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-03 | 111 |
| Tabla 4.18 Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-03 por Visualización..... | 112 |
| Tabla 4.19 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-04 | 113 |
| Tabla 4.20 Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-04 | 118 |
| Tabla 4.21 Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-04 por Visualización..... | 119 |
| Tabla 4.22 Especificaciones de Uso del Micro Molinete en la Prueba P-01 | 121 |
| Tabla 4.23 Resultados Experimentales por Micro Molinete para la Prueba P-01 | 122 |
| Tabla 4.24 Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-01 | 123 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 4.25 Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-01 | 124 |
| Tabla 4.26 Especificaciones de Uso de Micro Molinete en la Prueba P-02 | 124 |
| Tabla 4.27 Resultados Experimentales por Micro Molinete para la Prueba P-02 | 125 |
| Tabla 4.28 Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-02 | 125 |
| Tabla 4.29 Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-02 | 126 |
| Tabla 4.30 Especificaciones de Uso del Micro Molinete en la Prueba P-03 | 126 |
| Tabla 4.31 Resultados Experimentales por Micro Molinete para la Prueba P-03 | 127 |
| Tabla 4.32 Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-03 | 127 |
| Tabla 4.33 Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-03 | 128 |
| Tabla 4.34 Especificaciones de Uso del Micro Molinete en la Prueba P-04 | 128 |
| Tabla 4.35 Resultados Experimentales por Micro Molinete Para la Prueba P-04..... | 129 |
| Tabla 4.36 Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-04 | 129 |
| Tabla 4.37 Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-04 | 130 |
| Tabla 4.38 Números de Froude y Reynolds de Flujos de las Pruebas | 130 |
| Tabla 4.39 Lista de Componentes Necesarios para la Prueba Visual de Velocimetría .. | 132 |
| Tabla 6.1 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-01 | 165 |
| Tabla 6.2 Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-01 | 169 |
| Tabla 6.3 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-01 | 170 |
| Tabla 6.4 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-01 | 174 |
| Tabla 6.5 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-01 | 175 |
| Tabla 6.6 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-01 | 179 |
| Tabla 6.7 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-01 | 180 |
| Tabla 6.8 Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-01 | 184 |
| Tabla 6.9 Datos de Entrada para el Video 5 de la Prueba P-01 | 185 |
| Tabla 6.10 Resultados Finales para el Video 5 de la Prueba P-01 | 189 |
| Tabla 6.11 Datos de Entrada para el Video 6 de la Prueba P-01 | 190 |
| Tabla 6.12 Resultados Finales para el Video 6 de la Prueba P-01 | 194 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 6.13 Datos de Entrada para el Video 8 de la Prueba P-01 | 195 |
| Tabla 6.14 Resultados Finales para el Video 8 de la Prueba P-01 | 199 |
| Tabla 6.15 Datos de Entrada para el Video 9 de la Prueba P-01 | 200 |
| Tabla 6.16 Resultados Finales para el Video 9 de la Prueba P-01 | 204 |
| Tabla 6.17 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-02 | 205 |
| Tabla 6.18 Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-02 | 209 |
| Tabla 6.19 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-02 | 210 |
| Tabla 6.20 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-02 | 214 |
| Tabla 6.21 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-02 | 215 |
| Tabla 6.22 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-02 | 219 |
| Tabla 6.23 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-03 | 220 |
| Tabla 6.24 Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-03 | 224 |
| Tabla 6.25 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-03 | 225 |
| Tabla 6.26 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-03 | 229 |
| Tabla 6.27 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-03 | 230 |
| Tabla 6.28 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-03 | 234 |
| Tabla 6.29 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-04 | 235 |
| Tabla 6.30 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-04 | 239 |
| Tabla 6.31 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-04 | 240 |
| Tabla 6.32 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-04 | 244 |
| Tabla 6.33 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-04 | 245 |
| Tabla 6.34 Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-04 | 249 |

Lista de Símbolos

| | | |
|------|---|---------------------|
| A | Área de sección transversal de flujo | [m ²] |
| b | Factor utilizado para filtrado de datos por mediana móvil | [-] |
| d | Calado de flujo | [m] |
| Fr | Número adimensional según Froude | [-] |
| g | Aceleración gravitacional | [m/s ²] |
| h | Carga hidráulica | [m] |
| L | Longitud característica de flujo | [m] |
| n | Periodo de método de filtrado de datos por mediana móvil | [-] |
| Q | Caudal de flujo | [m ³ /s] |
| Re | Número adimensional según Reynolds | [-] |
| s | Trayectoria de partículas individuales de flujo | [m] |
| t | Tiempo | [frames] o [s] |
| V | Velocidad | [píx/frame] o [m/s] |
| v | Volumen de fluido | [m ³] |
| y | Dimensión vertical de imágenes | [píx] |

| | | |
|--------------|----------------------------------|-----------------------|
| x | Dimensión horizontal de imágenes | [píx] |
| \mathbb{Z} | Conjunto de números naturales | [-] |
| μ | Viscosidad dinámica | [N*s/m ²] |
| ν | Viscosidad cinemática | [m ² /s] |
| τ | Esfuerzo Tangencial | [N/m ²] |

Lista de Abreviaturas

| | |
|--------|---|
| AC | “Alternate Current” Corriente alterna |
| ADV | “Acoustic Doppler Velocimeter” Velocímetro acústico Doppler |
| ADVP | “Acoustic Doppler Velocity Profiler” Perfilador de velocidad acústico Doppler |
| AVI | “Audio Video Interleave” Audio y video intercalado |
| Bit | “Binary Digit” Dígito binario |
| BMP | “Bit Map” Mapa de bits |
| CD | “Compact Disc” Disco compacto |
| CIERHI | Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos |
| CMOS | “Complementary Metal-Oxide Semiconductor” Semi-conductor complementario de óxido metálico |
| DC | “Direct Current” Corriente continua |
| EPN | Escuela Politécnica Nacional |
| FPS | “Frames Per Second” Imágenes por segundo |
| FTIF | “Fastcam Tagged Image File” Archivo de imagen marcado Fastcam |
| IP | “Internal Protocol” Protocolo interno |

| | |
|-------------|--|
| JPEG | “Joint Photographic Experts Group” Grupo unido de expertos de fotografía |
| LAN | “Local Area Network” Red de área local |
| LDH-FICA | Laboratorio Docente de Hidráulica – Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental |
| LED | “Light Emitting Diode” Diodo emisor de luz |
| Matlab | “Matrix Laboratory” Laboratorio de matrices |
| MOV | “Movie” Película |
| MRAW | “Movie-Raw” Película bruta |
| PFV | “Photron Fastcam Viewer” Visualizador Fastcam Photron |
| PIV | “Particle Image Velocimetry” Velocimetría de imágenes de partículas |
| Pixel o Pix | “Picture Element” Elemento de imagen |
| PNG | “Portable Network Graphics” Gráficos portátiles de red |
| PTV | “Particle Tracking Velocimetry” Velocimetría de seguimiento de partícula |
| RAW | “Raw” Imagen bruta |
| REPL | “Read Evaluate Print Loop” Leer evaluar imprimir repetir |

| | |
|------|--|
| RGB | “Red Blue Green” Rojo azul verde |
| TIFF | “Tagged Image File Format” Formato de archivo marcado de imagen |
| UNC | “Unified Coarse Pitch Threads” Roscas unificadas robustas de paso grueso |

Resumen

Los métodos de medición de velocidad de flujo pueden ser intrusivos o no intrusivos. En general las metodologías de medición no intrusivas son mejores ya que no es necesaria la introducción de un instrumento al flujo, el cual tiene influencia en el comportamiento hidráulico del agua a su alrededor. Entre las técnicas no intrusivas de medición existen las que se basan en la visualización y análisis de imágenes de flujos. La visualización de flujos consiste en la observación del movimiento de trazadores mecánicamente pasivos (sean sólidos o acuosos) con la ayuda de instrumentos de grabación visual precisos e iluminación adecuada para que las imágenes capturadas sean analizadas matricialmente y se pueda determinar velocidades de flujo.

Esta investigación propone una metodología de medición de velocidad de flujo no intrusiva mediante el uso de la cámara de alta velocidad Fastcam Mini Ux100 de la marca japonesa Photron y la aplicación de una rutina de programación en Matlab desarrollada por el autor de este trabajo. El trazador químico utilizado para las pruebas fue una solución acuosa de permanganato de potasio, el cual se traslada en un flujo a superficie libre a una velocidad igual a la velocidad media del medio. El análisis matricial realizado sobre las imágenes registradas permitió la obtención de las velocidades medias horizontales de los flujos observados. Esta metodología fue aplicada en dos canales hidrodinámicos en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, Ecuador con una serie de flujos a superficie libre para analizar diferentes condiciones de velocidad.

Los resultados obtenidos por la metodología propuesta fueron comparados con valores de velocidad media de los flujos estudiados obtenidos mediante el uso de un micro molinete de marca OTT tipo C2 y mediante la aplicación del concepto de continuidad de flujo. La divergencia entre los valores del método propuesto y los valores obtenidos para su validación fue mínima (porcentajes de error menores al 5%) en todas las pruebas realizadas.

Abstract

The different methods used for measuring flow velocities today can be divided between intrusive and non-intrusive. Generally speaking, non-intrusive methods are better because there is no need to introduce a foreign instrument into the observed flow, that which can cause disturbances in the hydraulic behavior of the surrounding water. Among the non-intrusive methods there are visualization and image analysis techniques that can be used for this purpose. The visualization of water flows consists in observing the movement of mechanically passive tracer particles (either solid or aqueous) with the aid of precise visual recording instruments and adequate light sources so that the captured images may be analyzed through matrixial processes and the flow velocity may be determined.

This study proposes a non-intrusive flow velocimetry method through the use of the Fastcam Mini Ux100 high-speed camera manufactured by the Japanese company Photron and a Matlab analysis script created by the study's author. The chemical tracer used in the experiments presented herein was a potassium permanganate solution, which moves inside a water flow at the same velocity as the medium's mean velocity. The mean horizontal velocity of the tracer (and of the flow itself) is obtained through the matrixial analysis of the recorded images. This method was applied in two distinct hydrodynamic channels in the Escuela Politécnica Nacional in Quito, Ecuador with a series of free surface flows in order to analyze different flow velocity conditions.

The results obtained through the proposed method were compared with mean flow velocity values measured by an OTT brand Small Current Meter C2 and calculated

through the concept of flow continuity. The divergence between the results of the proposed method and those obtained for its validation were minimal (percent errors lesser than 5%) in all the experiments that were carried out.

Presentación

El presente proyecto consta de cinco capítulos divididos de la siguiente manera:

En el primer capítulo, se presentan los antecedentes, el objetivo general y los específicos, alcance y limitaciones para la realización del estudio, así como su justificación.

En el segundo capítulo, se exponen conceptos teóricos referentes al comportamiento hidráulico de flujos a superficie libre, se describen de manera general los diferentes métodos existentes de mediciones en flujos de agua, y se especifican las peculiaridades de los métodos de medición que se basan en análisis de imágenes obtenidas con cámaras de alta velocidad.

En el tercer capítulo, se describen las características técnicas y específicas de los equipos y programas utilizados para la realización de las actividades experimentales y se detalla la metodología de medición de velocidad de flujo propuesta.

El cuarto capítulo presenta todos los resultados experimentales y la validación del método propuesto. Adicionalmente se presenta un manual práctico para la aplicación de la metodología.

El quinto capítulo contiene las conclusiones y propone recomendaciones para trabajos futuros.

Capítulo I

1. Introducción

1.1 Antecedentes

Un componente clave del proceso de diseño y optimización de estructuras hidráulicas es la modelación hidráulica. Sea física o numérica, estas técnicas requieren la creación de un modelo geoméricamente similar al prototipo a escala reducida en el que se reproduce el patrón de flujo que permite observar experimentalmente el funcionamiento hidráulico de dicha estructura (Chanson, 1999). El cumplimiento simultáneo de las condiciones físicas de similitud geométrica, cinemática y dinámica entre modelo y prototipo, permite obtener las propiedades cualitativas y cuantitativas del comportamiento hidráulico del flujo en las estructuras de interés, que de conformidad con las leyes de similitud son transpuestas al prototipo (Hidalgo, 2006).

El registro de datos experimentales en los modelos físicos se realiza con mediciones intrusivas y no-intrusivas. Los métodos intrusivos abarcan el uso de algún instrumento que es introducido al interior del flujo y a partir del contacto con el agua en movimiento se obtienen sus diferentes características (velocidad, aceleración, turbulencia, contenido de aire, etc.) (Goring & Nikora, 2002; Aberle, Rennie, Admiraal, & Muste, 2017). La influencia que presenta este tipo de equipos de medición en el patrón de flujo normalmente debe ser despreciable para no modificar las condiciones observadas en el modelo que reflejan el comportamiento de la estructura hidráulica. De acuerdo con las especificaciones y la geometría de

los aparatos de medición utilizados, existen condiciones de flujo limitantes (velocidades, calados, turbulencias, contenido de sedimentos, contenido de aire, etc.) para su funcionamiento óptimo. En caso de que no se cumplan estas condiciones, el resultado de la medición se torna inestable e inválida para el análisis de comportamiento hidráulico (Goring & Nikora, 2002; Leandro, Carvalho, Chachereau, & Chanson, 2012; Aberle, Rennie, Admiraal, & Muste, 2017).

Por otra parte, los métodos no-intrusivos para medición de velocidades tradicionalmente consisten en el uso de trazadores (físicos o químicos) y el ojo humano (Abrahams, Parsons, & Luk, 1986). Con el avance de tecnologías se ha podido aplicar cámaras fotográficas y de video para este propósito con el fin de tener mediciones más precisas del patrón de flujo y fenómenos presentes (Yang, Lin, Kao, Teng, & Raikar, 2018; Ghilardi, Franca, & Schleiss, 2014). En conjunto con el desarrollo de técnicas de programación y análisis de imágenes grabadas por cámaras, se han creado métodos de medición de velocidades de flujos donde se reconocen burbujas o partículas de sedimentos y se analizan sus trayectorias de movimiento (Bung & Valero, 2015; García, Viguera-rodíguez, Castillo, & Carrillo, 2018; Leandro et al., 2012; Raffel, Willert, Wereley, & Kompenhans, 2007; Ryu, Chang, & Lim, 2005; Yang et al., 2018; Ghilardi, Franca, & Schleiss, 2014; Roca Martínez et al., 2016). Las técnicas de medición no-intrusivas, por no interferir directamente con el flujo aceptan un rango más amplio de condiciones hidráulicas permitiendo su operación adecuada para obtener información válida en modelos físicos. Sin embargo, para fenómenos hidráulicos muy rápidos, es necesaria la

implementación de equipos que funcionen a una escala temporal reducida de manera confiable (Aberle et al., 2017).

Las cámaras de alta velocidad son herramientas con un enorme potencial como instrumentos de laboratorio (Roca Martínez et al., 2016). Por definición, este tipo de aparato permite visualmente observar fenómenos de manera detallada en escalas micro temporales. Es importante tener un entendimiento técnico y específico de las peculiaridades de este tipo de equipo para que los ensayos realizados con ellos sean representativos y repetibles. Para implementar este equipo en un contexto de laboratorio, es importante determinar su modo de uso óptimo en condiciones de ensayo simples y repetibles (Aberle et al., 2017). Se debe comparar los resultados obtenidos por la cámara y por otros métodos físicos disponibles y confiables para saber si la metodología aplicada es viable para el caso básico propuesto (Ghilardi et al., 2014). Solamente si el caso básico medido es validado, se podrá plantear metodologías y alcances más amplios.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar velocidades de flujo en canales hidrodinámicos a través del uso de la cámara de alta velocidad Photron Fastcam Mini Ux100 y procesamiento matricial en Matlab, así como validar las velocidades obtenidas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Proponer una metodología práctica de grabación de videos con la cámara de alta velocidad Photron Fastcam Mini Ux100, cuyas condiciones óptimas

de uso del equipo y de iluminación garanticen la obtención de información útil para el análisis matricial de velocimetría.

- Desarrollar una rutina de programación en Matlab para procesar la información obtenida a través de los videos registrados con la cámara de alta velocidad Photron Fastcam Mini Ux100 y determinar valores de velocidades medias de flujo.
- Comparar los resultados obtenidos con el procesamiento de imágenes mediante la metodología propuesta con valores experimentales de velocidad con el uso de un micro molinete.
- Plantear un manual práctico referente al uso de la cámara y la metodología propuesta.

1.3 Justificación

1.3.1 Justificación Teórica

El proyecto propone una metodología no intrusiva para la medición de velocidades de un flujo de agua en modelos hidráulicos mediante el seguimiento de un trazador químico con cámara de alta velocidad y análisis matricial de la información obtenida. Se realizará una investigación respecto a las técnicas existentes de medición de velocidad en flujos, sean intrusivos y no-intrusivos (Aberle et al., 2017; Ghilardi et al., 2014; Goring & Nikora, 2002; Muste, Kim, & González-Castro, 2010; Ryu et al., 2005). Adicionalmente se deberá investigar los aspectos específicos y técnicos del uso de cámaras de video y cámaras de alta velocidad como instrumentos de medición en el contexto hidráulico (Aberle et al., 2017; Ghilardi

et al., 2014; Ryu et al., 2005). Debido a que el método propuesto es no-intrusivo y el flujo no es modificado por la presencia del instrumento de medición de velocidad, así que se obtiene información directa sobre el patrón de flujo.

Con el uso de trazadores químicos, como el permanganato de potasio (solución acuosa de color morado), se produce un cambio de coloración que será registrado por la cámara de alta velocidad. El análisis de estas imágenes grabadas se basa en los patrones de colores en una señal RGB (Red, Green, Blue). La ausencia de instrumentos que alteren el patrón de flujo garantiza que se registrará exclusivamente la variación de los vectores velocidad que se producen en el fenómeno observado. Las estructuras hidráulicas en los modelos físicos normalmente son fabricadas con materiales transparentes, lo que facilita el registro con el instrumento óptico. Cuando se imponen condiciones óptimas de posicionamiento, iluminación y grabación, la cámara de alta velocidad permite la observación detallada de fenómenos físicos que ocurren en escalas de tiempo no perceptibles al ojo humano. Debido a la gran cantidad de datos que produce el análisis se requiere un tratamiento estadístico que permita obtener la información experimental. Para ello se implementará el procesamiento de la información con el programa Matlab (DeCoursey, 2003; Kvam & Vidakovic, 2007; NIST/SEMATECH, 2012; Goring & Nikora, 2002).

1.3.2 Justificación Metodológica

Se implementará la medición de velocidad de flujo monofásico basada en conceptos de discretización de una señal de video (RGB). Para que esta señal sea analizada matricialmente en términos de intensidad de píxeles (unidad puntual de

un imagen) (Leandro et al., 2012, Roca Martínez et al., 2016) se utilizará la aplicación Matlab (programa de análisis matricial mediante la redacción de rutinas algorítmicas) para procesar la variación de las imágenes capturadas a lo largo del tiempo. Mediante la interacción entre las distintas capas de color presentes en la señal digital en el momento del traslado del trazador químico dentro del flujo monofásico, el programa calcula los rangos de tiempo necesarios para el movimiento del trazador registrado entre dos puntos longitudinales fijos. Con el análisis propuesto, se podrán obtener resultados de velocidades medias de un flujo monofásico observado. Con el objetivo de validar la metodología propuesta, se realizarán ensayos adicionales con micro molinete para la medición física de velocidad de flujo. En los ensayos cuyas velocidades de flujo no excedan la condición limitante del uso de métodos intrusivos de medición, se podrán comparar los resultados obtenidos por ambos métodos (Ghilardi et al., 2014).

En investigaciones similares ya se han utilizado metodologías con cámaras de alta velocidad y el análisis matricial de los videos obtenidos con resultados representativos (Bung & Valero, 2015; Leandro, Bung, & Carvalho, 2014; Westerweel, 1997; Yang et al., 2018; Ghilardi et al., 2014). En la literatura técnica se reporta que debido a ciertas discrepancias presentes en los resultados (picos o valles no representativos en el conjunto de valores de velocidad), es necesario realizar una operación de filtrado estadístico de estos valores para obtener curvas más representativas (DeCoursey, 2003; Kvam & Vidakovic, 2007; NIST/SEMATECH, 2012; Goring & Nikora, 2002).

1.3.3 Justificación Práctica

Los instrumentos de medición que deben ser introducidos en el flujo, alteran el patrón de velocidades. Si el rango de velocidades es relativamente bajo, esta alteración no resulta significativa para los valores registrados. Por el contrario, cuando se introduce instrumentos de medición en flujos de alta velocidad, la alteración es importante y sin duda la afectación al patrón de flujo no permite obtener la información experimental necesaria para el trabajo de optimización de estructuras hidráulicas con modelos físicos. La medición de velocidad de flujo obtenida con ayuda de la cámara de alta velocidad, al no interferir con el mismo, refleja el comportamiento real del medio, lo que es fundamental para alcanzar los objetivos propuestos en la investigación (Chanson, 1999).

La implementación de la cámara de alta velocidad y el análisis matricial con el programa Matlab permitirá registrar características de fenómenos hidráulicos, cuyas velocidades sobrepasan la visión humana e impiden el uso de métodos clásicos intrusivos de medición (Aberle et al., 2017). Con esto, se tendrá el apoyo práctico y experimental necesario para la realización segura y eficiente de proyectos de infraestructura hidráulica.

Capítulo II

2. Marco Conceptual y Estado del Arte

2.1 Marco Conceptual

2.1.1 *Flujo a Superficie Libre*^[1]

Uno de los fundamentos de la hidráulica es el estudio de las características de flujos a superficie libre. Es un tema que provocó la curiosidad del ser humano desde tiempos primordiales en los cuales se deseaba entender el funcionamiento de ríos y otros flujos de agua naturales para el uso del recurso hídrico a nuestro favor. Hoy día, con los avances tecnológicos y científicos resultantes de siglos de investigación e ingenio, se ha podido observar y aplicar conceptos de la hidráulica para la realización de diversos proyectos de infraestructura.

Existen algunas recomendaciones para que un flujo sea considerado como a superficie libre y se puedan aplicar los conceptos teóricos referentes a su funcionamiento:

- El flujo debe tener una superficie (libre) en contacto con el aire, de tal manera que esta zona del flujo esté sometida a la presión atmosférica.
- La única fuerza externa actuante que impulsa las partículas del flujo es la gravedad (por eso los flujos a superficie libre también son conocidos como flujos a gravedad).

1. La sección 2.1.1 tiene como referencia bibliográfica Chow, 1994

- La posición del calado puede variar según el espacio y el tiempo dependiendo de ciertas condiciones del entorno y de la magnitud del caudal del flujo en un momento dado.

Dentro de la categoría de flujos a gravedad, existen las siguientes maneras de clasificarlos para entender sus características. El tipo de un flujo es una clasificación que depende de la variabilidad de sus condiciones hidráulicas sea en el espacio o en el tiempo. Si el flujo

presenta variaciones de comportamiento con respecto al tiempo en un intervalo dado, se afecta su permanencia y es considerado de tipo no-permanente. En cambio, la variación de condiciones hidráulicas en el espacio afecta la uniformidad del flujo. Cualquier flujo puede ser categorizado según estos parámetros. Por ejemplo, el flujo natural de un río suele ser no uniforme y no permanente debido a su alta variabilidad geométrica y los distintos caudales que fluyen por él según condiciones climáticas; en contraste, el flujo que pasa por un canal hidrodinámico tiende a ser permanente y uniforme ya que sus condiciones de geometría se mantienen constantes y el caudal de alimentación de estas estructuras suele venir de una bomba que mantiene valores constantes de caudal según los requerimientos del usuario.

2.1.1.1 Concepto de Caudal y Velocidad Media ^[2].

Cuando se realiza un análisis del movimiento en flujos permanentes desde una perspectiva que considera el movimiento individual de las moléculas de manera conceptual, se usan las líneas de corriente para ilustrar las trayectorias de dichas partículas y el campo de velocidades presente en el fluido. En flujos laminares, las

2. La sección 2.1.1.1 tiene como referencia bibliográfica Sotelo Avila, 1997

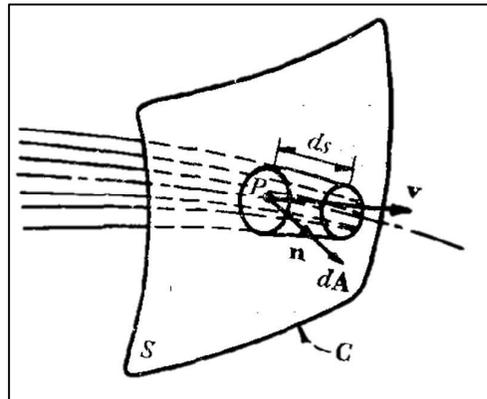
líneas de corriente tienen trazados principalmente rectos y constantes, mientras que en flujos turbulentos estas pueden variar en sus trayectorias. En flujos altamente turbulentos, las líneas de corriente nunca pueden cruzarse ya que eso permitiría la presencia teórica de dos o más partículas de agua en un mismo punto en el espacio.

Considerando un flujo permanente de agua en un instante inicial t_0 (s), se puede imponer una superficie geométrica tridimensional y a partir de esta delimitar una parte infinitesimal dA (m^2) de su área total A (m^2). Considerando las líneas de corriente que existen a lo largo del borde de esta área dA , se forma un tubo de corriente, por el cual fluye una porción del flujo. Al escoger una partícula cualquiera en el tubo de corriente formado por dA y delimitando su línea de corriente correspondiente, se tiene que esta partícula se traslada una porción infinitesimal de su trayectoria ds (m) durante un intervalo infinitesimal de tiempo dt (s) a una velocidad V (m/s). Durante el mismo intervalo de tiempo se tiene también que

una cantidad infinitesimal de volumen del fluido dv (m^3) pasa por el área delimitada de dA de tal manera que dv se puede definir de la siguiente manera:

$$dv = ds * dA = V * dA * dt \quad (2.1)$$

Figura 2.1 Diagrama Explicativo del Concepto de Caudal



Nota. Recuperado de Sotelo Avila, G. (1997). Hidráulica General Vol. 1 (Decimoctv). Mexico, DF: Editorial Limusa.

Considerando lo mencionado y relacionando este comportamiento hidráulico infinitesimal al funcionamiento de un flujo en su totalidad, se tiene que el flujo volumétrico que atraviesa toda su sección transversal se define de la siguiente manera:

$$Q = \frac{dv}{dt} = \iint_A V * dA \quad (2.2)$$

La cantidad Q (m^3/s) es el caudal o gasto del flujo, el cual define cuanto volumen de un fluido se desplaza en un intervalo de tiempo dado. A partir de este concepto, se puede obtener la velocidad media del flujo V , asumiendo que esta se distribuye uniformemente sobre toda la sección y obtiene mediante la siguiente expresión:

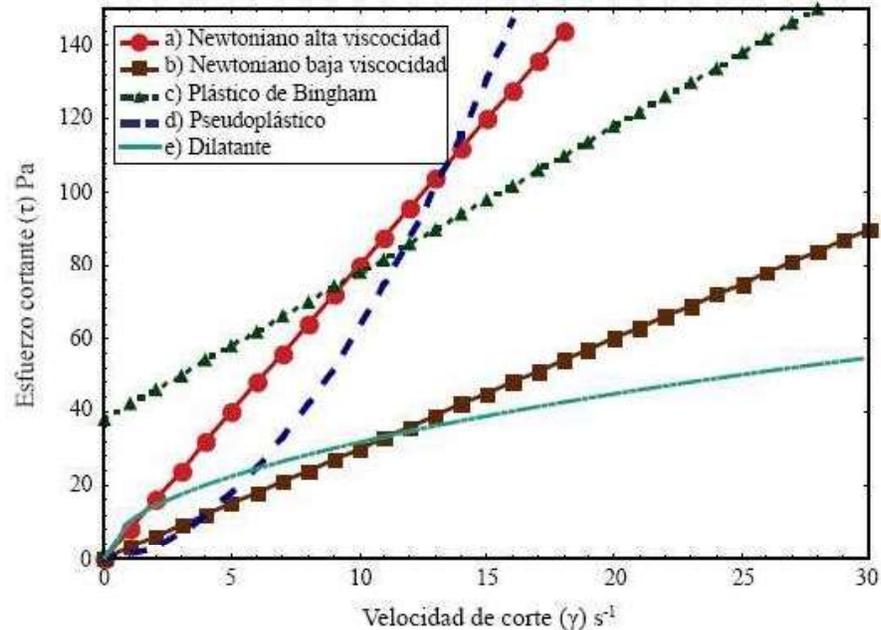
$$V = \frac{\iint_A V * dA}{A} = \frac{Q}{A} \quad (2.3)$$

La obtención de la velocidad media o velocidad representativa de un flujo es muy útil para la realización de cálculos y el diseño de estructuras hidráulicas ya que esto permite simplificar una serie de fenómenos que ocurren en flujos a gravedad a un solo valor ampliamente aplicable en ecuaciones pertinentes.

2.1.1.2 Viscosidad ^[3].

La viscosidad de un fluido es la propiedad física que dicta su resistencia a la deformación y fluidez. La viscosidad se presenta debido a la interacción y cohesión entre las partículas que componen el flujo de agua. Con un flujo de un material viscoso newtoniano (es decir, un material que se deforma linealmente de acuerdo a la aplicación de esfuerzos cortantes y cuya viscosidad es constante) que fluye sobre una superficie de fondo sólida, se considera que las partículas del medio se comportan como un conjunto de placas o láminas de espesor infinitesimal que se deslizan entre sí y cuyas velocidades varían incrementalmente según la posición vertical de cada lamina respecto al fondo.

Figura 2.2 Gráfica del Comportamiento Mecánico (Esfuerzo Cortante vs. Velocidad de Deformación) de Materiales Newtonianos y no Newtonianos



Nota. Recuperado de Gómez-Arias, E., Andaverde, J., Santoyo, E., & Urquiza, G. (2009). Determinación de la viscosidad y su incertidumbre en fluidos de perforación usados en la construcción de pozos geotérmicos: aplicación en el campo de Los Humeros, Puebla, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(2), 516–529. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742009000200018.

La viscosidad (dinámica) es el factor proporcional que relaciona el esfuerzo tangente entre las placas y el gradiente transversal de velocidades presentes a lo largo del calado del flujo de la siguiente manera:

$$\tau = \mu \frac{\partial V}{\partial d} \quad (2.4)$$

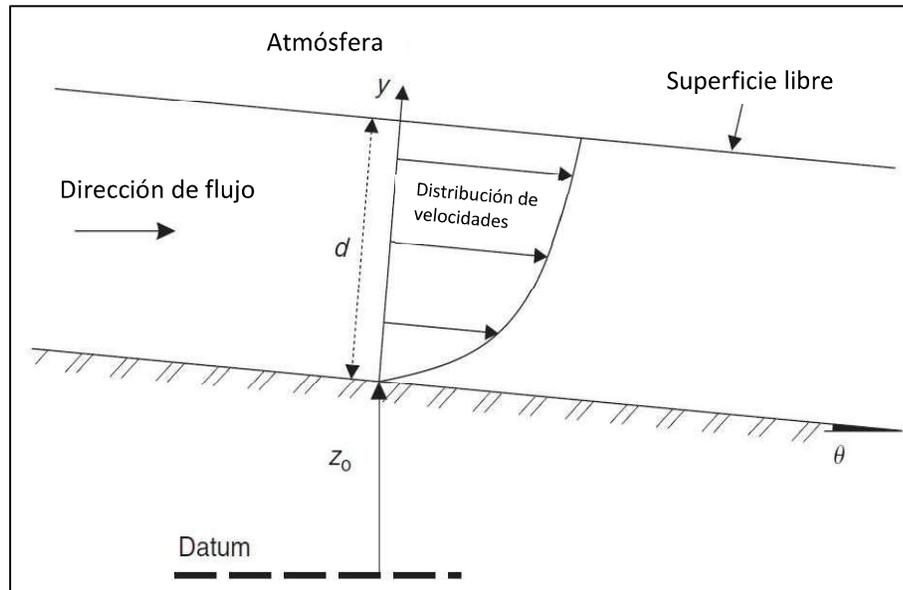
Donde, τ es el esfuerzo tangente entre las placas en el flujo (N/m^2), μ es la viscosidad dinámica ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$), ∂V es el diferencial de velocidad (m/s) y ∂d es el diferencial de calado igual al espesor de cada lamina del flujo (m).

2.1.1.3 Perfil de Velocidad ^[4].

Debido al efecto viscoso de resistencia de flujo y los tipos de materiales que componen el entorno de un flujo a superficie libre, se presencian algunas particularidades respecto a la distribución de velocidades a lo largo del calado de un flujo. En los puntos de una sección transversal de un flujo en los cuales el agua está en contacto directo con un material sólido (por ejemplo, las paredes internas de un canal), el esfuerzo de corte entre los dos materiales es muy fuerte y las velocidades de las partículas del flujo en estos puntos son consideradas nulas. En la propia superficie libre del flujo, se presencia la interacción entre el agua en movimiento y el aire la cual causa una reducción de velocidades del flujo en los puntos verticales más altos del calado.

4. La sección 2.1.1.3 tiene como referencia bibliográfica Chanson, 1999

Figura 2.3 Diagrama de Perfil de Velocidades de Flujo



Nota. Recuperado de Chanson, H. (1999). *The Hydraulics of Open Channel Flow – An Introduction* (2nd ed., Vol. 1). [https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00018-2](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00018-2).

2.1.1.4 Número de Reynolds ^[5].

Los flujos a superficie libre pueden presentar diferentes niveles de turbulencia entre sus partículas, es decir el nivel de aleatoriedad de trayectorias del movimiento de partículas individuales de un flujo. Principalmente según la velocidad del flujo observado, este puede presentar un funcionamiento laminar (líneas de corriente rectas), turbulento (líneas corriente sinuosas y variables) o diversos estados intermedios entre los mencionados. Con fines de caracterizar estas condiciones de flujo, se puede relacionar los efectos de la viscosidad con su inercia utilizando el número adimensional según Reynolds:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (2.5)$$

Donde Re es el número adimensional de Reynolds, V es la velocidad media del flujo (m/s), L es una longitud característica del flujo (en el caso de flujos a gravedad, este es el calado d) (m) y ν (letra griega "Nu") es la viscosidad cinemática del flujo (m²/s).

Con el aumento del número de Reynolds de un flujo, este tiene un comportamiento más turbulento. Se considera generalmente que con valores inferiores a $Re = 500$ el flujo es laminar, si es mayor a $Re = 2000$ el flujo es turbulento, con valores entre los descritos previamente el flujo tiene un comportamiento transitorio.

2.1.1.5 Régimen de Flujo ^[6].

Otro criterio utilizado para caracterizar los flujos a superficie libre es su régimen, el cual depende del número adimensional según Froude. El número de Froude relaciona el efecto de fuerzas inerciales del flujo con la fuerza gravitacional actuante mediante la siguiente formula:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (2.6)$$

Donde Fr es el número adimensional de Froude, V es la velocidad media del flujo (m/s), g es la aceleración de la gravedad (m/s^2) y L es una longitud característica del flujo (en el

caso de flujos a superficie libre, esto corresponde a la profundidad hidráulica d) (m). Cuando se obtiene un valor unitario de número de Froude, el flujo se encuentra en un estado crítico. En el caso de un flujo crítico se tiene que $V = \sqrt{gd}$, esta velocidad es equivalente a la velocidad de celeridad de pequeñas ondas gravitacionales en un canal de agua a pequeños calados. Cuando el valor de Froude se reduce a valores menores que 1, las fuerzas gravitacionales tienen un papel más influyente en el comportamiento del flujo y este es considerado subcrítico. Los flujos subcríticos tienden a tener calados más altos y velocidades de flujo bajas. Cuando se tiene un valor de número de Froude mayor a 1, el flujo es supercrítico debido a

la mayor influencia de las fuerzas inerciales en comparación con las fuerzas gravitacionales. Los flujos supercríticos suelen presentar calados relativamente pequeños y altas velocidades de flujo.

2.1.2 Instrumentos de Medición de Velocidad de Flujo ^[7]

En el estudio del comportamiento del agua se puede aplicar el uso de instrumentos de medición y metodologías prácticas de adquisición de información para complementar y/o comprobar el campo de conocimiento teórico de la hidráulica. Existe una gran variedad de instrumentos y metodologías de uso para la medición de velocidades de flujos de agua, dicha categoría de actividades experimentales es nombrada como velocimetría de flujos. Sea en modelos físicos (representaciones de estructuras hidráulicas a escala en contextos de laboratorio) o en el campo (cuerpos hídricos naturales), la elección de un método apropiado para la medición de velocidad de un flujo de agua en un dado contexto es muy importante para garantizar resultados coherentes y verificables.

2.1.2.1 Métodos Intrusivos.

Los métodos intrusivos involucran la introducción del equipo de medición en un flujo de agua en movimiento para su funcionamiento. Existen diferentes maneras de conseguir información de un flujo con este tipo de instrumento, pero el contacto entre el instrumento y las partículas de agua es lo esencial para obtener los datos necesarios. Ya que se requiere introducir un objeto al flujo en movimiento, su presencia entre las partículas de agua impide su movimiento natural. Para reducir los efectos que tienen estos obstáculos al movimiento del flujo, los fabricantes de dichos instrumentos suelen diseñarlos de tal manera que sus formas geométricas

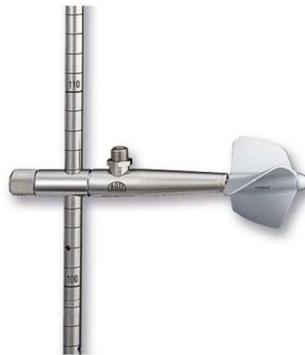
7. Todos los ítems y sub-ítems de la sección 2.1.2 tienen como referencia bibliográfica Aberle et al., 2017 a no ser que se indique lo contrario.

sean hidrodinámicas. Esta característica implica priorizar trazados de instrumentos curvos y suaves de tal manera que las líneas de flujo se distorsionen progresivamente en vez de ser completamente y bruscamente interrumpidas.

2.1.2.1.1 Molinetes.

Los molinetes son equipos de muy amplio campo de aplicación por su simplicidad de uso. Basados en principios similares a los de una turbina hidráulica, este equipo es compuesto de una hélice que al estar introducida en un flujo en movimiento y apuntada en el sentido contrario de la dirección principal del caudal gira de acuerdo a la velocidad del flujo. Con cada giro completo por la hélice, el equipo envía un pulso eléctrico a un contador de giros. El contador informa al usuario el dato necesario para poder calcular la velocidad de flujo medida, sea el número de giros en un tiempo dado o el tiempo necesario para llegar a un número dado de giros de la hélice.

Figura 2.4 *Micro Molinete OTT C2.*



Nota. Recuperado de OTT Hydromet GmbH. (2019). Technical Data OTT C2 (p. 3). p. 3. <https://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-c2-385/productAction/outputAsPdf/>.

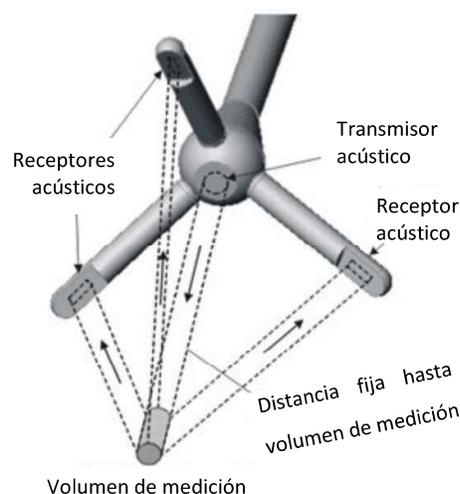
Este instrumento permite la obtención de mediciones puntuales, es decir, dependiendo de la posición del instrumento dentro de la sección transversal del flujo, se presencian variaciones de su velocidad. Lo que se espera con la obtención de una serie de valores de velocidades puntuales de flujo a lo largo su calado es que el conjunto de valores siga una distribución teórica de velocidades (como ilustrado en la imagen 2.1-1). Teniendo un perfil de velocidades de un flujo dado, existen algunas maneras de calcular el valor de velocidad media para este flujo. El método más fácil y más comúnmente utilizado para ello es obtener el valor de la velocidad del flujo a la profundidad de 60% del calado a partir de la superficie libre. Un método similar consiste en la medición de las velocidades puntuales del flujo a 80% y a 20% del calado a partir de la superficie libre y obtener un valor promedio entre ellos para tener la velocidad media del flujo. Para este cálculo de velocidad media de flujo, se recomienda tomar la mayor serie de datos puntuales de velocidad posible (especialmente en la parte inferior de sección transversal) para tener la curva detallada y así poder obtener una velocidad media representativa.

2.1.2.1.1 Velocímetro Acústico Doppler.

La sonda Velocímetro acústico Doppler (o ADV según el nombre en inglés: Acoustic Doppler Velocimeter) funciona mediante el efecto "Doppler", el cual se basa en el principio de que, si se tiene un generador y un receptor de pulsos (sea luz, sonido, etc.) entre los cuales existe un desplazamiento relativo, la lectura del receptor de pulsos se verá distorsionada en comparación con los pulsos emitidos de acuerdo al movimiento relativo entre estos elementos. Si el emisor se aleja del receptor (o viceversa), la frecuencia de los pulsos leídos por el receptor es menor a la emitida; pero si el emisor se acerca al receptor (o viceversa), la frecuencia leída es

incrementada. Una aplicación de este fenómeno se presencia en los velocímetros de flujo tipo ADV, donde el instrumento en si contiene el generador de pulsos y un conjunto de puntos de recepción de la señal generada. Existen algunas configuraciones diferentes para los equipos de este tipo, todos necesitan de un generador de pulsos y normalmente 3 o 4 transductores receptores de señal posicionados y orientados alrededor del centro emisor de tal manera que todos los transductores tengan un punto de lectura en común. Cuando se tienen 3 transductores, ellos tienen una inclinación de 120° entre ellos. Para medir velocidades en los ejes x & y, se hacen uso 2 de los lectores mientras que cuando se quiere medir velocidades en 3 ejes espaciales se utilizan los 3 lectores. Para la configuración de 4 transductores de lectura de señales (también conocido como la configuración tipo “Vectrino”), los transductores forman dos planos independientes y perpendiculares, los cuales deben ser posicionados paralelamente y perpendicularmente al sentido principal del flujo.

Figura 2.5 Diagrama de una Sonda de ADV



Nota. Recuperado de Sontek. (2017). Acoustic Doppler Velocimeters (ADVs ®) (pp. 3–6). pp. 3–6.

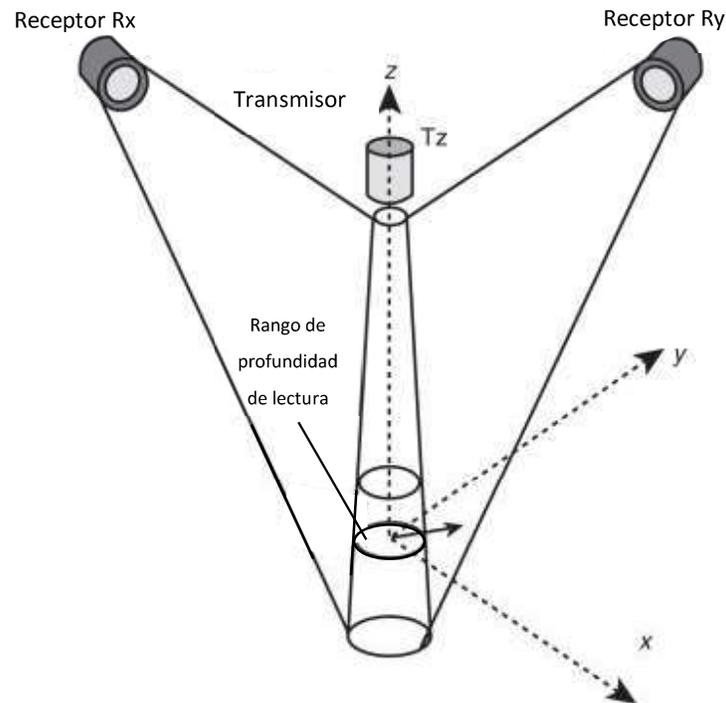
Para su uso, el equipo debe ser introducido al flujo de tal manera que el generador y los puntos receptores de pulsos estén completamente sumergidos y orientados en la misma dirección principal del flujo. Al generar una señal sónica de frecuencia constante dentro del flujo, esta se traslada y choca contra elementos físicos mecánicamente pasivos (partículas sólidas, burbujas de aire, plancton, puntos de variación de densidad del flujo sea por salinidad o temperatura), introducidos al medio. Ya que estos elementos se trasladan de acuerdo a su posición y velocidad local del flujo, existe un desplazamiento relativo de alejamiento entre estos elementos y el instrumento, el cual hace con que los pulsos reflejados por los elementos tengan una frecuencia menor a la generada. Los dispositivos de lectura de pulsos captan las señales de baja frecuencia y mediante un procesamiento interno de la señal leída debido a sus posicionamientos y orientaciones se pueden obtener valores de velocidad del flujo en el punto de lectura.

2.1.2.1.2 Perfilador de Velocidad Acústico Doppler.

Este tipo de equipos (también conocidos como ADVP's de acuerdo a su nombre en inglés: Acoustic Doppler Velocity Profiler) permite la obtención de perfiles instantáneos bidimensionales y tridimensionales de velocidades de flujo mediante el fenómeno de Doppler. En su configuración más usual, se tiene un generador de pulsos rodeado en planta por 4 receptores de señal, todos estos elementos deben estar sumergidos en el flujo dentro de un tanque de tal manera que las señales enviadas y recibidas deben atravesar una lámina de material polimérico transparente (interfaz entre fluido estancado del tanque de instrumento y flujo en movimiento observado). Para evitar mayores perturbaciones al flujo, el tanque de

sumergencia del instrumento debe ser introducido al flujo superficialmente (entre 3 mm y 5 mm de profundidad).

Figura 2.6 Diagrama de Componentes de un ADVP.



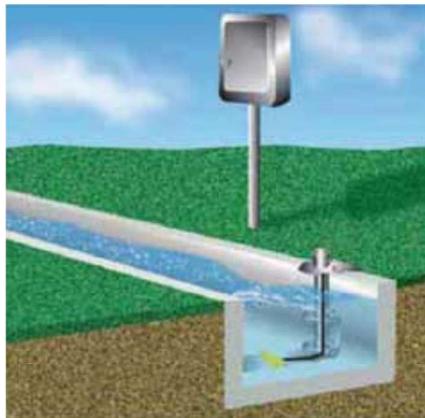
Nota. Recuperado de Thorne, P. D., & Bell, P. S. (2009). Acoustic Measurement of Near-Bed Sediment Transport Processes. *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 38–51). <https://doi.org/10.1016/B978-012374473-9.00736-0>.

La obtención de los distintos valores puntuales de velocidad para formar un perfil se basa en el tiempo de viaje de las señales entre el momento de su envío y el de la recepción de la señal rebotada. Si la señal tiene un mayor tiempo de viaje, significa que se trasladó hasta una mayor distancia en el calado del flujo medido. Debido a la variabilidad de los ángulos de trayectoria de las señales que rebotan de las partículas en el flujo, los receptores de señal deben ser transductores de ángulo de recepción de señal ancho de tal manera que puedan captar señales que reboten de cualquier punto en el calado analizado.

2.1.2.1.3 Electromagnético ¹⁸.

El método electromagnético de medición de velocidades de flujo consiste en la inserción de una sonda que genera un campo magnético en un punto del flujo para medir su velocidad mediante el voltaje generado por su movimiento. Según la ley de Faraday, un material conductor (en este caso, el agua) que pase por dentro de un campo magnético genera una fuerza electromotriz (una diferencia de potencial medible en voltaje). El voltaje resultante del movimiento es proporcional a la velocidad del flujo. El instrumento en si tiene entonces la función de generar el campo magnético apropiado y medir el voltaje presente en el flujo para que este dato luego posibilite el cálculo de la velocidad del flujo en el punto de medición.

Figura 2.7 Diagrama Método Electromagnético.



Nota. Recuperado de Ramas Ayala, J. (2014). Métodos disponibles para la medida de la velocidad y el caudal en colectores de saneamiento, aguas residuales y vertidos. *TecnoAqua*, (7), 40–52. <https://doi.org/ISSN: 2340-2091>.

2.1.2.1 Métodos No Intrusivos.

Los métodos no intrusivos consisten en el uso de instrumentos que no necesitan entrar en contacto con el agua en movimiento para poder medir características de su comportamiento hidráulico. La no alteración del flujo por la presencia de un

8. La sección 2.1.2.1.4 tiene como referencia bibliográfica Ramas Ayala, 2014

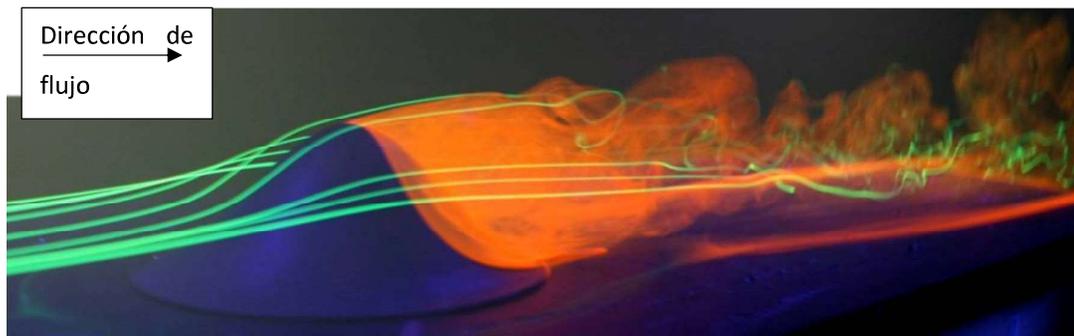
instrumento hace con que este tipo de equipo de medición presente medidas detalladas y representativas de fenómenos hidráulicos.

2.1.2.1.1 Visualización.

La observación e interpretación visual del comportamiento físico del agua es la base para técnicas fundamentales del estudio de la hidráulica experimental desde el inicio del desarrollo del conocimiento científico del agua.

De manera general, el proceso de experimentación hidráulica mediante el uso de la visualización de flujos actualmente consiste en la elección y uso de un trazador pasivo en términos de su comportamiento hidráulico, iluminación de dicho trazador en el flujo, registro de imágenes compuestas por la luz reflejada o disipada por el trazador y la interpretación de los patrones de iluminación grabados.

Figura 2.8 Ejemplo de Técnicas de Visualización de Flujo (Trazador Químico).



Nota. Recuperado de Bell, J. H., Heineck, J. T., Zilliac, G., Mehta, R. D., & Long, K. R. (2012). Surface and flow field measurements on the FAITH hill model. 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. <https://doi.org/10.2514/6.2012-704>.

La elección apropiada de los equipos que deben ser utilizados para medir un fenómeno hidráulico visualmente es sumamente importante. El uso de la luz en estos métodos visuales puede ser cualitativa (aumentar la claridad y visibilidad de

un fenómeno) o cuantitativa (uso de una frecuencia específica de luz para resaltar propiedades reflectivas características de ciertos trazadores). Así mismo, las cámaras existentes en el mercado presentan diferentes capacidades de visualización y registro de imágenes (variabilidad de color, detalle de imagen, velocidad de captura de imágenes, etc.).

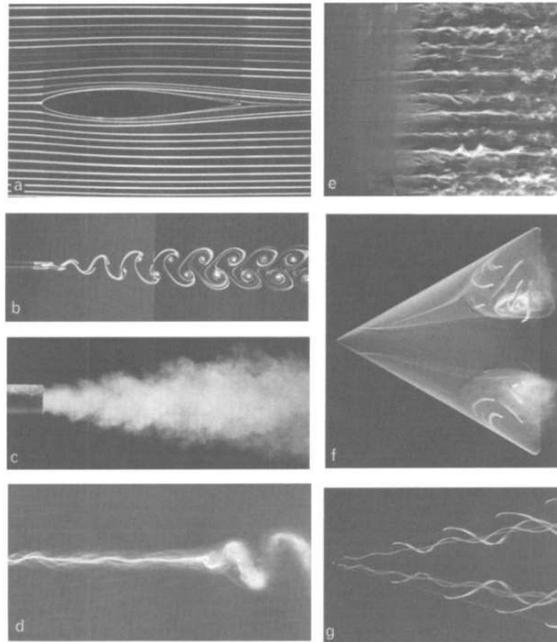
2.1.2.1.1.1 Trazadores Químicos.

Una técnica de medición de velocidades de flujo muy utilizada en campo es el uso de trazadores químicos acuosos. Este método es tradicionalmente utilizado como una manera fácil y práctica de medir velocidades medias de flujos mediante observación humana. Para ello se escogen dos puntos longitudinales en un flujo entre los cuales se puede medir la distancia y, luego de inyectar una cantidad dada de trazador, medir el tiempo necesario para el traslado del trazador entre ambos puntos. Con el avance de tecnologías de grabación de videos y análisis de imágenes digitales, se ha podido entender de manera mucho más detallada la manera en la cual los trazadores químicos siguen el movimiento de un flujo de agua. Existen diferentes tipos de trazadores acuosos en el mercado, los cuales presentan diferentes características de comportamiento en el agua y diferentes maneras de interactuar con fuentes de luz. Cuando se trabaja con el uso de luz blanca para la iluminación de trazadores químicos, es muy importante la configuración de equipos de iluminación y superficies reflectoras de fondo para que el contraste entre el fondo y el trazador sea evidente para el equipo de visualización utilizado.

El uso de trazadores acuosos en un flujo se basa en la suposición de que estas sustancias son mecánicamente pasivas, es decir, sus partículas individuales

siguen las mismas líneas de flujo que las partículas de agua del flujo analizado. Por esta razón, estas sustancias son usualmente utilizadas para caracterizar estructuras de turbulencia en flujos y en mediciones de velocidades de flujo.

Figura 2.9 *Técnicas de Inyección de Trazador Químico*



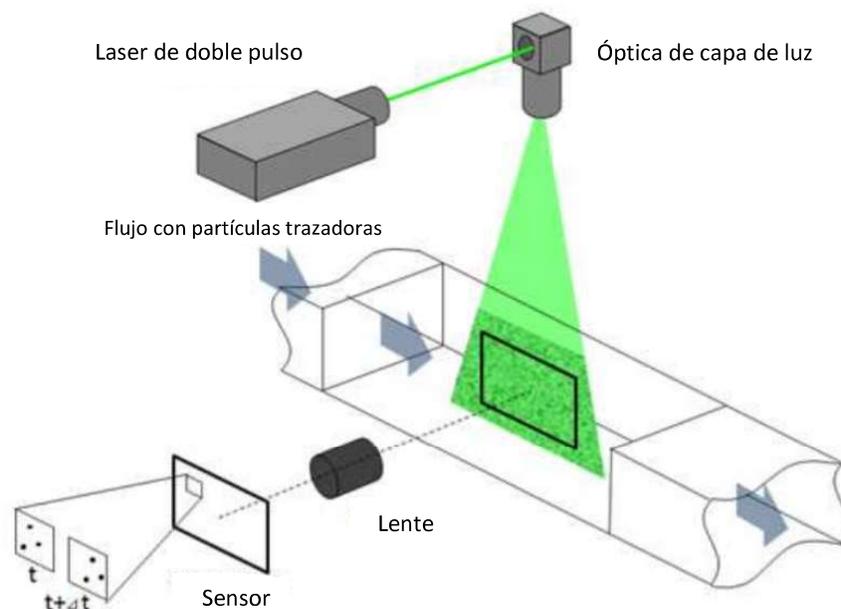
Nota. Yang, W. J. (2018). Handbook of Flow Visualization.
<https://doi.org/10.1201/9780203752876>.

2.1.2.1.1.2 Velocimetría de Imágenes de Partículas.

Esta metodología (también conocida como PIV de acuerdo a su nombre en inglés: Particle Image Velocimetry) es un tipo de medición no intrusiva basada en la visualización y análisis de imágenes de partículas trazadoras sólidas introducidas a un flujo. Con ello se pueden obtener campos de velocidades instantáneos, momentos de órdenes superiores de la distribución de probabilidad de velocidades en un dominio amplio. Las partículas sólidas que deben ser utilizadas en este método deben ser cuidadosamente seleccionadas ya que, en general, partículas de muy grande tamaño pueden presentar un comportamiento mecánico distinto a

lo del flujo, y en cambio partículas de tamaños muy pequeños pueden no presentar contrastes de luminosidad suficientes para su reconocimiento por la cámara y/o el análisis posterior de las imágenes. Se recomiendan partículas de diámetros entre 10 y 100 micrones fabricadas de materiales hidrófilos para que su dispersión en el flujo sea fácil.

Figura 2.10 Diagrama Método PIV



Nota. Recuperado de Sun, Z., Ni, H., Chen, H., Li, S., Lu, G., & Yu, J. (2015). Designing and optimizing a stirring system for a cold model of a lithium electrolysis cell based on CFD simulations and optical experiments. *RSC Advances*, 5(103), 84503–84516. <https://doi.org/10.1039/c5ra13856f>.

La iluminación del flujo observado debe ser proporcionada por un disparador láser con una frecuencia del espectro de luz específica y una frecuencia de disparos controlados. La sincronización entre la frecuencia de disparos de láser para iluminar el modelo con el equipo de grabación de imágenes es necesaria para garantizar que cada “frame” (imagen individual de un video) grabada por la cámara tenga un pulso laser correspondiente. El láser debe estar configurado para que con cada

disparo se forme una capa de luz, por la cual deben atravesar las partículas sólidas en el flujo. Además, existen diversas configuraciones para el uso de múltiples equipos de grabación de imágenes posibles para la obtención de perfiles de velocidad de flujo a diferentes niveles de detalle (ej. 2 cámaras para un perfil de velocidades tridimensionales en un dominio plano, 4 cámaras para un perfil de movimiento tridimensional en un dominio tridimensional, etc.).

El análisis realizado para interpretar las imágenes grabadas en esta metodología tiene como objetivo determinar el desplazamiento y la velocidad de grupos de partículas que se encuentren en subdivisiones del dominio total. El análisis se realiza mediante la comparación entre 2 o más imágenes consecutivas. Utilizando técnicas de correlación entre mudanzas abruptas de luminosidad en los ejes principales de las imágenes grabadas, se pueden determinar las posiciones de las partículas en cada subdivisión. Luego de calcular las diferencias de posicionamiento de las partículas en distintos momentos en el tiempo, se puede compararlas con la diferencia de tiempo en las dos instancias analizadas para obtener la velocidad de desplazamiento.

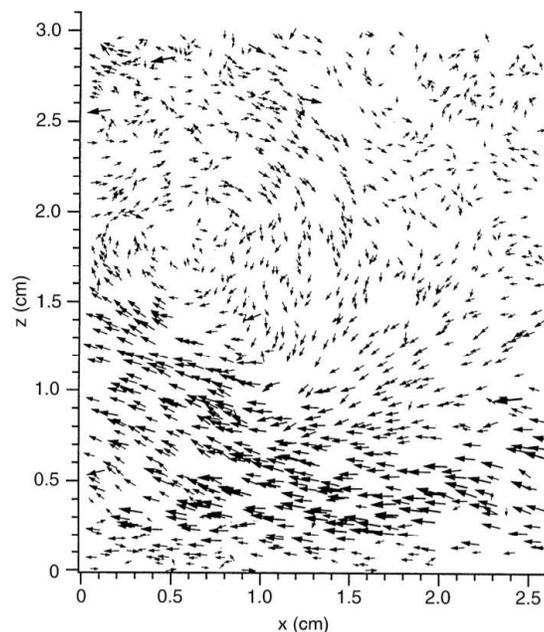
2.1.2.1.1.3 Velocimetría de Seguimiento de Partícula.

De manera similar al método descrito previamente, este método (también conocido como PTV según su nombre en inglés: Particle Tracking Velocimetry) consiste en la visualización y análisis de imágenes registradas de un flujo de agua con partículas de sedimento que se trasladan a velocidades correspondientes a las velocidades del flujo en sí. Las partículas introducidas al flujo también deben ser

iluminadas con un láser sincronizado al “framerate” (frecuencia de captura de imágenes en un video) de la cámara utilizada.

La diferencia entre el PIV y PTV es en el abordaje del análisis matricial de las imágenes grabadas. El PTV visa determinar el posicionamiento y seguir el movimiento de partículas individuales para determinar las velocidades presentes en el flujo en secuencias de imágenes consecutivas. Debido a esto, se requiere una concentración de partículas trazadoras mucho menor que la necesaria para ensayos de PIV. Se utilizan técnicas similares de correlación de cambios de luminosidad entre los ejes principales de las imágenes registradas, pero sin tenerlas subdivididas en ventanas discretas.

Figura 2.11 Resultados de Seguimiento de Partículas Trazadoras Individuales por el Método PTV

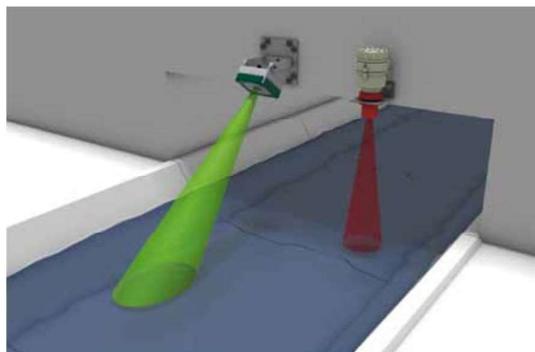


Nota. Recuperado de Cowen, E. A., & Monismith, S. G. (1997). A hybrid digital particle tracking velocimetry technique. *Experiments in Fluids*, 22(3), 199–211. <https://doi.org/10.1007/s003480050038>.

2.1.2.1.2 Radar ^[9].

Una aplicación no intrusiva del efecto Doppler para medir velocidades de flujo se presencia en las tecnologías de velocímetros de radar. Se tiene un equipo que transmite y recibe señales de radio diagonalmente hacia la superficie libre de un flujo. Las señales emitidas por el instrumento son de frecuencia constante y luego de rebotar contra el flujo en movimiento, el equipo lee la frecuencia de la onda de retorno. A partir de la variación de frecuencia dada por el choque de las ondas de radio con la superficie del flujo en movimiento se puede determinar su velocidad superficial. Utilizando relaciones empíricas se puede calcular la velocidad media del flujo a partir de este dato, pero este método resulta no ser muy preciso. Esta tecnología suele ser aplicada en estructuras hidráulicas que contengan flujos con grandes contenidos de sólidos o caudales altamente abrasivos ya que estas condiciones impiden el uso de métodos intrusivos más precisos. Además, con este método es posible la obtención de datos de velocidad superficial ininterrumpidamente durante las 24 horas del día con bajos requerimientos de mantenimiento.

Figura 2.12 Diagrama de Método por Radar



Nota. Recuperado de Ramas Ayala, J. (2014). Métodos disponibles para la medida de la velocidad y el caudal en colectores de saneamiento, aguas residuales y vertidos. TecnoAqua, (7), 40–52. <https://doi.org/ISSN: 2340-2091>.

2.2 Estado del Arte

| Autor(es) | Año y Lugar | Título | Objetivo | Resumen | Resultado |
|--|--|---|--|--|--|
| J. Leandro, R. Carvalho, Y. Chachereau, H. Chanson | 2012, School of Civil Engineering, The University of Queensland, Brisbane, Australia | Estimating void fraction in a hydraulic jump by measurements of pixel intensity | Determinar el contenido de aire en un resalto hidráulico mediante una metodología de visualización del flujo y el análisis de intensidad de píxeles de las imágenes registradas. | Un resalto hidráulico es un fenómeno de auto aireación de un flujo dado por la transición entre un flujo supercrítico y un flujo subcrítico. La metodología propuesta se basa en la hipótesis que la concentración de aire se relaciona a la intensidad de luminosidad de los píxeles visualizados por una cámara. Se hará un análisis de las intensidades de luminosidad en una matriz bidimensional cuya imagen cubre todo el resalto. | Se realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos por la cámara y sondas de contenido de aire y se pudo validar el método propuesto. Se pueden obtener valores instantáneos de contenido de aire y valores promediados a lo largo del tiempo sin perturbar al flujo mediante la metodología propuesta. Los resultados obtenidos son más representativos del fenómeno cercano a la pared que el fenómeno en el centro del flujo. |
| T Ghilardi, M J Franca and A J Schleiss | 2014, Laboratory of Hydraulic Constructions (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Station 18, 1015 Lausanne, Switzerland | Bulk velocity measurements by video analysis of dye tracer in a macro-rough channel | El objetivo principal de este estudio fue medir la velocidad media de flujos en canales macro rugosos mediante el uso de una cámara de video y algunos análisis de la señal RGB de los videos para determinar el movimiento de una cantidad fija de permanganato de potasio. | Los ríos de alta montaña tienen características hidráulicas y morfodinámicas que dificultan la medición de velocidades. No es recomendable el uso de métodos intrusivos de medición debido al transporte de sedimento, la variabilidad espacial de parámetros hidráulicos y la morfología altamente activa en estos contextos. Se recomienda el uso de trazadores. Se aplico una metodología de grabación de videos de un tramo de canal con el uso de trazadores visuales | Luego de la validación confirmada del método utilizado, y la aplicación del método en casos donde solo se pudo comparar el método con trazadores de salinidad. Se pudo concluir que el análisis de videos de trazadores químicos es válido para la determinación de velocidades medias de flujo. |

| Autor(es) | Año y Lugar | Título | Objetivo | Resumen | Resultado |
|-------------------------------------|--|---|--|--|---|
| J. Leandro, D. B. Bung, R. Carvalho | 2014, Institute of Hydrology, Water Management and Environmental Techniques, Ruhr-University Bochum, Germany | Measuring void fraction and velocity fields of a stepped spillway for skimming flow using non-intrusive methods | Medir características hidráulicas (contenido de aire y velocidades) de un flujo en una rápida escalonada mediante una metodología de visualización del flujo y un análisis de la información registrada. | Las rápidas escalonadas son estructuras de disipación de energía de flujo donde se produce el efecto de auto aireación del agua, lo que causa una expansión del calado. Cuando se tienen flujos tipo skimming con grandes caudales, estos son considerados bidimensionales, lo que favorece la aplicación de una metodología de visualización de flujo. Se postula que se pueden correlacionar las características hidráulicas del flujo cerca de la pared del modelo con sus características en el centro del flujo. Se aplicará una metodología de análisis para obtener valores de concentración de aire y campos de velocidad mediante un análisis de reconocimiento de burbujas. Dicha metodología será comparada con resultados obtenidos por instrumentos intrusivos. | Los resultados de ambos métodos presentan coherencia. Los valores de campo de velocidad subestiman los valores de la sonda consistentemente, lo que debe ser dado por los efectos de pared y la posible sobreestimación de la velocidad por la sonda. |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

| Autor(es) | Año y Lugar | Título | Objetivo | Resumen | Resultado |
|--|---|--|---|--|--|
| <p>Jesús Roca Martínez, Juan T. García Bermejo, Antonio Viguera, Rodríguez, Luis G. Castillo Elsidié</p> | <p>2015, Universidad Politécnica de Cartagena, España</p> | <p>Cálculo experimental de la difusividad turbulenta a partir de imágenes obtenidas con cámara de alta velocidad</p> | <p>Determinar la difusividad turbulenta y el campo de velocidades del agua en un flujo bifásico en un modelo de una tubería que permite la alimentación de ambos fluidos.</p> | <p>El análisis de imágenes tomadas con cámara de alta velocidad en flujos con partículas trazadoras es una herramienta muy útil para la medición de características hidráulicas en modelos. Se utilizará un modelo de tubería donde se puede imponer un flujo bifásico controlado.</p> | <p>Con la aplicación de técnicas de tratamiento de los datos obtenidos por la cámara de alta velocidad (correlación cruzada resuelta con la transformada de Fourier y la deformación de la ventana de imagen) se tiene una herramienta muy útil para el análisis de características hidráulicas en un flujo. Se ha podido calcular la difusividad turbulenta del agua, la cual ayudara a calcular la difusión del oxígeno en la fase agua.</p> |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

| Autor(es) | Año y Lugar | Título | Objetivo | Resumen | Resultado |
|---|-----------------------------|---|--|--|---|
| James Yang, Chang Lin, Ming-Jer Kao, Penghua Teng, Rajkumar V. Raikar | 2018, Basel, Switzerland | Application of SIM, HSPIV, BTM, and BIV Techniques for Evaluations of a Two-Phase Air–Water Chute Aerator Flow | Investigar a respecto de las posiciones características de 3 interfaces agua-aire, interpretar el desarrollo de burbujas de aire a partir de la punta de la cavidad de aire, identificar los medios probabilísticos para posiciones características cerca de la superficie libre, obtener la distribución probabilística de la aparición de burbujas de aire en el flujo, obtener distribuciones de velocidad en el flujo, obtener campos de velocidad instantáneos y promediados del movimiento de las burbujas, construir un campo de velocidad bifásico de velocidades promedio de flujo de agua y burbujas de aire, y correlacionar la relación entre la probabilidad de distribución de burbujas, perfiles de velocidades medias del flujo y de aire. | 4 diferentes técnicas de análisis de visualización de flujos (imágenes de gráficas de sombra, velocimetría de partículas de alta velocidad, método de seguimiento de burbujas y velocimetría de imágenes de burbujas) fueron aplicadas en un modelo de un aireador de flujo inclinado a 17°. La combinación de las técnicas de análisis aplicadas debe brindar un conocimiento más completo del funcionamiento de un flujo bifásico en dichas condiciones. | Las metodologías aplicadas en el modelo trajeron diferentes informaciones respecto al comportamiento hidráulico de los flujos ensayados. Se pudieron obtener valores de velocidades del flujo, velocidades y probabilidad de apareamiento de burbujas. Se tiene que la combinación de los métodos de análisis puede ser aplicada efectivamente en diversos flujos bifásicos e interfaces agua-aire. |

Capítulo III

3. Metodología de Medición / Análisis de Velocimetría

3.1 Cámara de Alta Velocidad Photron

3.1.1 Descripción Técnica del Equipo

La cámara de alta velocidad Fastcam Mini Ux100, fabricada por la marca japonesa Photron es un equipo con un gran potencial de utilidad para un contexto de laboratorio de análisis de fluidos, ciencias biológicas, mecánica balística, entre otros (Photron, 2013). La cámara de alta velocidad permite a su usuario la visión detallada y comprensible de fenómenos físicos que se desarrollan a velocidades demasiado altas para la observación de información relevante por el ojo humano.

La FASTCAM Mini UX100 utiliza un sistema original de captación de luz de tipo CMOS (del nombre en inglés “Complementary Metal-Oxide Semiconductor”) donde el sensor de luz está compuesto de una serie de píxeles cuya función es transformar la cantidad de fotones ingresada por la lente de la cámara en señales eléctricas que deben ser amplificadas y organizadas para tener la fotografía resultante (o la secuencia de fotografías para formar un video) (Photron, 2013). Igualmente cuenta con un obturador electrónico de alta velocidad para poder activar y desactivar el sensor de manera que se capture correctamente la cantidad de luz necesaria para un video visible (Photron, 2013). La visibilidad del video capturado depende de algunos factores internos como el “framerate” (cuantas imágenes serán capturadas por segundo) “shutter” (apertura de obturador), exposición (sensibilidad a la luz); e igualmente de factores externos como el tipo y cantidad de iluminación utilizada para resaltar el fenómeno observado.

Los componentes originales del equipo son los siguientes:

Tabla 3.1 Componentes Originales de la Cámara Photron Fastcam Mini Ux100

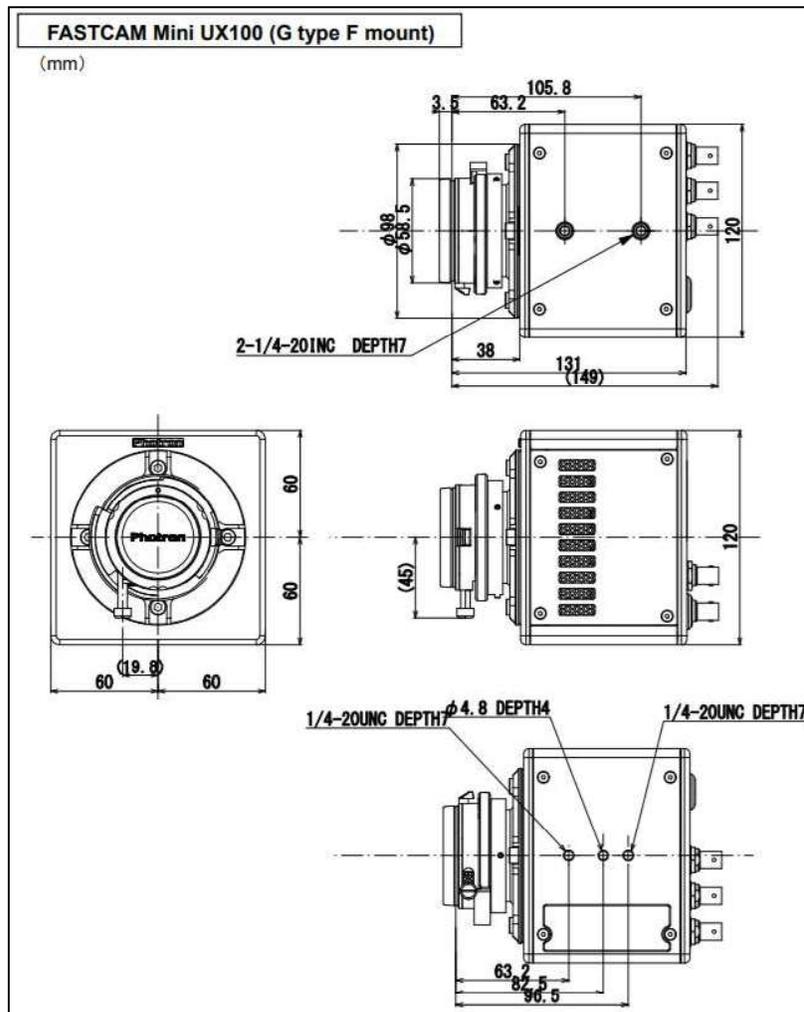
| | | |
|--|--|--|
| <p>Cuerpo de la cámara (sin lente)</p>  | <p>Fuente de poder AC</p>  | <p>Cable AC</p>  |
| <p>Montura en C</p>  | <p>Cable de extensión DC de 2m</p>  | <p>Cable LAN (Ethernet)</p>  |
| <p>Llaves inglesas hexagonales para el cambio de monturas (1.5 mm, 4mm)</p> | <p>Tapa de conexión para lentes</p> | <p>CD de instalación de programa de grabación PFV</p> |

Nota. Imágenes recuperadas en Photron. (2013). FASTCAM Mini UX100 Hardware Manual. Tokyo, Japan.

El cuerpo de la cámara tiene un tamaño relativamente compacto (por eso el nombre “mini” del modelo): 120 mm (4.7 pulgadas) de alto × 120 mm (4.7 pulgadas) de ancho × 90 mm (3.6 pulgadas) de profundidad (Photron, 2013). En conjunto con su peso liviano de 1.5 kg (3.4 lbs), el equipo puede ser transportado manualmente con facilidad. El cuerpo tiene entradas para los pernos que deben ser puestos para fijar el equipo a una estructura de soporte como un trípode o brazo mecánico. Los pernos necesarios son de especificación 1/4 pulgadas-20UNC profundidad 7

pulgadas y existen 2 entradas distintas en ambas caras superior e inferior del cuerpo de la cámara (Photron, 2013). Es importante asegurarse que los pernos de tamaño correcto sean utilizados en las posiciones precisas de las entradas, para garantizar la estabilidad e integridad del equipo.

Figura 3.1 Dimensiones y Ubicación de Pernos para Cámara Photron Fastcam Mini Ux100



Nota. Recuperado de Photron. (2013). FASTCAM Mini UX100 Hardware Manual. Tokyo, Japan.

El trípode que fue utilizado para soportar la cámara de alta velocidad en las pruebas de esta investigación es de madera. El perno original en esta estructura de soporte

es de 5/8" de diámetro y 11 mm de largo. Por ello se tuvo que fabricar una pieza de aluminio para que esta se fije a la vez al trípode y a la cámara de alta velocidad. Un diagrama detallado y acotado de la pieza fabricada se encuentra en el Anexo 6.1.

Figura 3.2 *Pieza Adaptadora de Pernos entre Trípode y Cámara de Alta Velocidad Photron*



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

El cuerpo de la cámara dispone de una serie de conexiones de entrada y salida electrónicas. Mediante las conexiones tipo "I/O" se puede conectar la cámara de alta velocidad a otros equipos de grabación y/o equipos de disparo de señales para enviar comandos y sincronizar equipos que deben funcionar simultáneamente. Mediante la entrada/salida electrónica de tipo "ethernet", la cámara se puede conectar a una computadora, la cual es necesaria para la grabación de videos, ajuste de parámetros de grabación y visualización de los videos grabados (Photron, 2013). Otra entrada importante es la que alimenta la cámara de alta velocidad con su requerimiento de corriente y potencia: 100V-240V AC 40W de entrada al cable, 22-32 V DC, 40VA de salida a la cámara (Photron, 2013). Es imperativo utilizar únicamente el cable original de alimentación eléctrica del equipo para evitar daños a sus componentes internos. Con el calentamiento consecuente del uso de la

cámara de alta velocidad, se acciona un sistema de ventilación interna cuya velocidad de giro aumenta según el incremento de la temperatura interna del equipo. Mismo disponiendo de un sistema de control de temperatura interno, se debe utilizar la cámara de alta velocidad en un rango de temperatura y humedad aceptable: 0° – 40° C (32° – 104° F) de temperatura y 85% o menos de humedad (Photron, 2013).

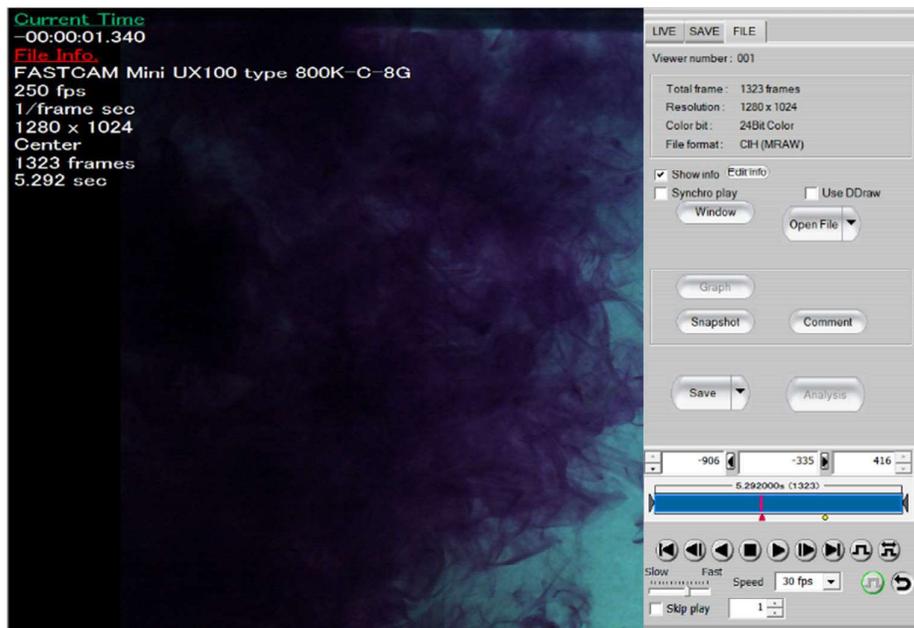
Un componente esencial de la cámara es el sensor de luz confinado en la propia cámara oscura del equipo. El sensor es el dispositivo que lee los fotones que ingresan a la cámara por la lente y los convierten en señales eléctricas organizadas para que estas puedan representar imágenes en una señal RGB (según el inglés “Red Blue Green”). Este sensor es de tipo global, es decir, en el momento de capturar una imagen todos los puntos de captura de luz registran valores de luminosidad simultáneamente, lo que ayuda a evitar imágenes distorsionadas de fenómenos de alta velocidad (Photron, 2013). El sensor captura una secuencia de imágenes (que juntas forman un video) mediante el uso de un “shutter” digital electrónico que controla los intervalos de tiempo en los cuales el sensor esta activado o desactivado.

Luego de la grabación de un video, este puede ser registrado en la memoria interna de la computadora mediante el programa PFV en una variedad de formatos: AVI, MRAW y MOV (Photron, 2013). Para el registro de imágenes individuales, se pueden utilizar los siguientes formatos de archivo: JPEG, TIFF, BMP, RAW, PNG and FTIF (Photron, 2013).

3.1.2 Programa PFV

El programa PFV (del inglés “Photron Fastcam Viewer”) es una herramienta de software esencial y necesaria para el uso de cualquier cámara de alta velocidad de la línea Fastcam. Este programa es la interfaz entre la cámara de alta velocidad y la computadora que permite a la vez la visualización del campo de observación de dicho equipo, el envío de comandos de grabación y de exposición a la luz a la cámara, y el registro de los datos obtenidos para su análisis posterior (Photron, 2013). Adicionalmente, cuando la cámara esta desconectada de la computadora, el programa permite visualizar los videos grabados por ella que estén registrados en la memoria de la computadora (Photron, 2013).

Figura 3.3 Pantalla de Visualización de Archivo Guardado en Programa PFV



Nota. Captura de pantalla recuperada de Photron Fastcam Viewer por Terra, B. Quito, 2019.

Cuando se requiere realizar la grabación de videos utilizando la cámara de alta velocidad, el PFV es esencial para ajustar parámetros de entrada de luz a la cámara

y enviar el comando de grabación para que las imágenes resultantes sean nítidas y útiles para su análisis posterior. Se puede ajustar el “framerate”, tiempo de exposición (“shutter speed”), resolución de imagen, modo de disparo, entre otros parámetros que deben ser ajustados para según las características específicas de cada realización de prueba (Photron, 2013).

El programa PFV también dispone de algunas herramientas de modificación momentánea de las imágenes registradas para realzar ciertos detalles o permitir un análisis cualitativo de estas. Se pueden ampliar y girar las imágenes grabadas, modificar capas de colores individuales, ajustar niveles de contraste, brillo, gamma y saturación (Photron, 2013). También se permite obtener representaciones gráficas de los patrones de colores presentes en las imágenes (histogramas y perfiles de línea), imponer referencias de dimensiones longitudinales, obtener distancias, ángulos y coordenadas entre puntos designados por el usuario (Photron, 2013).

En la sección 3.4 se detallarán las funcionalidades pertinentes para la metodología de medición de velocidad de flujo propuesta de manera más profunda.

3.2 Programa Matlab

El paquete de software Matlab, desarrollado por la empresa norteamericana Mathworks, es literalmente un laboratorio virtual de análisis matricial. Desde su primer lanzamiento en la década de los 70's, Matlab ha sido una herramienta esencial de computación numérica como apoyo en diversos campos de la ciencia e ingeniería (Nagar, 2017). Hoy es utilizada por más de 5000 instituciones

universitarias por todo el mundo y su lenguaje de programación nativo es considerado “el lenguaje de la ingeniería” (Nagar, 2017).

El campo de uso del programa Matlab es muy amplio, siendo útil para cálculos simples y complejos a la vez. Uno de los beneficios más intrínsecos del uso de esta, o cualquier herramienta de computación numérica es la facilidad con la cual se pueden realizar grandes series de cálculos repetitivos de manera eficiente. Sin embargo, el principio de “entra basura, sale basura” (Nagar, 2017) se aplica aquí como en cualquier otro ambiente de programación; es decir, el hecho de que el programa obtenga un resultado, no quiere decir que dicho resultado sea correcto o representativo si la programación fabricada para obtenerlo es errónea. Es por esto que el usuario debe tener una visión crítica y minuciosa con lo que escribe en su rutina.

El lenguaje de programación propio del Matlab es universalmente utilizado en investigaciones técnicas y se dispone de una vasta cantidad de funciones de programación. Para cada una de ellas existe un documento de ayuda accesible mediante el propio programa para explicar dichas funcionalidades, además de una comunidad activa en fórums en línea donde usuarios de todo el mundo aclaran dudas respecto a las capacidades del lenguaje y programa Matlab (Nagar, 2017). Entre ellas existen funciones aritméticas básicas, trigonométricas, algebraicas, matriciales, operaciones de lógica booleana, entre otras. La capacidad de realización de operaciones repetitivas se ejemplifica claramente en la categoría de funciones llamadas “loops” (en inglés) o “bucles” (en español) (Nagar, 2017). Estas funciones consisten en una o varias operaciones que deben ser realizadas

repetitivamente según un condicionante impuesto por el usuario según sus necesidades.

Cada línea de comando ingresada al programa Matlab es interpretada internamente según un ciclo de etapas llamado REPL (según los nombres de las etapas en inglés: “Read, Evaluate, Print and Loop”) (Nagar, 2017):

- El programa primero lee (“Read” en inglés) el comando ingresado iniciando el proceso de operación.
- Luego evalúa (“Evaluate” en inglés) e interpreta el contenido del comando para realizar las operaciones de cálculo correspondientes al comando.
- En seguida el programa imprime o presenta (“Print” en inglés) el resultado de las operaciones realizadas.
- Finalmente, el programa regresa (“Loop” en inglés) al inicio del proceso REPL para poder leer las siguientes líneas de comando que sean ingresadas al programa.

El interfaz del programa Matlab permite que su lenguaje de programación sea utilizado de dos maneras diferentes, sea ingresando comandos individuales o con la creación de una rutina. Si se ingresan comandos uno por uno en el campo llamado ventana de comandos, estos serán leídos e interpretados por el proceso REPL el momento que sean escritos e ingresados (Nagar, 2017). Una rutina es una serie de comandos compilados en un archivo de texto tipo “.m” que, al presionar el

botón “run” en el programa Matlab, serán ejecutados secuencialmente (Nagar, 2017).

El programa Matlab permite el registro de variables en la memoria interna de la computadora cuando se ejecutan comandos de programación para que estas puedan ser referenciadas en cálculos y modificadas según las necesidades del usuario. Dichas variables pueden ser nombradas utilizando letras, números y “guiones bajos” según la preferencia del usuario, considerando que las letras mayúsculas se diferencian de letras minúsculas, y que los términos utilizados por el lenguaje de programación Matlab (funciones, condicionantes, números matemáticos constantes, y otros “keywords”) no pueden ser utilizados como nombres de variables (Nagar, 2017). Los valores guardados en las variables pueden ser de distintos tipos, los cuales pueden o no interactuar entre sí en cálculos comandados por el usuario (Nagar, 2017):

- Lógicos: estas variables pueden contener valores de 1 o 0 siendo representantes de una condición “verdadera” o “falsa” en operaciones de lógica Booleana.
- Caracteres: este tipo de dato guarda letras alfabéticas y secuencias de ellas llamadas “strings”
- Valores enteros con restricciones binarias: este tipo de variable puede retener un valor positivo o negativo según un limitante binario: 8 bits, 16 bits, 32 bits o 64 bits (lo que corresponde a 256, 65536, 4294967296 y 1.8446744e+19 respectivamente).

- Valores enteros absolutos con restricciones binarias: estas variables son iguales que la categoría anteriormente mencionada pero solo se pueden guardar valores positivos.
- Números simples: estas variables contienen números que pueden ser positivos, negativos y contener decimales con diferentes sistemas de precisión.
- Números complejos: estas variables guardan los mismos valores que la categoría anterior pero también pueden registrar valores de tipo imaginario.
- Vectores y Matrices: cada variable tiene la capacidad de almacenar y organizar una serie de valores del mismo tipo sea en vectores unidimensionales, o matrices bidimensionales y tridimensionales. En estos casos cada valor tiene su coordenada correspondiente en su grupo, lo que es útil para que valores individuales o grupos de ellos sean referenciados en comandos de cálculo.

3.3 Manejo Estadístico de Información

En el ámbito del manejo informático de datos numéricos para registro y análisis, la consideración de algunas peculiaridades y la aplicación de ciertos procesamientos de datos son necesarios para la interpretación y entendimiento integral de los datos obtenidos. Mediante el uso de principios y técnicas estadísticas, se pueden organizar y modificar series de datos para resaltar estructuras y tendencias internas, extraer variables importantes y relevantes para el análisis de la serie,

detectar y eliminar valores anormales no representativos, y conceptualizar el desarrollo de modelos (NIST/SEMATECH, 2012).

Cuando se trabaja con grandes cantidades de datos numéricos resultantes de observaciones experimentales (como es el caso de esta investigación donde se manejan matrices tridimensionales conteniendo cientos de millones de valores individuales), aumenta la probabilidad de presenciarse mayores cantidades de valores considerados divergentes a la tendencia representativa de la serie. Dichos valores discrepantes pueden surgir a partir de peculiaridades imprevisibles de un dado fenómeno observado o por limitaciones del método de medición en sí. Por lo tanto, es importante la aplicación de operaciones de filtrado o suavizado de datos para que los valores que aparentemente no corresponden a las tendencias presentes a sus alrededores sean identificados como no-representativos y sean sustituidos por una estimativa probable de un valor representativo en su lugar (NIST/SEMATECH, 2012). El propio programa Matlab tiene una serie de funciones específicas para el tratamiento estadístico y suavizado de series de datos.

3.4 Instalaciones Donde se Realizan las Pruebas

Todas las actividades experimentales para esta investigación fueron realizadas en canales hidrodinámicos, es decir, canales rectos de sección rectangular constante y de pendiente variable.

El primero pertenece al laboratorio de modelación física del CIERHI (Centro de Investigaciones y Estudios en Recursos Hídricos) en el campus Jose Rubén Orellana de la EPN (Escuela Politécnica Nacional) en Quito, Ecuador. El canal tiene 25 m de largo, 1 m de ancho y 0.8 m de altura. Su pendiente varía entre 0% y 4%,

la cual puede ser ajustada manualmente y remotamente. Con la ayuda del mismo sistema computadorizado se puede ajustar el posicionamiento de un vertedero rectangular plano en el punto de descarga del canal. El canal se compone de una serie de módulos de 4 m de longitud (menos el último que contiene el vertedero de descarga) conectados por membranas semi flexibles para permitir el cambio de pendiente. Los materiales que entran en contacto con el agua que fluye por el canal en operación son laminas SS-304 de 4mm de espesor en el fondo y láminas de vidrio templado de 10 mm de espesor en las paredes laterales. El tanque que alimenta este canal tiene 1.3 m de ancho, 1 m de largo y 1.3 m de alto. El agua utilizada en todas las instalaciones del CIERHI conforma un sistema cerrado propio donde se dispone de un conjunto de 4 bombas idénticas de marca “Ingersoll Dresser Pumps” en paralelo, las cuales proporcionan una carga máxima de 13 m y caudales de hasta 200 l/s cada una. El tanque de carga del canal tiene como salida un vertedero triangular de pared delgada. De acuerdo a la literatura técnica (Marbello, 2005), el caudal que pasa por este tipo de vertedero puede ser medido a partir de la geometría del vertedero y la porción del calado medida entre el punto inferior del vertedero y la superficie libre del flujo del tanque antes de que este se reduzca por la caída del flujo por el mismo. De acuerdo a esta relación y la instalación de un tubo de carga graduado en centímetros que permite medir la porción del calado requerida, se facilita la medición de caudales del canal. La relación entre el caudal del canal y la carga medida en el tubo se encuentra sintetizada en la siguiente ecuación:

$$Q = 1328.8 * \Delta h^{2.4768} \quad (3.1)$$

Donde Q es el caudal volumétrico del flujo que pasa por el canal en l/s y Δh es la altura de carga leída en el tubo del tanque del canal en m.

Figura 3.4 Canal Hidrodinámico de Pendiente Variable del CIERHI-EPN



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

Figura 3.5 Tubo Piezométrico para Medición de Carga Hidrostática del Tanque de Carga del Canal Hidrodinámico del CIERHI-EPN



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

El segundo canal utilizado en la investigación al laboratorio docente de hidráulica del departamento de ingeniería civil y ambiental de la escuela politécnica nacional. El canal tiene 16 m de largo, 0.4 m de ancho, y 0.5 m de altura. Su pendiente varía

entre 0% y 1.8%, la cual puede ser ajustada manualmente mediante un sistema de poleas y cadenas. Los materiales que entran en contacto con el flujo en el canal son paredes de vidrio y un fondo metálico liso. El tanque de carga que alimenta a este canal tiene 0.56 m de ancho, 1.30 m de largo y 1.27 m de altura. El agua utilizada en el laboratorio de docencia también hace parte de un sistema cerrado propio que hace uso de una bomba de marca Godwin Ltd. Tipo C6. El tubo que conduce el agua desde la bomba hasta la entrada del canal tiene un sistema de medición de caudal mediante la diferencia de presiones de una placa-orificio interna (o diafragma). El sistema consiste en dos tubos piezométricos que miden la presión del flujo antes y después de que este pasa por la placa-orificio. Ya que la presencia de los orificios fuerza el flujo a momentáneamente aumentar su velocidad y reducir su presión, se tiene que la diferencia de presiones en ambos lados del diafragma es proporcional a al cambio de velocidad presente, el cual es en sí proporcional al caudal que fluye por la tubería (Martín, R. Salcedo, 2011). Mediante la medición de la diferencia de alturas piezométricas de estos dos puntos, se puede obtener el valor del caudal que pasa por el canal utilizando la siguiente ecuación:

$$Q = 0.0514 * \Delta h^{0.5044} \quad (3.2)$$

Donde Q es el caudal volumétrico del flujo que pasa por el canal (m^3/s) y Δh es la diferencia de alturas piezométricas leídas en los tubos conectados a la placa de orificio (m).

Figura 3.6 Canal Hidrodinámico de Pendiente Variable del LDH-FICA



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

Figura 3.7 Diafragma y Tubos Piezométricos para Medición de Caudal en Canal Hidrodinámico del LDH-FICA



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

3.5 Método Práctico para Grabación

Para realizar el ensayo de velocimetría de tal manera que se registren imágenes nítidas y relevantes para el análisis matricial posterior, se toman en cuenta ciertas consideraciones respecto al uso de los equipos.

3.5.1 Precauciones de Uso General.

La cámara de alta velocidad Photron Fastcam Mini Ux100 es un equipo relativamente pequeño y delicado, por lo cual se requieren algunas consideraciones especiales para su uso. Su tamaño compacto y peso liviano permiten su fácil manipulación, pero se debe tener cuidado para preservar la integridad del equipo. El impacto de una caída de este equipo puede ser catastrófico para su funcionamiento, por eso es muy importante manejarlo cuidadosamente y tener una estructura de soporte (trípode o equivalente) adecuada. Los pernos de fijación del soporte deben ser correspondientes a las especificaciones de la cámara.

Figura 3.8 Cámara de Alta Velocidad Photron Fastcam Mini Ux100



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

Para asegurar el funcionamiento óptimo del equipo, se debe evitar su contacto con ciertos elementos y condiciones. De manera similar a lo mencionado sobre caídas

e impactos, no se deben ejercer fuerzas excesivas sobre el equipo (Photron, 2013). Durante el uso regular de la cámara de alta velocidad, esta tiene que ventilarse para evitar el sobrecalentamiento de sus componentes internos. Para este propósito, el cuerpo de la cámara tiene ranuras que permiten el ingreso y salida de aire del mismo. Por la presencia de dichas aperturas, es importante evitar que entren otros materiales por ellos como polvo, gases inflamables, agua y otros líquidos ya que la intrusión de estas partículas puede dañar el equipo (Photron, 2013). No se debe permitir cualquier contacto de dichos materiales intrusivos con el equipo. Adicionalmente, como con cualquier otro equipo electrónico, no se debe exponer a sobrecargas eléctricas o utilizar métodos alternativos para cumplir con su requerimiento de alimentación eléctrica. Se debe usar el cable propio del equipo y preferiblemente conectarlo a un enchufe que permita su conexión a la tierra. Finalmente, no se recomienda desarmar y/o modificar el equipo en sí (Photron, 2013).

3.5.2 Recomendaciones para el Programa PFV

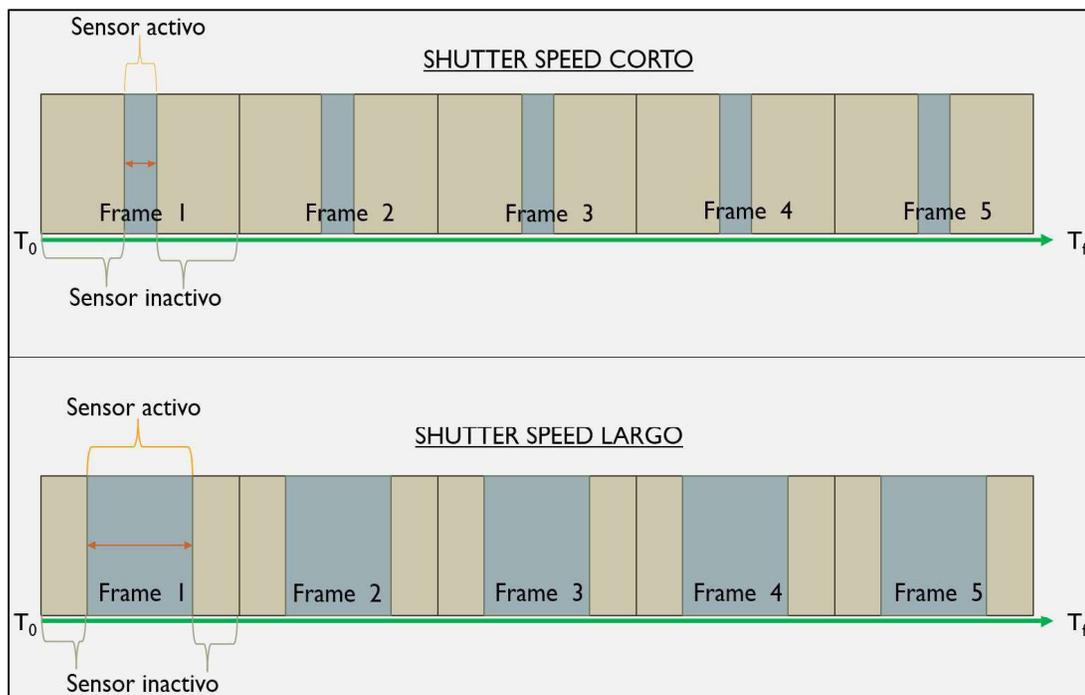
Dentro del ambiente de trabajo del programa PFV, se tiene acceso a diversas variables que afectarán la manera en la cual la cámara permitirá el ingreso de luz a su interior para que esta información sea leída y registrada por el equipo.

“Framerate”: (50 FPS – 800,000 FPS): El “framerate” es la frecuencia con la cual la cámara captura imágenes a lo largo del tiempo. Con el aumento del “framerate” se puede registrar una mayor cantidad de “frames” (o imágenes) por segundo, lo que permite la observación de fenómenos de movimiento de manera más detallada en la escala del tiempo (Aberle et al., 2017). Cuando se tiene un “framerate” alto se

reduce el tiempo en el cual se permite la entrada de luz a la cámara para la captura de cada imagen, por lo tanto, las imágenes grabadas resultan más oscuras.

“Shutter speed” ($1/\text{frame} \cdot \text{sec} = 1/2700000 \text{ sec}$): El “shutter” electrónico de la cámara utilizada es de tipo total, lo que significa que todos los puntos del sensor se activan de manera simultánea para el registro de una imagen. El parámetro de “shutter speed” (o tiempo de exposición del sensor) define la duración de la activación del sensor de la cámara durante cada captura de imagen individual (Photron, 2013). Para la grabación de fenómenos de alta velocidad sin que las imágenes se queden borrosas es preferible reducir el tiempo de captura. Con tiempos de apertura más largos, se tienen imágenes más claras porque el sensor tiene más tiempo para permitir el ingreso de la luz a la cámara.

Figura 3.9 Gráfica Explicativa del Parámetro “Shutter Speed”



Nota. Elaborado por Terra, B, Quito, 2019.

Resolución (1280 x 1024 – 640 x 8): La resolución define las dimensiones de la imagen grabada en píxeles. Al utilizar resoluciones más altas se tienen imágenes más detalladas. Con el aumento del “framerate” se reducen las opciones de resolución máxima de las imágenes grabadas, debido a la capacidad de la cámara de retener los datos grabados internamente (Photron, 2013).

Tabla 3.2 *Resoluciones Máximas Correspondientes a “Framerates” de Grabación*

| Framerate [fps] | Resolución Máxima | |
|-----------------|-------------------|----------------|
| | Horizontal [píx] | Vertical [píx] |
| 1000 | 1280 | 1024 |
| 2000 | 1280 | 1024 |
| 4000 | 1280 | 1024 |
| 5000 | 1280 | 1000 |
| 6250 | 1280 | 800 |
| 6400 | 1280 | 720 |
| 8000 | 1280 | 616 |
| 10000 | 896 | 488 |
| 16000 | 1280 | 312 |
| 20000 | 1280 | 248 |
| 40000 | 1280 | 120 |
| 80000 | 1280 | 56 |
| 100000 | 1280 | 32 |
| 200000 | 1280 | 24 |
| 800000 | 640 | 8 |

Nota. Recuperado de Photron. (2013). FASTCAM Mini UX100 Hardware Manual. Tokyo, Japan.

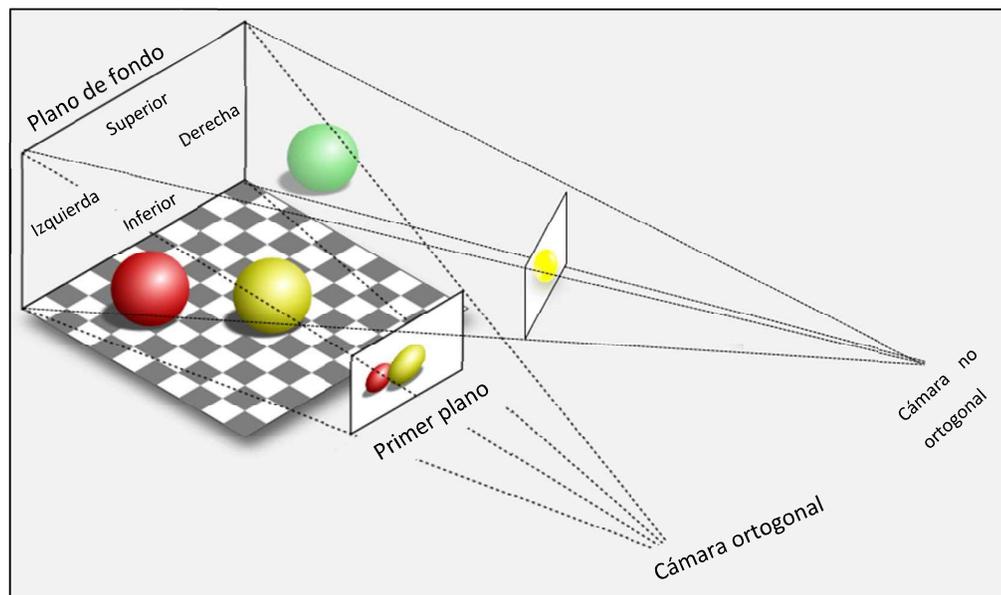
3.5.3 *Recomendaciones de Uso de la Cámara de Alta Velocidad*

Distancia entre canal y cámara: La proximidad entre el canal y la cámara favorece la observación de fenómenos a escala “micro”. Sin embargo, el posicionamiento de

la cámara debe ser hecho de manera precisa según el cuadro que quiere ser grabado ya que la lente de la cámara utilizada no tiene ajuste de “zoom” (ampliación de imagen ajustable mediante posicionamiento relativo de lentes internas). Se debe ajustar la posición de la cámara de manera que los bordes de la imagen grabada coincidan con el cuadro de imagen del fenómeno que se quiere observar para tener el máximo nivel de detalle de imagen.

Inclinación de la cámara respecto a superficie de canal: El plano del cuadro de imagen delimitado por la cámara debe ser siempre paralelo al plano de la pared transparente del modelo observado. Si existe un ángulo entre dichos planos, la imagen grabada resultará distorsionada en términos de las dimensiones espaciales de lo observado por la cámara.

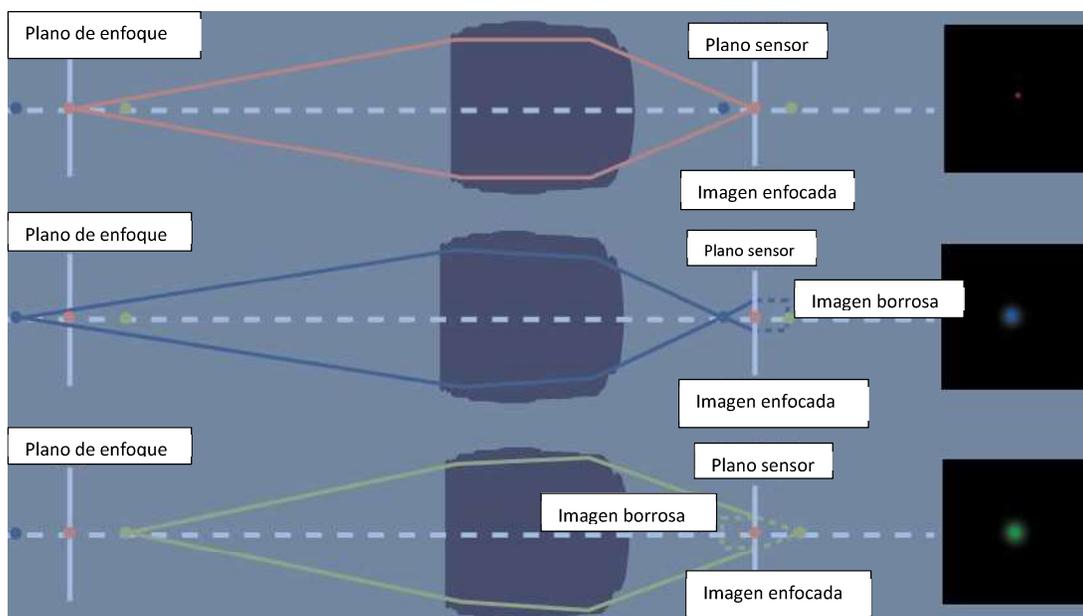
Figura 3.10 Gráfica Demostrativa del Posicionamiento Ortogonal de una Cámara Respecto a un Fenómeno Observado



Nota. Recuperado de Rougier, N. (2016). Rendering a cube — glumpy v1.x documentation. Recuperado 19 de noviembre 2019, de la pagina web: <https://glumpy.readthedocs.io/en/latest/tutorial/cube-ugly.html#projection-matrix>. Editado por Terra, B. Quito, 2019.

Enfoque de lente (0.45 m - ∞ m): El ajuste de enfoque de la lente controla la distancia entre la lente de enfoque y el sensor digital de la cámara. Cuando se tiene una distancia entre lente y sensor que hace con que los rayos de luz que ingresan a la cámara converjan en el sensor, las imágenes resultan enfocadas. Ya que en las pruebas la solución acuosa de permanganato de potasio será inyectado al flujo en el centro de la sección transversal del canal, la cámara debe enfocarse a esta zona para poder registrar el fenómeno del movimiento del trazador de manera nítida. Con este ajuste manual en la lente, se puede escoger el nivel de “profundidad” de imagen que se desea enfocar y los demás niveles se verán borrosos conforme el campo de profundidad.

Figura 3.11 Esquema Explicativo de Interacción entre una Lente de Enfoque y Sensor de una Cámara

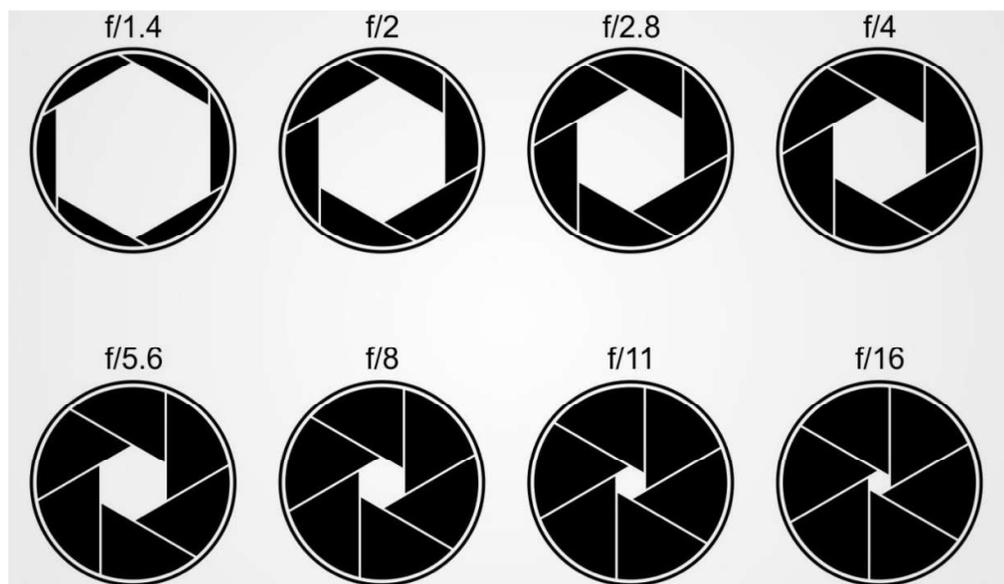


Nota. Recuperado de Vorenkamp, T. (2015). Depth of Field in Photography Defined: the Basics | B&H Explora. Recuperado 21 de noviembre, 2019, de la página web <https://www.bhphotovideo.com/explora/photography/tips-and-solutions/depth-field-part-1>.

Apertura de sensor (abierto “A” – “Q” cerrado): El ajuste mecánico de apertura del sensor de la cámara determina cual es el diámetro de apertura del diafragma en el

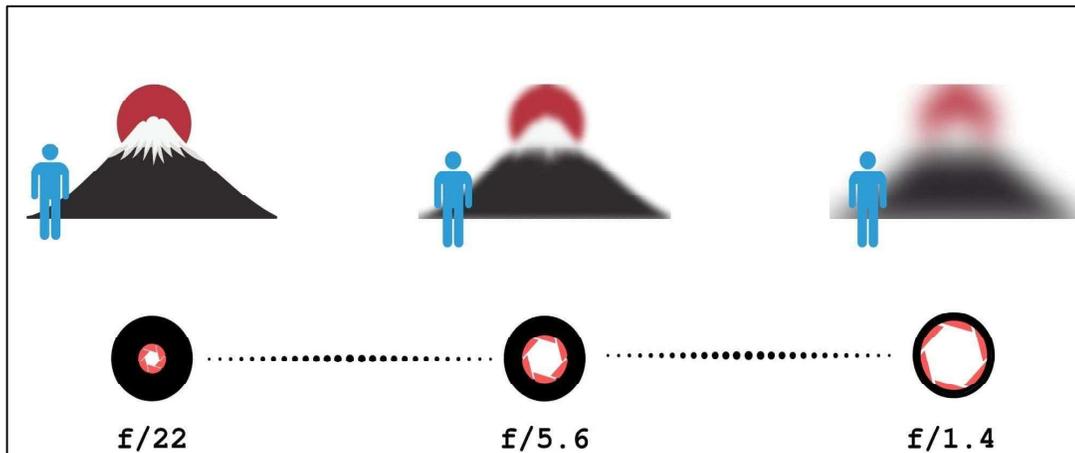
momento de la captura de cada imagen individual. Con un diafragma más abierto, el sensor puede captar una cantidad mayor de luz, y por lo tanto se grabarán imágenes más claras (y viceversa). Este parámetro también afecta la profundidad de campo del enfoque de la lente. Con una apertura mayor, se tiene un campo de profundidad estrecho (el enfoque es más restringido). Mientras que, con una apertura menor, el campo de profundidad es más amplio (más elementos a distintas distancias de la cámara se verán nítidamente enfocados) (Norah, 2019).

Figura 3.12 Ejemplos de Diámetros de Apertura de Lentes Fotográficas



Nota. Recuperado de Perea, M. (2017). What is Aperture? Setting your DSLR to Aperture Priority - My Nomadic Lens. Recuperado 21 de noviembre, 2019, de la pagina web <http://mynomadiclens.com/index.php/2017/08/05/what-is-aperture/>.

Figura 3.13 Esquema Explicativo de la Relación entre Diámetro de Apertura y Campo de Profundidad



Nota. Recuperado de Norah, L. (2019). A Guide to the Exposure Triangle in Photography - Finding the Universe. Recuperado 21 de noviembre, 2019, de la pagina web <https://www.findingtheuniverse.com/exposure-triangle-photography/>.

Uso de la capucha de lente: La capucha de lentes es un dispositivo que cuando se encuentra acoplado a una lente fotográfica impide el ingreso de rayos de luz cuyas fuentes se encuentran fuera del cuadro de imagen. La captura de imágenes con fuentes adicionales e innecesarias de luz puede resultar en la sobresaturación o distorsión de la imagen.

Figura 3.14 Diagrama Explicativo de Funcionamiento de una Capucha de Lente



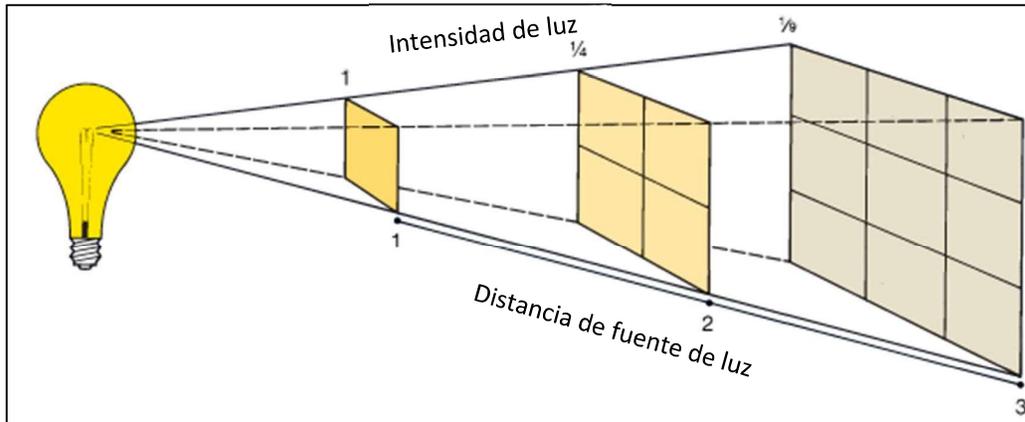
Nota. Recuperado de Discover Digital. (2015). Why use a lens hood? | Discover Digital Photography. Recuperado 21 de noviembre, 2019. <https://www.discoverdigitalphotography.com/2015/why-use-a-lens-hood/>.

3.5.4 Recomendaciones de Iluminación

Distancia entre iluminación y fenómeno observado: Con una fuente de luz cercana al fenómeno observado, la intensidad de las imágenes grabadas por la cámara aumentará, lo que favorece la observación de los fenómenos observados. Sin embargo, si la luz está demasiado cerca, se pueden presentar efectos de sobresaturación de la imagen donde los puntos más iluminados llegarían a su valor máximo de intensidad (blanco puro), lo que hace con que esos puntos no sean representativos del fenómeno observado. Tener el efecto contrario por posicionar

una luz muy lejana igualmente es perjudicial para el análisis. Cuando la luz cambia de medio (del aire al agua), sus propiedades de difusión y refracción cambian.

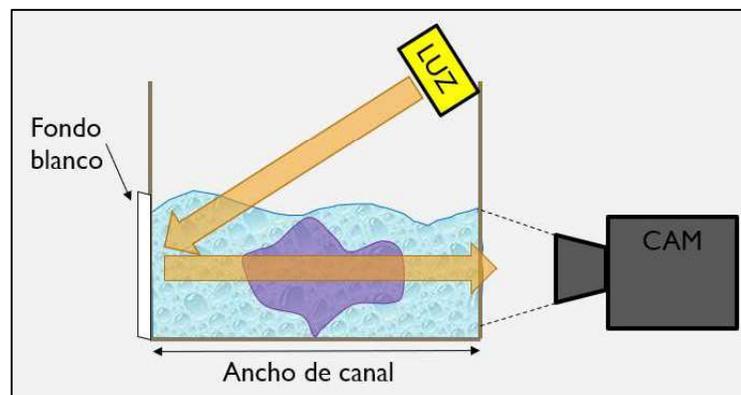
Figura 3.15 *Diafragma Explicativo del Efecto de Dispersión de Luz*



Nota. Encyclopaedia Britannica, 2011.

Orientación de iluminación: La luz principal utilizada para la observación del fenómeno debe estar posicionada de tal manera que el fenómeno en sí esté iluminado y los rayos de luz tengan trayectorias que ingresan a la cámara. Mediante el uso de un fondo reflector blanco se evitará que la fuente de luz esté visible en el cuadro, ya que esto causaría la sobresaturación de la imagen.

Figura 3.16 *Diagrama Descriptivo de Posicionamiento de Cámara y Luz Respecto al Canal Observado*



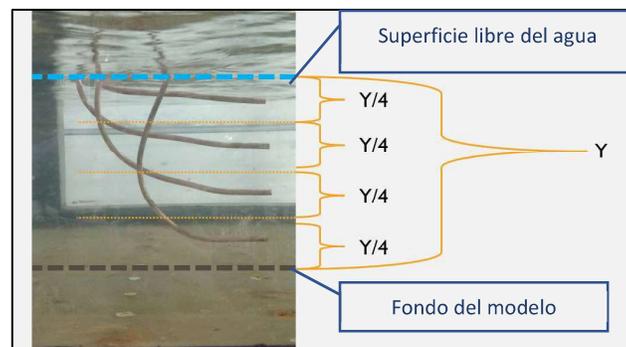
Nota. Elaborado por Terra, B. Quito, 2019.

3.5.5 Recomendaciones del Dispositivo de Inyección de Trazador Químico

El aparato de inyección de trazador químico al flujo está compuesto por 4 jeringas de 20 ml de capacidad. Cada jeringa está conectada a un tubo de cobre de 7.5 mm de diámetro de diferentes longitudes. Al momento de realizar el ensayo, todas las jeringas necesarias para ello deben ser presionadas simultáneamente para obtener una distribución uniforme del trazador en el flujo.

Distancia vertical entre tubos de inyección: Las longitudes variables de los tubos y la flexibilidad de su material permiten que las salidas de permanganato puedan ser distribuidas verticalmente de manera uniforme a lo largo del calado del flujo observado. Sin embargo, los tubos deben tener la misma orientación en planta.

Figura 3.17 Espaciamiento Vertical entre Tubos de Inyección de Permanganato de Potasio



Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Distancia longitudinal entre inyector y cámara: La distancia entre la cámara rápida y el dispositivo de inyección del trazador debe ser experimentalmente impuesta para cada ensayo realizado. Si el inyector se encuentra muy cercano a la cámara, es posible que la velocidad del trazador observada sea únicamente representativa de la velocidad de salida del trazador del tubo de cobre. En cambio, si el inyector

está muy lejos de la cámara, el trazador estará muy disuelto en el agua en el momento de la grabación.

Figura 3.18 *Dispositivo de Inyección de Trazador Químico*



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

3.6 Rutina de Programación

La rutina principal creada para el análisis de velocimetría “Rutina_Principal_Velocimetria.m” es el componente clave para la lectura e interpretación de los videos grabados por la cámara de alta velocidad. El código de la rutina fue desarrollado por el autor de esta investigación en el software Matlab utilizando su lenguaje nativo. El código y el diagrama de flujo de la rutina de análisis de los videos grabados se encuentra en los Anexos 6.2 y 6.3 respectivamente. El objetivo general de esta programación es que, a partir del video leído, se obtienen los valores necesarios para calcular velocidades del movimiento del trazador químico descrita por la siguiente ecuación:

$$V = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Donde V es la velocidad (m/s), Δx es la dimensión longitudinal de la medición (m), Δt es el intervalo de tiempo en el cual se realiza la medición (s). La rutina de análisis de los videos grabados empieza por la elección de cual video será leído por el

programa mediante la entrada de su dirección virtual en la memoria de la computadora utilizada y su nombre de archivo.

3.6.1 Organización y Delimitación de Información Relevante para el Análisis

La siguiente etapa consiste en transformar el video elegido en un conjunto de matrices tridimensionales y eliminar los datos que no son necesarios para el análisis de velocimetría. Mediante una rutina de programación paralela llamada “mraw.m”, se puede convertir la información del video seleccionado en información matricial (Lindner, 2017). Adicionalmente la rutina paralela almacena algunas variables descriptivas del video como nombre de archivo, número de “frames”, dimensiones de imagen, número de píxeles por imagen y “framerate” (Lindner, 2017). Cada imagen individual es compuesta por 3 matrices bidimensionales cada una representativa de un color constituyente de una señal digital RGB (rojo, azul y verde) y todas con dimensiones correspondientes a la resolución de la imagen grabada. El valor individual de cada celda en dichas matrices corresponde a la intensidad de luminosidad del color correspondiente en un único píxel de la imagen. Ya que el archivo “.mraw” almacena información visual en un formato de 8 bits, los valores de las matrices generadas pueden variar entre 0 y 256. Por ejemplo, con valores de 0 de intensidad en las 3 capas de la señal para un mismo píxel, se tiene un punto de color negro; si se tienen valores de 256, esto resulta en un punto de color blanco; para obtener cualquier otro color posible, se deben combinar distintos valores de intensidad en las 3 capas.

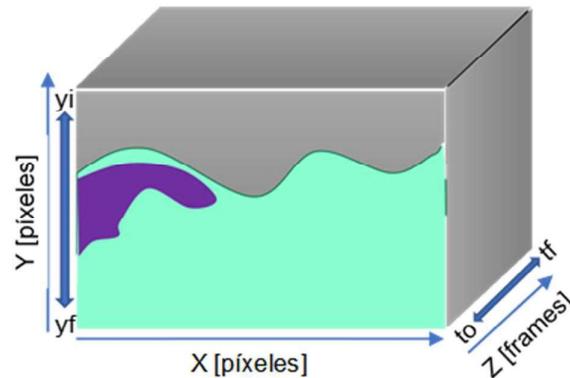
Con el archivo transformado por la rutina paralela, el usuario debe imponer una serie de datos de entrada para eliminar porciones de las matrices que no son

relevantes para el análisis de velocimetría. Se debe definir cuál es el rango de tiempo del análisis con la entrada del número de la primera imagen que será leída (“to”) y la última (“tf”), luego la extensión vertical de la imagen analizada mediante la coordenada vertical del límite superior de la imagen cortada (“Ysup”) y el límite inferior (“Yinf”). Se recomienda limitar la imagen de tal manera que solo se pueda visualizar el fondo reflector.

En conjunto con la delimitación de la información, la rutina principal organiza los datos matriciales. Para ello, la rutina crea dos matrices tridimensionales, una para la porción roja de la señal digital y otra para la porción verde de la señal. Los ejes de las matrices tridimensionales (x, y, z) corresponden a lo siguiente:

- X: dimensión longitudinal horizontal de la imagen en píxeles.
- Y: dimensión longitudinal vertical de la imagen en píxeles delimitada por el usuario.
- Z: dimensión temporal del desarrollo del video a lo largo de la duración impuesta por el usuario.

Figura 3.19 Diagrama Explicativo de Ejes de Matrices Tridimensionales de Video

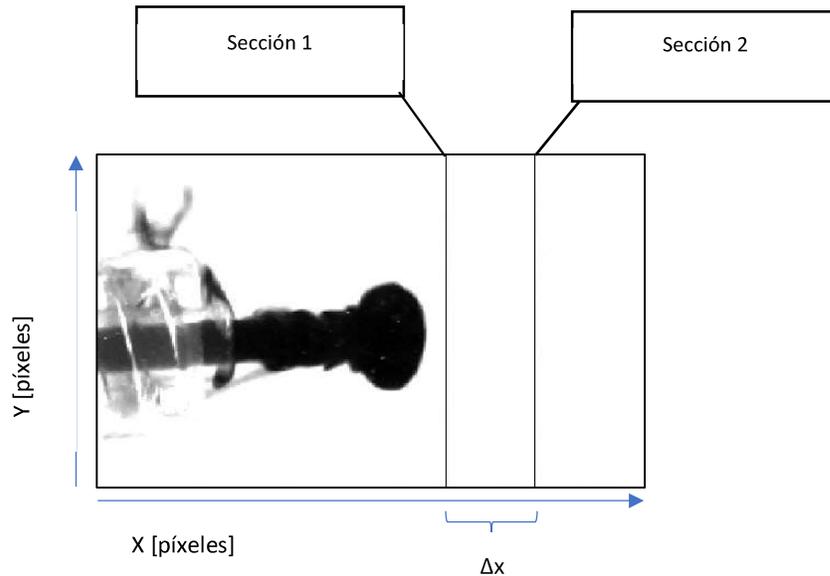


Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

3.6.2 Secciones Temporales

Las secciones temporales son planos bidimensionales que describen lo que ocurre en un punto longitudinal del video a lo largo del tiempo. Su dimensión vertical corresponde al mismo eje y da la matriz tridimensional pero su dimensión horizontal describe el tiempo durante el cual transcurre la lectura del video. Una manera de visualizar el concepto de la sección temporal es imaginar que las matrices tridimensionales del video leído son “cortadas” para crear planos paralelos a los ejes y & z. De acuerdo a un par de coordenadas longitudinales horizontales (secc_x1 y secc_x2) impuestas por el usuario, se define la ubicación de las secciones temporales en ambas matrices tridimensionales (roja y verde). La distancia longitudinal entre las dos secciones temporales impuestas por el usuario corresponde al “ Δx ” necesario para calcular la velocidad del flujo.

Figura 3.19 Diagrama Explicativo de Ubicación de Secciones Temporales



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab. Editado por Terra B. Quito, 2019.

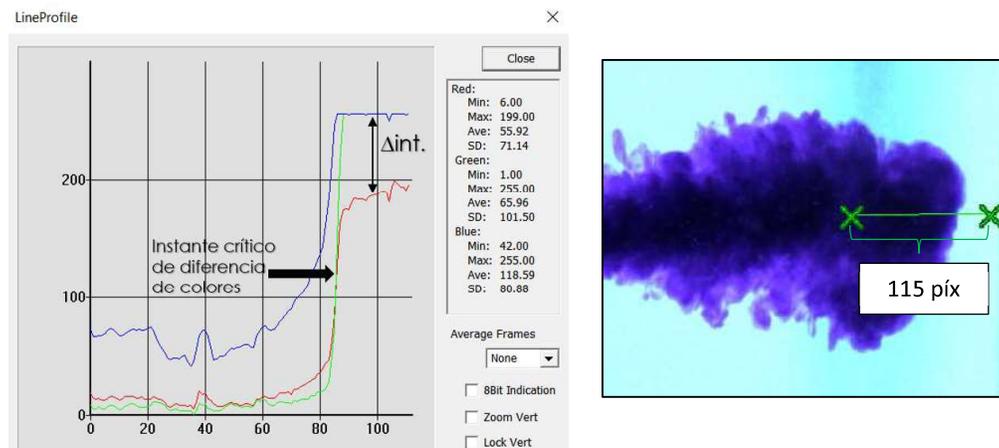
3.6.3 Comparación de Capas de Colores

Para reconocer la presencia del trazador químico inyectado al flujo y analizar su movimiento, se leerán los valores de intensidad de luminosidad en las dos secciones temporales de ambas matrices tridimensionales comparativamente entre ellas.

Mediante el análisis de una serie de videos donde se presencia la llegada de la pigmentación del permanganato de potasio en un flujo en movimiento, se observa un patrón recurrente en la interacción entre las capas de color de la señal RGB. Se evidencia que el patrón de colores en los píxeles que representan el fondo reflector es en orden creciente de intensidad rojo, verde y azul, con valores generalmente altos para los tres colores (ya que el blanco corresponde al color de máxima intensidad para los tres colores). En cambio, para un píxel donde se visualiza un punto concentrado de la pigmentación del permanganato de potasio, el patrón de

colores en orden creciente de intensidades cambia a verde, rojo y azul con valores de intensidad generalmente más bajos por el color oscuro del trazador químico.

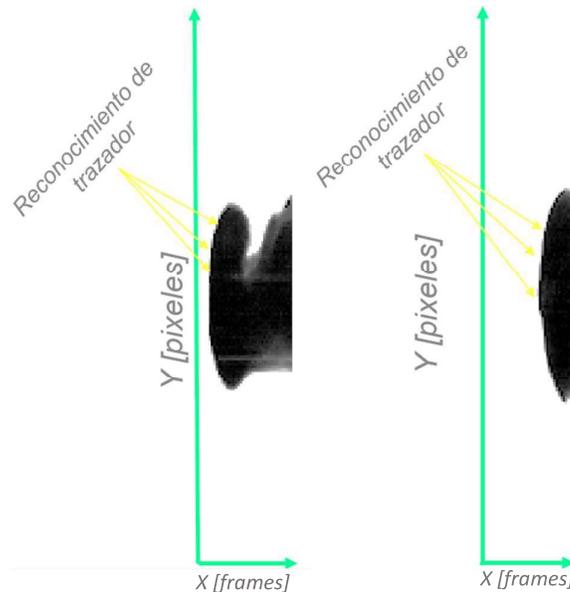
Figura 3.20 Visualización de Intensidades de Colores a lo Largo de una Línea



Nota. Capturas de pantalla recuperadas de Photron Fastcam Viewer. Editado por Terra B. Quito, 2019.

Por causa de este cambio entre patrones de colores en el momento del apareamiento de la pigmentación de permanganato de potasio, se considera que el contorno del trazador puede ser reconocido mediante un análisis de diferencias de intensidades entre la capa roja y la capa verde. La rutina calcula para cada línea horizontal de las secciones temporales cual píxel es el primero que presenta una diferencia de colores entre las capas roja y verde donde la intensidad del color rojo sobrepasa la intensidad del color verde.

Figura 3.21 Secciones Temporales



Nota. Capturas de pantalla recuperada de Matlab. Editado por Terra B. Quito, 2019.

El reconocimiento de la forma del trazador a lo largo del tiempo es visualmente resaltado mediante el trazado de puntos negros a lo largo de su contorno izquierdo (ya que las coordenadas izquierdas de las secciones transversales representan los patrones de colores que ocurren primero en la línea del tiempo). Luego de reconocer el desarrollo de la pigmentación del trazador químico a lo largo del tiempo en ambos puntos longitudinales, se tienen dos valores de tiempo (coordenada horizontal de la sección temporal) para cada coordenada vertical de las imágenes. Con esto, se puede calcular una serie de valores de Δt mediante la resta entre los dos tiempos leídos.

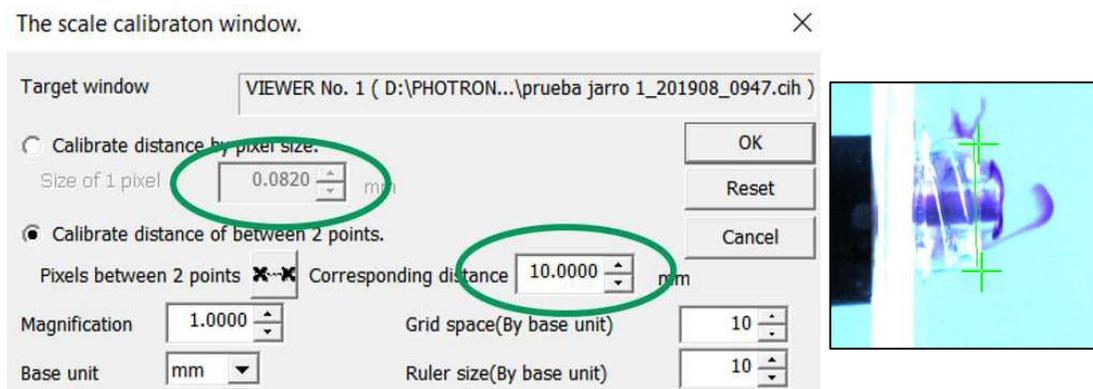
3.6.4 Conversión de Unidades

Con las etapas previas del análisis, se han obtenido datos de distancia y tiempos con unidades de un contexto de video (píxeles y “frames”, respectivamente). Para

obtener un resultado final coherente y entendible en el contexto de la hidráulica es necesario realizar la conversión de las unidades de Δt y Δx .

El programa PFV tiene una función interna que permite relacionar dimensiones visualizadas (píxeles) y dimensiones reales (mm) en la imagen. Por ejemplo, con una imagen de una regla se pueden escoger dos puntos en la imagen (entre los cuales se puede medir la distancia) e ingresar la distancia real (en mm) para que esta sea comparada con la distancia visual en píxeles entre los mismos puntos. Con la relación entre estas dos unidades, se puede realizar la conversión entre ellas según su proporción. Sin embargo, hay que tener en cuenta que, el medio por el cual pasa la luz (aire, agua, vidrio) afecta las proporciones de las imágenes visualizadas.

Figura 3.22 Función de Conversión de Unidades Longitudinales Entre Imagen (Píxeles) y Fenómeno Observado (mm)



Nota. Capturas de pantalla recuperada de Photron Fastcam Viewer. Editado por Terra B. Quito, 2019.

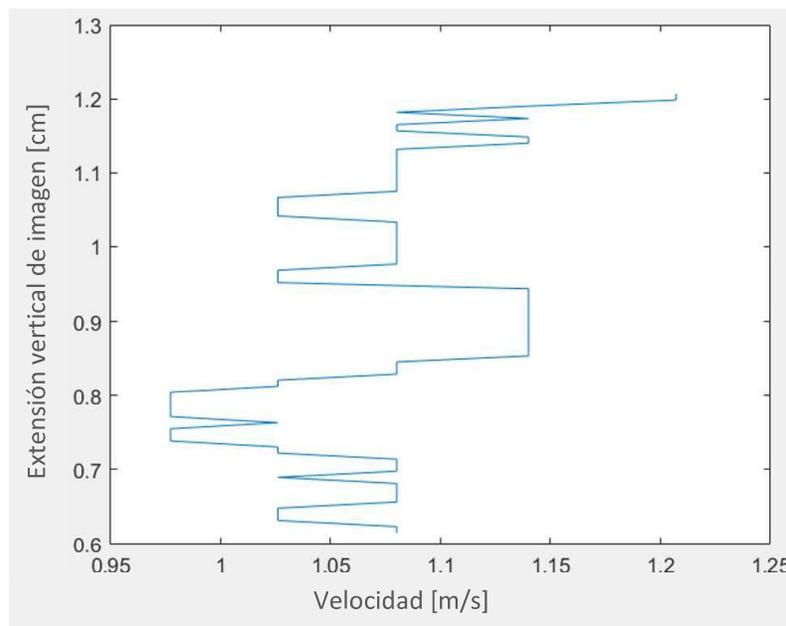
Ya que el parámetro de grabación “framerate” (cuya unidad es $\frac{\text{frames}}{\text{segundo}}$ o “FPS”) es previamente impuesto en el momento del ensayo, y este es uno de los datos grabados por el proceso de transformación de video en matrices, se puede utilizar

como el factor de conversión de unidades de tiempo (de “frames” a segundos) para el cálculo de velocidades de flujo.

3.6.5 Cálculo de Velocidades

Los valores obtenidos en las previas etapas de la rutina son aplicados a una simple ecuación dimensional de velocidad ($V = \frac{\Delta x}{\Delta t}$). Ya que se tiene una serie de valores de Δt a lo largo de la dimensión vertical de las imágenes leídas, cada valor de intervalo de tiempo será relacionado con el valor único longitudinal de Δx para obtener valores de velocidades a lo largo de la dimensión vertical.

Figura 3.23 Gráfica de Valores de Velocidad a lo Largo de la Dimensión Vertical de Lectura



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

3.6.6 Filtrado de Datos

El análisis de velocimetría descrito arriba tiene la capacidad de únicamente medir velocidades horizontales (siguiendo el eje x de los píxeles de las imágenes leídas)

del desplazamiento del trazador químico utilizado. Debido a esta peculiaridad de la rutina, la ocurrencia de desplazamientos verticales de partículas del trazador químico en el fenómeno observado puede generar discrepancias en los resultados del análisis. Dichas discrepancias se manifiestan gráficamente como picos repentinos de valores evidentemente divergentes del valor medio de los demás presentados. Cuando se observa la presencia de estos valores erróneos, es necesaria la aplicación de un proceso estadístico de suavizado de datos. Para ello el autor de esta investigación desarrolló una rutina separada llamada "Filtrado_Mediana_Movil.m" para realizar dichos procesos en base a los resultados obtenidos por la rutina principal de análisis de velocimetría. El código de la rutina de filtrado de datos se encuentra en el Anexo 6.4.

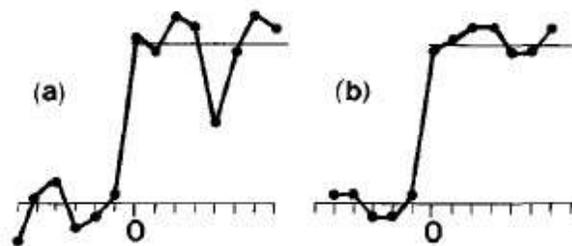
Existen varias metodologías posibles para suavizar una curva de datos con diferentes costos computacionales y objetivos de uso (NIST/SEMATECH, 2012). El proceso estadístico que fue utilizado para tratar las velocidades resultantes del análisis de imágenes es el suavizado por mediana móvil. Este es un método de suavizado no lineal que es especialmente eficiente en la eliminación de picos y valles puntuales no representativos de las tendencias de valores en una serie de datos (Justusson, 1981). En primer lugar, la serie de datos a ser analizada se divide en subgrupos de valores con la misma cantidad de datos definido por el "periodo" del método. Luego, para cada subgrupo se determina su mediana (valor en el centro de una serie cuando sus valores se ordenan en orden creciente), el cual sustituye todo el subgrupo correspondiente para crear una nueva serie suavizada con menos datos. Un filtro de mediana móvil de periodo tamaño n (número entero

impar) en una secuencia $\{x_i, i \in \mathbb{Z}\}$ se define mediante lo siguiente (Justusson, 1981):

$$y_i = \text{Mediana } x_i \triangleq \underbrace{\text{Mediana}}_n (x_{i-b}, \dots, x_i, \dots, x_{i+b}), \quad i \in \mathbb{Z} \quad (3.4)$$

Donde y_i es el valor resultante del filtro con una ordenada secuencial i , *Mediana* es el operador que obtiene la mediana de una serie de datos, x_i representa los valores originales de la serie a ser filtrada con ordenadas secuenciales i , n es el periodo del filtro, $b = (n - 1)/2$ y \mathbb{Z} es el conjunto de números naturales. Para tener un suavizado efectivo de los picos no representativos de una serie, se debe tener un tamaño de periodo mínimo del doble del ancho del pico a ser eliminado (si un pico es compuesto de 3 datos considerados divergentes, el periodo debe ser por lo menos igual a 6 para que el pico de valores discrepantes sea eliminado). Sin embargo, no se debe tener un tamaño de periodo muy grande porque eso reduce el número de datos restantes luego del suavizado de la serie original (Justusson, 1981).

Figura 3.24 Comparación de Series de Datos: (A) Secuencia de Datos Preliminares con Picos Divergentes, (B) Misma Serie de Datos Filtrada por el Método de Mediana Móvil, usando un periodo de $n = 3$

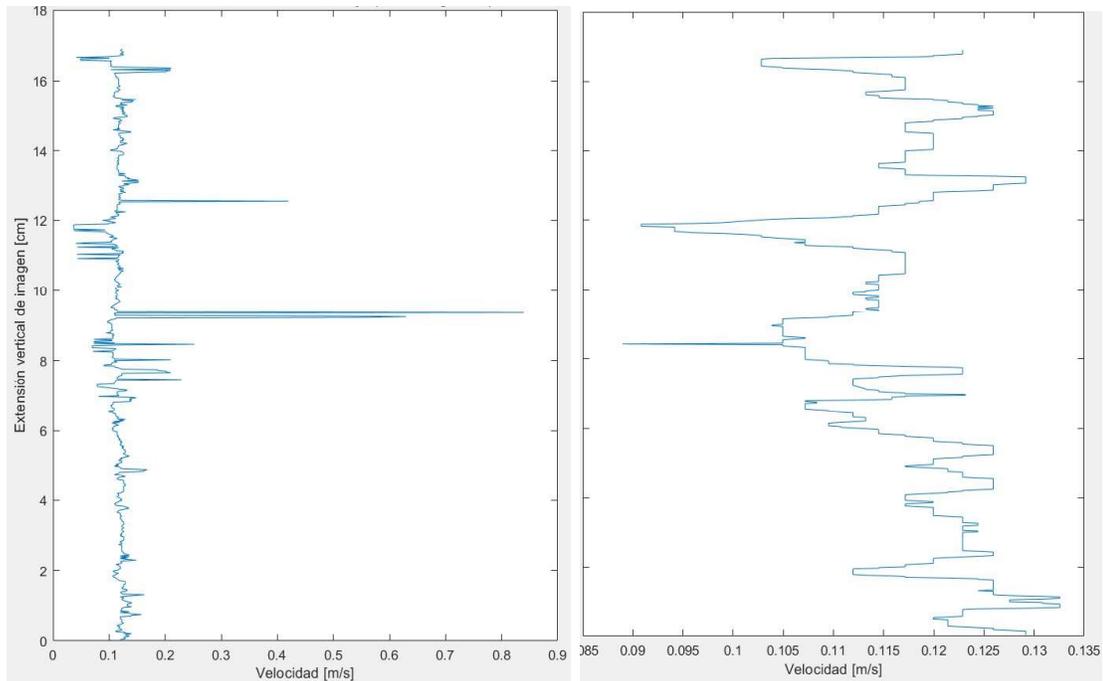


Nota. Recuperado de Justusson, B. I. (1981). Median filtering: statistical properties. En Two-dimensional digital signal processing II. <https://doi.org/10.1007/bfb0057597>.

3.6.7 Obtención de Resultados

Luego del análisis y del tratamiento estadístico de los datos resultantes, el programa automáticamente presenta los resultados finales al usuario. Simultáneamente se presenta un valor único de velocidad media del flujo y dos gráficas que describen la velocidad de traslado del trazador químico a lo largo de la extensión vertical de las imágenes registradas. La velocidad media del flujo se calcula mediante el promedio de todos los valores de velocidad presentes en la gráfica de distribución de velocidades luego de su filtrado ya que la distribución de velocidades del trazador químico a lo largo del calado es aproximadamente uniforme. Las dos gráficas tienen como ejes principales la dimensión vertical de las imágenes en mm y las velocidades puntuales horizontales en m/s, y presentan los datos obtenidos por el análisis antes y después del suavizado de la serie para que ambos conjuntos de datos puedan ser comparados directamente.

Figura 3.25 Ejemplo de Gráficas de Velocidad Horizontal (No Filtrada y Filtrada Respectivamente)



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

3.7 Ejemplo de Cálculo

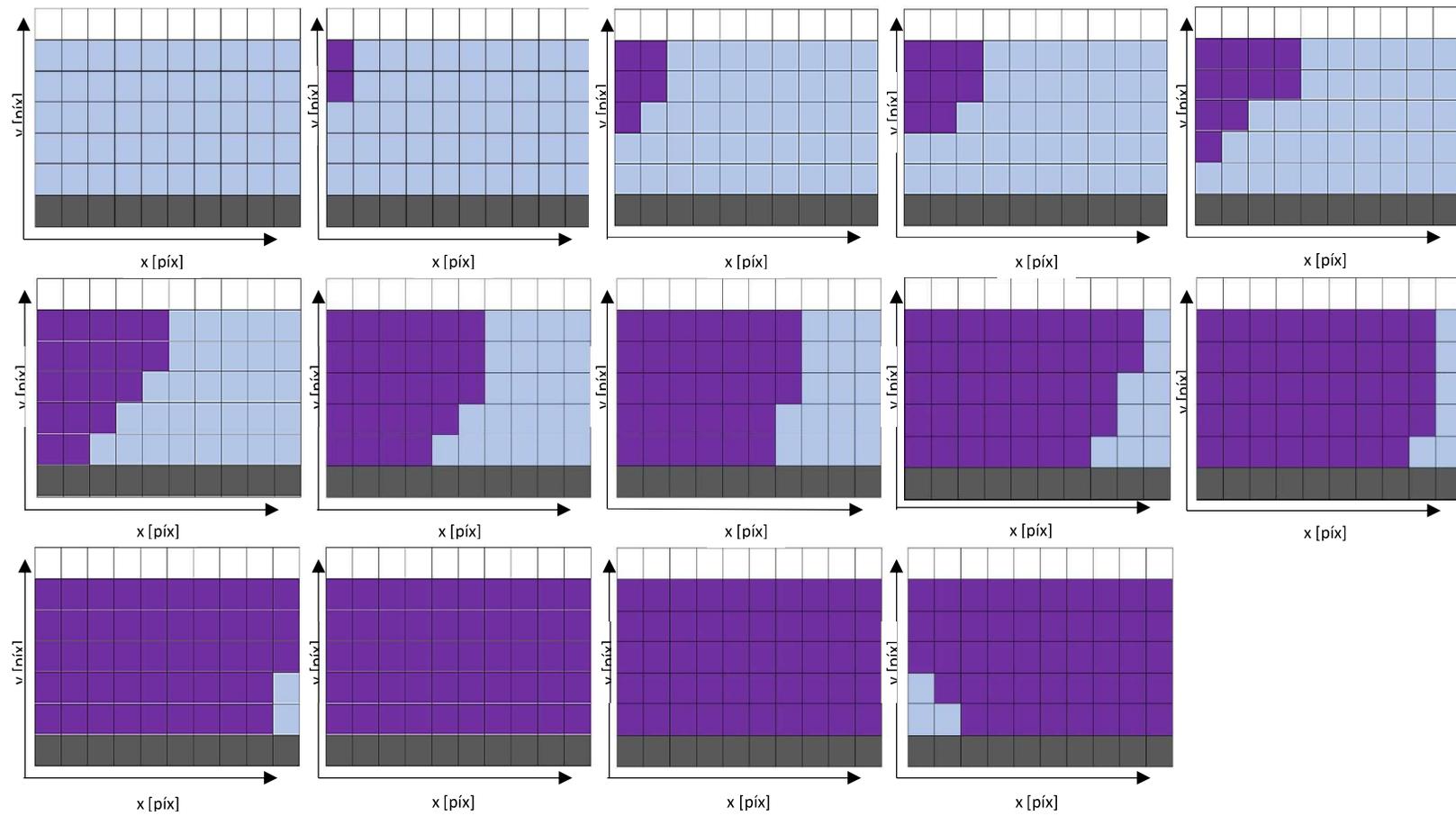
En esta sección se presenta el proceso de análisis matricial del cálculo de velocidades horizontales de flujo, pero utilizando un video simplificado con una cantidad de datos reducida. El video tiene los siguientes datos:

- 14 “frames” de duración
- Extensión vertical (original) de 7 píxeles
- Extensión horizontal (original) de 10 píxeles
- “Framerate” de 1000 FPS
- Factor de conversión de unidades longitudinales de 2 píx/mm

La primera etapa del programa consiste en transformar la información visual en datos matriciales. Se ilustrarán los “frames” del video en seguida donde cada cuadro representa un pixel de las imágenes grabadas en sus debidas coordenadas verticales y horizontales. Los píxeles de diferentes colores indican diferentes elementos visualizados:

- Blanco: fondo reflector sin estar en contacto con el flujo
- Celeste: flujo de agua (valores de intensidad de colores $G > R$)
- Morado: porción del flujo con trazador químico (valores de intensidad de colores $R \geq G$)
- Gris: estructura del canal sin fondo reflector

Figura 3.26 Frames (1-14) de Video Simplificado para Ejemplo de Cálculo



Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

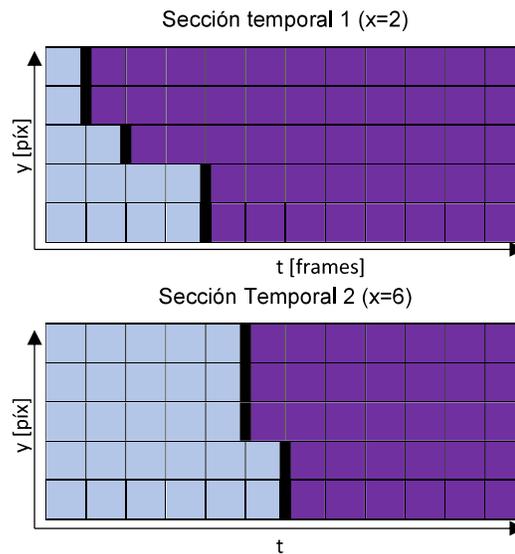
El programa entonces organiza las imágenes secuencialmente (como fue explicado en la sección 3.6.1 y a partir de esto, se forman las matrices tridimensionales para la capa roja y la capa verde de la señal RGB.

En seguida a partir de los valores de las variables del programa (Y_{sup} , Y_{inf} , t_i y t_o) ingresadas por el usuario, se delimita la información relevante al análisis. Ya que los píxeles que representan únicamente el fondo reflector o la estructura del canal no son pertinentes al análisis de velocimetría, estos deben ser eliminados, es decir $Y_{sup}=2$ y $Y_{inf}=6$. Así mismo, los frames donde se visualiza el flujo de agua sin presencia del trazador o donde se ve que el trazador ya está saliendo del cuadro tampoco sirven para el análisis, las variables a ser impuestas deben ser $t_i=2$ y $t_o=13$.

Luego, se deben escoger las ubicaciones longitudinales de las secciones temporales. Ya que este video simplificado tiene dimensiones relativamente pequeñas, se facilita la elección de estos datos ya que lo que se busca es tener secciones temporales que al final de la duración de análisis tengan puntos de presencia del trazador a lo largo de toda su extensión vertical. Se define entonces que $secc_x1=2$ y $secc_x2=6$.

Según las variables impuestas previamente y el proceso de obtención de secciones temporales descrita en la sección 3.6.2, las secciones temporales de este caso serían las siguientes:

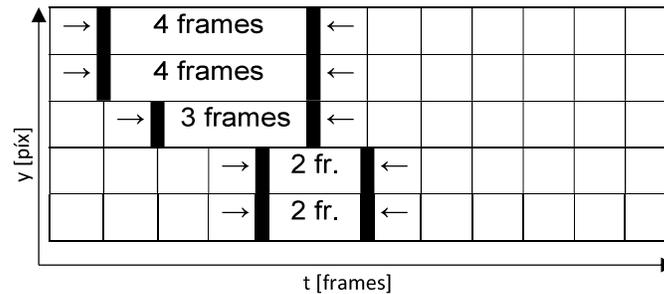
Figura 3.27 Secciones Temporales de Ejemplo de Cálculo



Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Cabe resaltar que las secciones temporales tienen como eje horizontal la duración del análisis realizado por el programa en unidades de "frames". Las líneas gruesas y negras trazadas a lo largo del contorno izquierdo de la pigmentación del trazador en las secciones de este ejemplo representan el reconocimiento de la diferencia de intensidades de colores característicamente causada por la presencia del permanganato de potasio, como fue explicado en la sección 3.6.3.

Si superponemos las líneas trazadas por el reconocimiento del contorno de la mancha de trazador en una sola gráfica, se puede visualizar fácilmente la obtención de las diferencias de tiempo realizada por la rutina de Matlab:

Figura 3.28 Gráfica de Determinación de Diferencias de Tiempo Para Ejemplo de Cálculo

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Con la obtención de los valores de tiempo de traslado para cada coordenada vertical de la imagen analizada, estos valores pueden ser aplicados en la ecuación de velocidad en conjunto con la distancia longitudinal entre secciones para que se obtengan las velocidades horizontales del flujo. Utilizando los datos iniciales del video se debe realizar también la conversión de unidades longitudinales y temporales para que los valores de velocidad sean coherentes y entendibles en el contexto hidráulico (m/s).

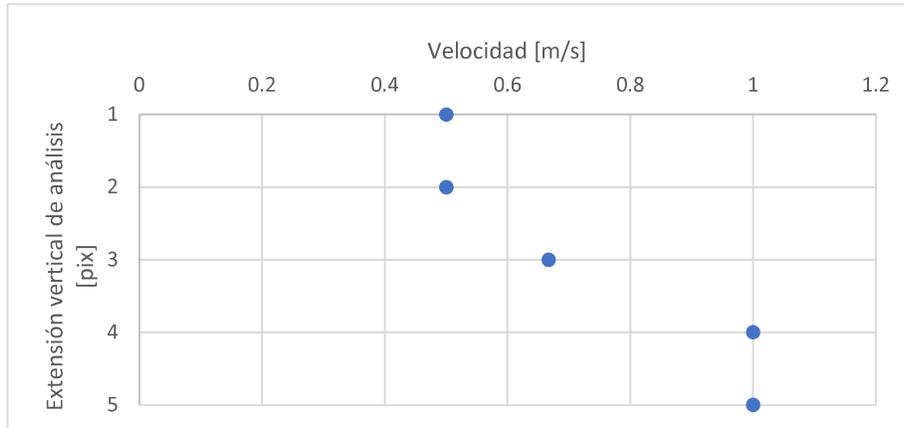
Tabla 3.3 Tabla de Cálculo de Velocidades Horizontales de Ejemplo de Cálculo

| Coordenada y [pix] | Delta t [frames] | Delta t [s] | Delta x [pix] | Delta x [mm] | Velocidad [m/s] |
|--------------------|------------------|-------------|---------------|--------------|-----------------|
| 1 | 4 | 0.004 | 4 | 2 | 0.500 |
| 2 | 4 | 0.004 | 4 | 2 | 0.500 |
| 3 | 3 | 0.003 | 4 | 2 | 0.667 |
| 4 | 2 | 0.002 | 4 | 2 | 1.000 |
| 5 | 2 | 0.002 | 4 | 2 | 1.000 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

La presentación de resultados de la rutina de Matlab utilizada consiste en una gráfica de los resultados de velocidades obtenidos para cada coordenada vertical analizada y el valor promedio de estos valores como el valor único de velocidad media del flujo observado.

Figura 3.29 Gráfica de Determinación de Diferencias de Tiempo para Ejemplo de Cálculo



Nota. Captura de pantalla recuperada de Excel por Terra B. Quito, 2019.

El promedio de las velocidades obtenidas en este ejemplo es el siguiente:

$$V_{media} = 0.733m/s$$

Las operaciones de filtrado de resultados no se aplican a una serie de datos resultantes tan corta ya que no se puede afirmar que existan discrepancias evidentes en sus valores. Para ejemplificar este proceso estadístico se considerará una serie de datos de velocidad para una serie de coordenadas en y que podría salir como resultado de la rutina de análisis de velocimetría, la cual es más extensa que la presentada para el ejemplo de cálculo de velocidades:

Tabla 3.4 Serie de Datos de Coordenadas en el Eje Y & Velocidades para Ejemplo de Filtrado

| Coordenada y [píx] | Velocidad [m/s] |
|--------------------|-----------------|
| 1 | 0.20 |
| 2 | 0.22 |
| 3 | 0.21 |
| 4 | 0.25 |
| 5 | 1.80 |
| 6 | 0.19 |
| 7 | 0.21 |
| 8 | 0.20 |
| 9 | 0.03 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

En esta serie de datos se puede observar que existen valores puntuales discrepantes de la tendencia presentada por los demás puntos. El punto (5, 1.8) presenta un pico muy alto y el punto (9, 0.03) presenta una brecha muy baja. Con esta serie de resultados se obtendría una velocidad media de 0.37 m/s, la cual no es representativa. Para eliminar esos puntos discrepantes y preservar la tendencia de valores representativa de la serie de resultados, se utilizará el método de tratamiento de mediana móvil con un periodo de 3 valores. La primera etapa es subdividir la serie original en grupos según el tamaño del periodo. Se debe en seguida encontrar las medianas de coordenadas en el eje vertical y velocidades horizontales para cada grupo, los cuales formarán un nuevo punto que sustituirá el grupo en la serie de datos filtrada.

Tabla 3.5 *Aplicación de Método de Mediana Móvil para Ejemplo de Filtrado*

| Grupo 1 | | Nuevo punto filtrado 1 | |
|--------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
| Coordenada y [píx] | Velocidad [m/s] | Coordenada y [píx] | Velocidad [m/s] |
| 1 | 0.2 | | |
| 2 | 0.22 | 2 | 0.21 |
| 3 | 0.21 | | |
| Grupo 2 | | Nuevo punto filtrado 2 | |
| Coordenada y [píx] | Velocidad [m/s] | Coordenada y [píx] | Velocidad [m/s] |
| 4 | 0.25 | | |
| 5 | 1.8 | 5 | 0.25 |
| 6 | 0.19 | | |
| Grupo 3 | | Nuevo punto filtrado 3 | |
| Coordenada y [píx] | Velocidad [m/s] | Coordenada y [píx] | Velocidad [m/s] |
| 7 | 0.21 | | |
| 8 | 0.2 | 8 | 0.2 |
| 9 | 0.03 | | |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

De esta forma, el valor de velocidad media del flujo luego de la operación de filtrado es igual a 0.22 m/s, el cual es más representativo de la serie de datos presentada previamente al tratamiento estadístico.

Capítulo IV

4. Resultados y Discusiones

4.1 Pruebas Experimentales

Para cada sesión de pruebas, se presenta una serie de análisis realizados a partir de los videos grabados por la cámara de alta velocidad Photron Fastcam mini Ux100, cada uno acompañado por los datos pertinentes a su realización. Como mencionado en la sección 3.6.1, las extensiones de las imágenes analizadas se limitan por la porción del flujo que tiene como fondo la superficie reflectora colocada al lado opuesto del canal. De esta manera no existen puntos en la imagen que representen el flujo con otros materiales de fondo o partes del fondo reflector sin el flujo que se desea analizar. La figura 4.1 mostrada a continuación es una foto de la perspectiva aproximada de la cámara de alta velocidad en la prueba y se resalta la porción del cuadro que es utilizada para el análisis matricial.

Figura 4.1 Cuadro de Datos Relevantes para Análisis Matricial desde la Perspectiva de la Cámara de Alta Velocidad



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.2 Plan de Pruebas

La aplicación de la metodología de medición de velocidades de flujo propuesta en esta investigación se realizará mediante las siguientes pruebas:

Tabla 4.1 *Plan de Pruebas*

| Código de Prueba | Canal | Velocidad* [m/s] |
|------------------|------------|------------------|
| P-01 | CIERHI-EPN | 0.15 |
| P-02 | CIERHI-EPN | 0.4 |
| P-03 | LDH-FICA | 1.1 |
| P-04 | LDH-FICA | 1.5 |

Nota. Las velocidades postuladas en el plan de pruebas son referenciales. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.3 Descripción de las Pruebas Experimentales

4.3.1 P-01

Para la primera prueba realizada de esta investigación se quiso probar la metodología de medición de velocidades de flujo con un flujo lento en el canal hidrodinámico de del CIERHI-EPN. Para ello se impuso una pendiente relativamente baja y se levantó parcialmente la compuerta al final del canal para que se tenga un flujo de alto calado y bajas velocidades. La cámara de alta velocidad fue instalada en una abscisa del canal donde el patrón de velocidades del flujo no estaba directamente afectado por la presencia del vertedero. La tabla 4.2 presenta las variables técnicas referentes a la realización de la prueba P-01, las cuales se mantuvieron constantes durante toda la prueba. Estos datos incluyen la abscisa longitudinal de la posición de la cámara de alta velocidad (medida a partir del inicio del canal), el calado del flujo medido en el punto de visualización, la pendiente del canal, la carga medida en el tubo piezométrico del tanque de ingreso

del canal, el caudal resultante del uso de la expresión 3.1 y el framerate utilizado para la grabación de los videos.

Tabla 4.2 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-01

| Abscisa de la cámara en el canal [m] | Calado d [cm] | Pendiente [%] | Carga hidráulica en tanque del canal Δh [cm] | Caudal Q [l/s] | Framerate [FPS] |
|---|-----------------|--|--|--|-----------------|
| 14.4500 | 43.9000 | 0.6000 | 27.1000 | 52.4700 | 250 |
| Factor conversión espacial (centro de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (pared de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (promedio) [mm/píx] | |
| 0.2360 | | 0.1670 | | 0.2015 | |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

La tabla 4.3 especifica las variables de grabación que fueron impuestas en cada video grabado de la prueba P-01. Se especifica el número del video grabado, su nombre de archivo, el tiempo de apertura de la cámara (o “Shutter speed”) la distancia longitudinal entre el punto de observación del flujo y el punto de inyección del trazador químico y el diámetro de apertura de la lente de la cámara rápida (el cual varia en orden decreciente según un parámetro denominado alfabéticamente entre A y Q).

Tabla 4.3 Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para la Prueba P-01

| Video | Nombre de archivo | Shutter Speed [1/(frame*sec)] | Distancia entre cámara e inyector [m] | Apertura |
|-------|---|----------------------------------|--|----------|
| 1 | canal (dia 6) 250 fps 06% 1_201909_1539.mraw | 1 | 1.2 | F |
| 2 | canal (dia 6) 250 fps 06% 2_201909_1558.mraw | 1 | 1.2 | F |
| 3 | canal (dia 6) 250 fps 06% 3_201909_1603.mraw | 1 | 1.2 | G |
| 4 | canal (dia 6) 250 fps 06% 4_201909_1607.mraw | 1 | 1.2 | G |
| 5 | canal (dia 6) 250 fps 06% 5_201909_1615.mraw | 1 | 0.8 | F |
| 6 | canal (dia 6) 250 fps 06% 6_201909_1619.mraw | 1 | 0.8 | F |
| 7 | canal (dia 6) 250 fps 06% 7_201909_1623.mraw | 1 | 0.8 | F |
| 8 | canal (dia 6) 250 fps 06% 8_201909_1627.mraw | 1 | 0.8 | F |
| 9 | canal (dia 6) 250 fps 06% 9_201909_1633.mraw | 1 | 1 | F |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.3.2 P-02

La prueba P-02 fue similar a la prueba P-01 pero se aumentó la pendiente del canal para obtener velocidades de flujo más altas y se incrementó el caudal para compensar por la reducción del calado del flujo en dichas velocidades. Igualmente se aproximó la cámara de alta velocidad al inicio del canal.

La tabla 4.4 presenta las variables técnicas referentes a la realización de la prueba P-02, las cuales se mantuvieron constantes durante toda la prueba. Estos datos incluyen la abscisa longitudinal de la posición de la cámara de alta velocidad (medida a partir del inicio del canal), el calado del flujo medido en el punto de visualización, la pendiente del canal, la carga medida en el tubo piezométrico del

tanque de ingreso del canal, el caudal resultante del uso de la expresión 3.1 y el framerate utilizado para la grabación de los videos.

Tabla 4.4 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-02

| Abscisa de la cámara en el canal [m] | Calado d [cm] | Pendiente [%] | Carga hidráulica en tanque del canal Δh [cm] | Caudal Q [l/s] | Framerate [FPS] |
|---|-----------------|--|--|--|-----------------|
| 3.850 | 23.700 | 1.000 | 34.600 | 95.900 | 500 |
| Factor conversión espacial (centro de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (pared de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (promedio) [mm/píx] | |
| 0.270 | | 0.192 | | 0.231 | |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

La tabla 4.5 especifica las variables de grabación que fueron impuestas en cada video grabado de la prueba P-02. Se especifica el número del video grabado, su nombre de archivo, el tiempo de apertura de la cámara (o “Shutter speed”) la distancia longitudinal entre el punto de observación del flujo y el punto de inyección del trazador químico y el diámetro de apertura de la lente de la cámara rápida (el cual varia en orden decreciente según un parámetro denominado alfabéticamente entre A y Q).

Tabla 4.5 Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para Prueba P-02

| Video | Nombre de archivo | Shutter Speed [1/(frame*sec)] | Distancia entre cámara e inyector [m] | Apertura |
|-------|--|-------------------------------|---------------------------------------|----------|
| 1 | canal (dia 5) 500 fps 1% 1_201909_1012.mraw | 1 | 1.5 | I |
| 2 | canal (dia 5) 500 fps 1% 2_201909_1020.mraw | 1 | 1.5 | I |
| 3 | canal (dia 5) 500 fps 1% 3_201909_1028.mraw | 1 | 1.8 | I |
| 4 | canal (dia 5) 500 fps 1% 5_201909_1044.mraw | 1 | 1.3 | I |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.3.3 P-03

La prueba P-03 fue la primera en esta investigación a ser realizada en el canal hidrodinámico del LDH-FICA. Utilizando el caudal máximo permitido por el sistema de medición de presiones de diafragma, se obtuvo un flujo a una velocidad cercana a la postulada en el plan de pruebas mediante ajuste de la pendiente del canal. Así se pudo obtener un flujo de velocidad relativamente alta, pero con un calado visualmente perceptible por la cámara de alta velocidad. Se posicionó la cámara de alta velocidad en una abscisa cercana a la mitad de su longitud donde se presentaban buenas condiciones de observación (paneles de vidrio limpios y flujo no estable).

La tabla 4.6 presenta las variables técnicas referentes a la realización de la prueba P-03, las cuales se mantuvieron constantes durante toda la prueba. Estos datos incluyen la abscisa longitudinal de la posición de la cámara de alta velocidad (medida a partir del inicio del canal), el calado del flujo medido en el punto de visualización, la pendiente del canal, la diferencia de cargas piezométricas leídas antes y después del diafragma interno de la tubería de ingreso de flujo al canal, el caudal resultante del uso de la expresión 3.2 y el framerate utilizado para la grabación de los videos.

Tabla 4.6 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-03

| Abscisa de la cámara en el canal [m] | Calado d [cm] | Pendiente [%] | Diferencia de carga en diafragma Δh [cm] | Caudal Q [l/s] | Framerate [FPS] |
|---|-----------------|--|--|--|-----------------|
| 7.5000 | 14.1000 | 0.0200 | 178.0000 | 68.7500 | 500 |
| Factor conversión espacial (centro de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (pared de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (promedio) [mm/píx] | |
| 0.1339 | | 0.1020 | | 0.1180 | |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

La tabla 4.7 especifica las variables de grabación que fueron impuestas en cada video grabado de la prueba P-03. Se especifica el número del video grabado, su nombre de archivo, el tiempo de apertura de la cámara (o “Shutter speed”) la distancia longitudinal entre el punto de observación del flujo y el punto de inyección del trazador químico y el diámetro de apertura de la lente de la cámara rápida (el cual varia en orden decreciente según un parámetro denominado alfabéticamente entre A y Q).

Tabla 4.7 Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para la Prueba P-03

| Video | Nombre de archivo | Shutter Speed [1/(frame*sec)] | Distancia entre cámara e inyector [m] | Apertura |
|-------|--------------------|-------------------------------|---------------------------------------|----------|
| 1 | PRUEBA P-03 1.mraw | 1 | 2 | F |
| 2 | PRUEBA P-03 2.mraw | 1 | 2 | F |
| 3 | PRUEBA P-03 3.mraw | 1 | 2 | F |
| 4 | PRUEBA P-03 4.mraw | 1 | 2 | F |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.3.4 P-04

En la última prueba realizada para esta investigación se buscó observar un flujo rápido. Similarmente a la prueba P-03, se utilizó el caudal máximo del canal para poder preservar un calado observable por la cámara de alta velocidad. Se ajusto la

pendiente del canal para llegar a un valor de velocidad cercano al postulado por el plan de pruebas. Se instalaron los equipos de observación en la misma abscisa que la de la prueba anterior.

La tabla 4.8 presenta las variables técnicas referentes a la realización de la prueba P-04, las cuales se mantuvieron constantes durante toda la prueba. Estos datos incluyen la abscisa longitudinal de la posición de la cámara de alta velocidad (medida a partir del inicio del canal), el calado del flujo medido en el punto de visualización, la pendiente del canal, la diferencia de cargas piezométricas leídas antes y después del diafragma interno de la tubería de ingreso de flujo al canal, el caudal resultante del uso de la expresión 3.2 y el framerate utilizado para la grabación de los videos.

Tabla 4.8 Especificaciones Técnicas de la Prueba P-04

| Abscisa de la cámara en el canal [m] | Calado d [cm] | Pendiente [%] | Diferencia de carga en diafragma Δh [cm] | Caudal Q [l/s] | Framerate [FPS] |
|---|-----------------|--|--|--|-----------------|
| 7.5000 | 10.8000 | 0.7600 | 176.0000 | 68.3600 | 1000 |
| Factor conversión espacial (centro de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (pared de canal) [mm/píx] | | Factor conversión espacial (promedio) [mm/píx] | |
| 0.1230 | | 0.0940 | | 0.1085 | |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

La tabla 4.9 especifica las variables de grabación que fueron impuestas en cada video grabado de la prueba P-04. Se especifica el número del video grabado, su nombre de archivo, el tiempo de apertura de la cámara (o “Shutter speed”) la distancia longitudinal entre el punto de observación del flujo y el punto de inyección del trazador químico y el diámetro de apertura de la lente de la cámara rápida (el

cual varia en orden decreciente según un parámetro denominado alfabéticamente entre A y Q).

Tabla 4.9 *Especificaciones Técnicas de Videos Grabados para la Prueba P-04*

| Video | Nombre de archivo | Shutter Speed [1/(frame*sec)] | Distancia entre cámara e inyector [m] | Apertura |
|-------|--------------------|----------------------------------|--|----------|
| 1 | PRUEBA P-04 1.mraw | 1 | 2 | I |
| 2 | PRUEBA P-04 2.mraw | 1 | 1.5 | I |
| 3 | PRUEBA P-04 3.mraw | 1 | 1.5 | I |
| 4 | PRUEBA P-04 4.mraw | 1 | 1.5 | I |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.4 Ejecución de las Pruebas Experimentales y Resultados Obtenidos

Como descrito en el Capítulo III, la metodología de velocimetría no intrusiva propuesta consiste en la etapa experimental donde se optimizan las condiciones de visualización del flujo estudiado y se realiza la captura de imágenes; luego se analizan dichas imágenes mediante la rutina de análisis escrita por el autor de esta investigación para obtener la velocidad del flujo y finalmente se aplica la rutina de filtrado de datos escrita por el mismo autor para obtener los resultados finales de la metodología.

En esta sección se presentarán las variables de entrada para el uso de las rutinas, imágenes de las secciones temporales, las gráficas de velocidades y valores de velocidades medias de flujo previos y posteriores a las operaciones de filtrado de un video grabado durante cada prueba realizada para esta investigación. Para ver la misma información referente al procesamiento y los resultados de los demás videos grabados, ver los ítems del Anexo 6.5.

4.4.1 P-01 (Video 7)

En la tabla 4.10, se presentan los datos de entrada necesarios para la aplicación de la rutina de análisis de velocimetría del video 7 de la prueba P-01. Las variables “to” y “tf” definen la porción de la duración del video leída por la rutina (en “frames”), las variables “Ysup” y “Yinf” definen la extensión vertical de las imágenes leídas por la rutina (en píxeles) y las variables “secc_x1” y “secc_x2” corresponden a las ubicaciones longitudinales de las secciones temporales.

Tabla 4.10 Datos de Entrada para el Video 7 de la Prueba P-01

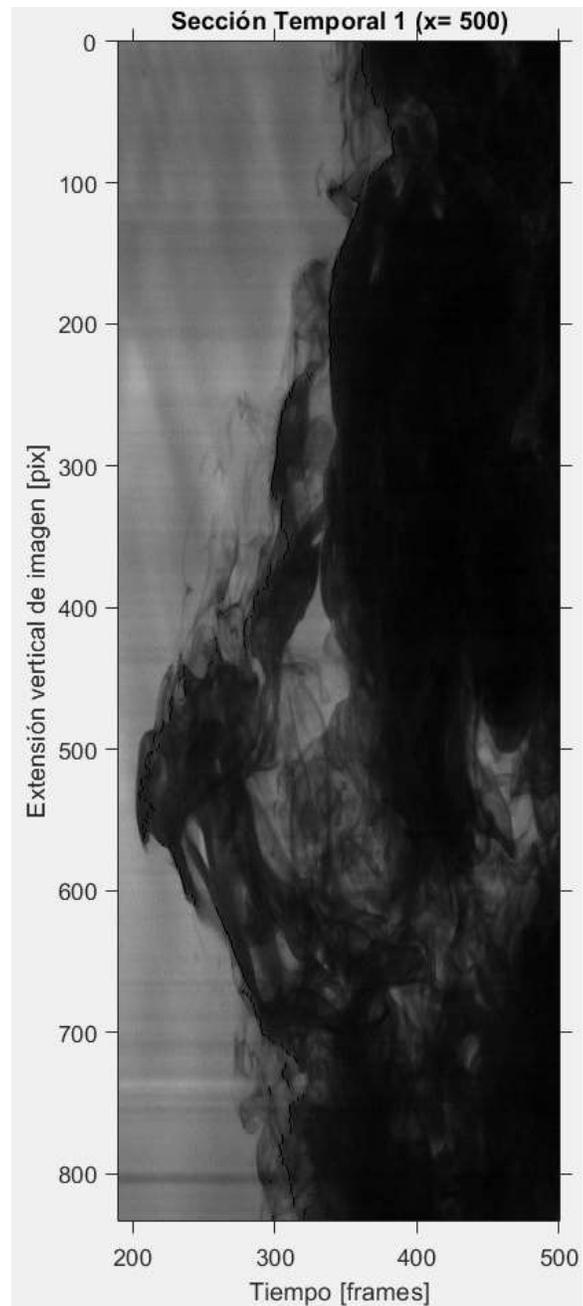
| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 190 | 500 | 310 | 1.24 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 55 | 886 | 831 | 167.4465 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 500 | 600 | 100 | 20.15 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

En la figura 4.2 y la figura 4.3 se presentan las secciones temporales obtenidas para el análisis de velocimetría del video 7 de la prueba P-01. La sección 1 está ubicada en la coordenada longitudinal $x=500$ de las imágenes grabadas y la sección 2 está ubicada en la coordenada $x=600$, la distancia longitudinal entre las cuales que define la variable $\Delta x=100$ píxeles lo que equivale a 20.15 mm. El eje horizontal de las secciones temporales es el tiempo de la lectura (310 frames o 1.24 segundos) del video entre el valor de to y tf (190 frames y 500 frames respectivamente). Ambas secciones temporales tienen como extensión vertical 310 píx, lo que equivale a 167.4465 mm según los valores de Ysup y Yinf (55 píx y 886 píx respectivamente). Como mencionado en la sección 3.6.3 los puntos negros

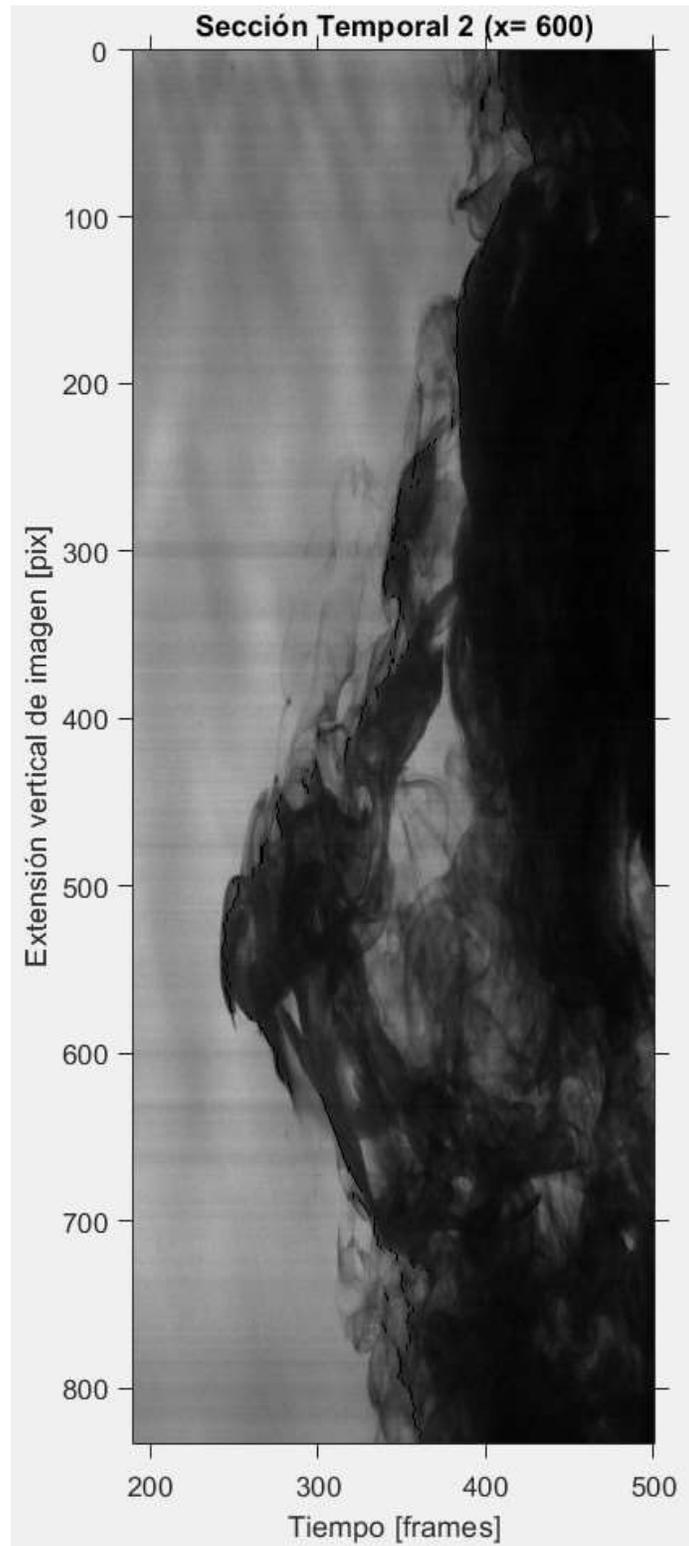
presentes en las secciones temporales de este método de análisis son la representación del primer instante de reconocimiento de la presencia del trazador químico en cada coordenada vertical de las secciones.

Figura 4.2 Sección Temporal 1 del Video 7 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

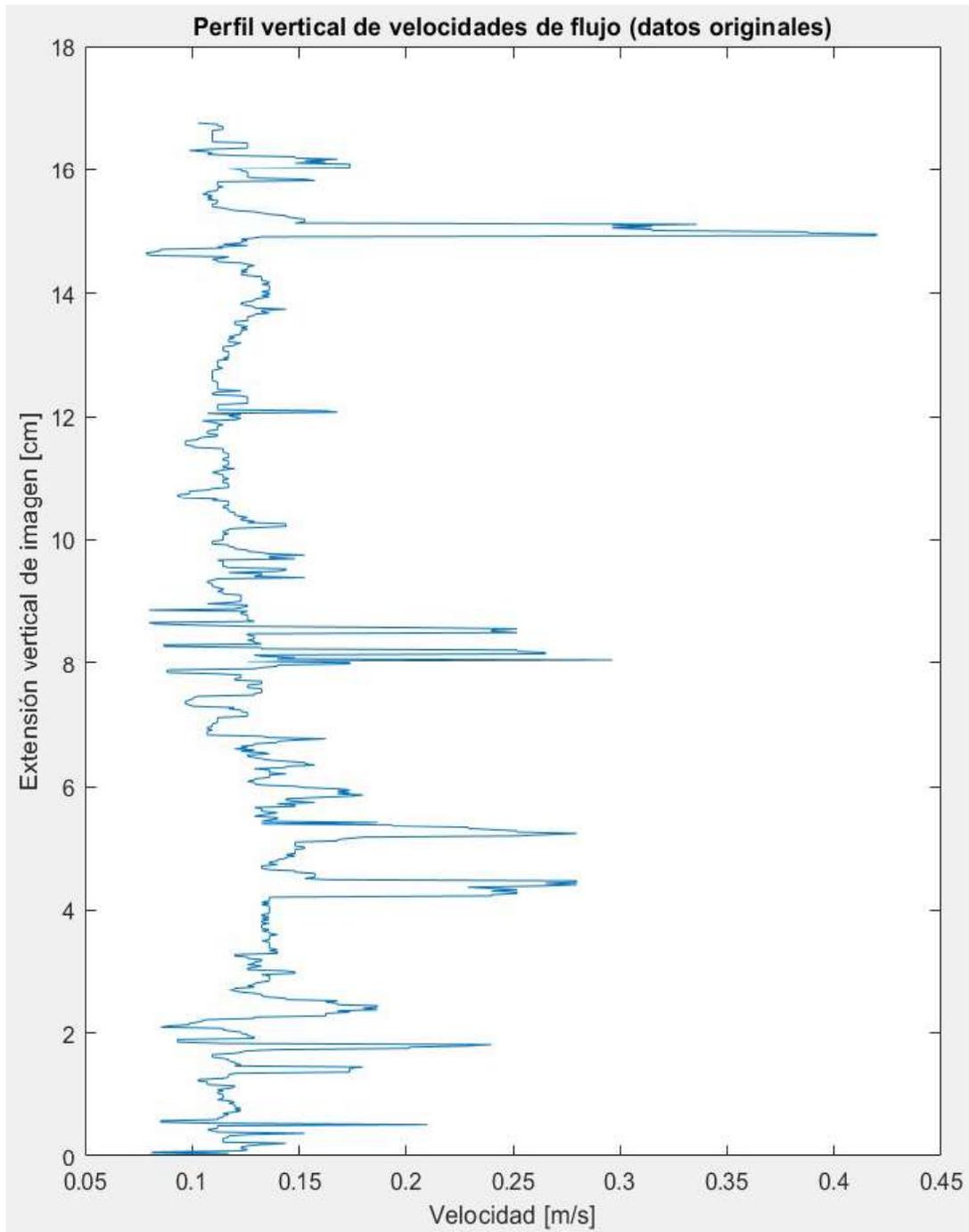
Figura 4.3 Sección Temporal 2 del Video 7 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

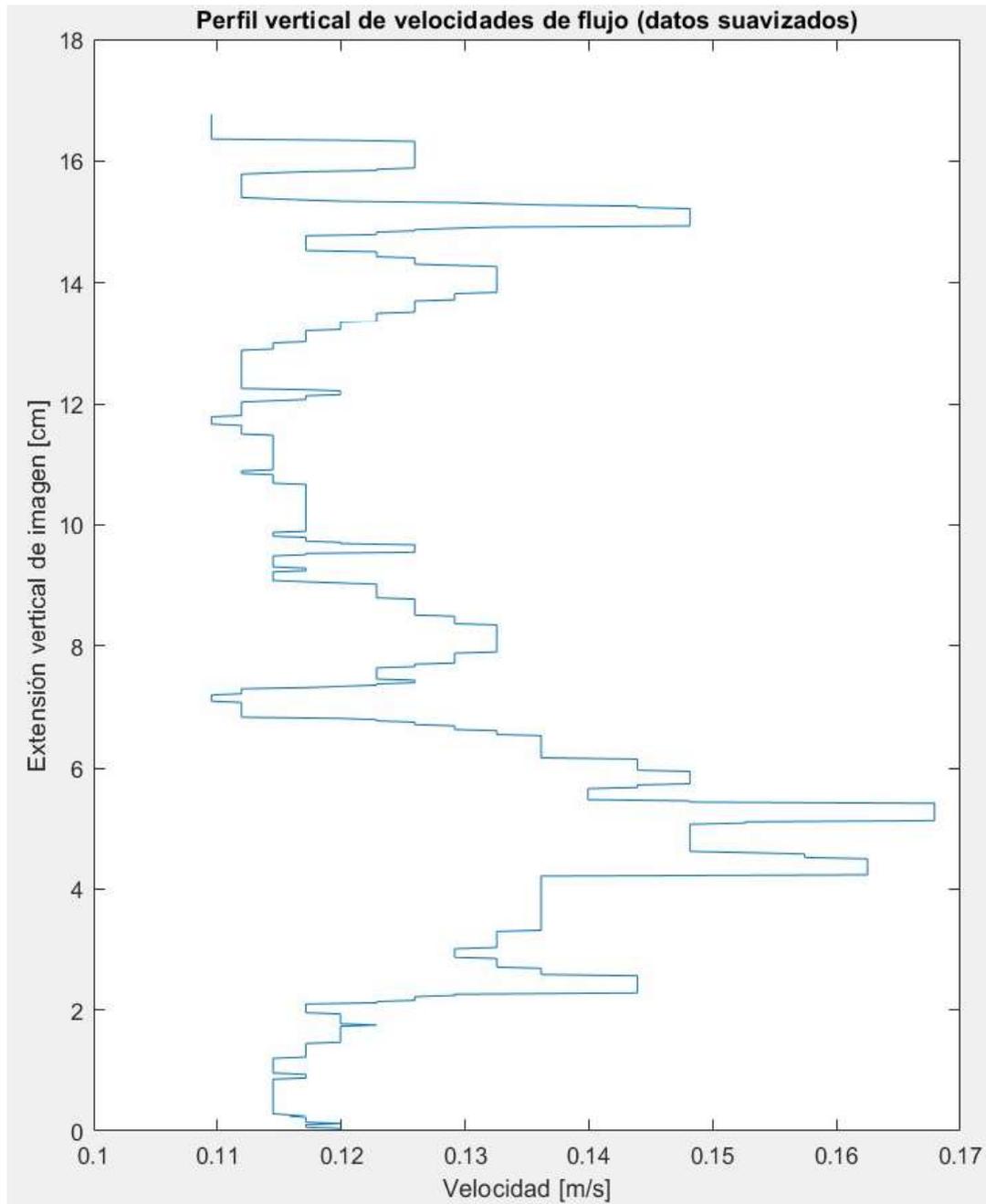
Como explicado en la sección 3.6.5 de esta investigación el cálculo de velocidades se basa principalmente en las secciones temporales del análisis y el reconocimiento de la pigmentación del trazador químico. Para cada punto en la extensión vertical de las imágenes leídas, se determina la diferencia de tiempo Δt entre el primer instante que se reconoce la presencia del permanganato de potasio en la primera sección temporal y el mismo instante en la segunda sección temporal. Las gráficas en la figura 4.4 y la figura 4.5 representan la distribución vertical (a lo largo de la extensión vertical de lectura) de velocidades horizontales del permanganato de potasio en el flujo observado. La primera imagen ilustra los datos obtenidos previamente al filtrado de datos y la siguiente los resultados posteriores a ello. En estas representaciones gráficas, la conversión de unidades temporales y longitudinales ya fue realizada (de píxeles/frame a m/s en el eje horizontal y de píxeles a cm en el eje vertical) para facilitar la interpretación de los resultados.

Figura 4.4 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 7 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.5 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 7 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

La siguiente tabla presenta los valores de velocidad media del flujo obtenidas mediante el análisis de velocimetría previamente y posteriormente al filtrado de datos y adicionalmente se indica el tamaño del periodo del filtro utilizado para tratar

los datos preliminares. Según la tabla 4.11, mediante el promediado de todos los valores de velocidad obtenidos en el análisis de velocimetría se obtuvo que la velocidad media preliminar del flujo es igual a 0.1331 m/s. Luego de la operación de filtrado por mediana móvil utilizando un periodo de 27 datos se obtuvo una reducción de los picos divergentes de valores de velocidad y se obtuvo finalmente una velocidad media filtrada de 0.1259 m/s.

Tabla 4.11 *Resultados Finales para el Video 7 de la Prueba P-01*

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1331 | 27 | 0.1259 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Los demás videos grabados y analizados para la prueba P-01 luego de la aplicación del filtro de mediana móvil tuvieron valores de velocidad media de flujo similares al presentado por el video 7, como se puede observar en la tabla 4.12. En la misma tabla se presenta el valor de la desviación estándar de los resultados obtenidos de velocidades medias filtradas de la prueba P-01 para que se analice la variación entre ellos. Igualmente se presenta el promedio de dichos resultados para que este valor sea comparado con los resultados de las actividades de validación del método.

Tabla 4.12 *Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-01 por Visualización*

| Video | Velocidad suavizada de video [m/s] |
|----------------|------------------------------------|
| 1 | 0.122 |
| 2 | 0.115 |
| 3 | 0.129 |
| 4 | 0.117 |
| 5 | 0.117 |
| 6 | 0.129 |
| 7 | 0.126 |
| 8 | 0.119 |
| 9 | 0.124 |
| Promedio [m/s] | Desv. Estándar [%] |
| 0.122 | 0.50 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Para observar el procesamiento y los resultados de dicho análisis de los otros videos de la prueba P-01 de manera más detallada, ver los Anexos en la sección 6.5.1 y para una interpretación del conjunto de resultados de las pruebas en comparación con los métodos de validación, ver la sección 4.2.1.

4.4.2 P-02 (Video 4)

En la tabla 4.13, se presentan los datos de entrada necesarios para la aplicación de la rutina de análisis de velocimetría del video 4 de la prueba P-02. Las variables “to” y “tf” definen la porción de la duración del video leída por la rutina (en “frames”), las variables “Ysup” y “Yinf” definen la extensión vertical de las imágenes leídas por la rutina (en píxeles) y las variables “secc_x1” y “secc_x2” corresponden a las ubicaciones longitudinales de las secciones temporales.

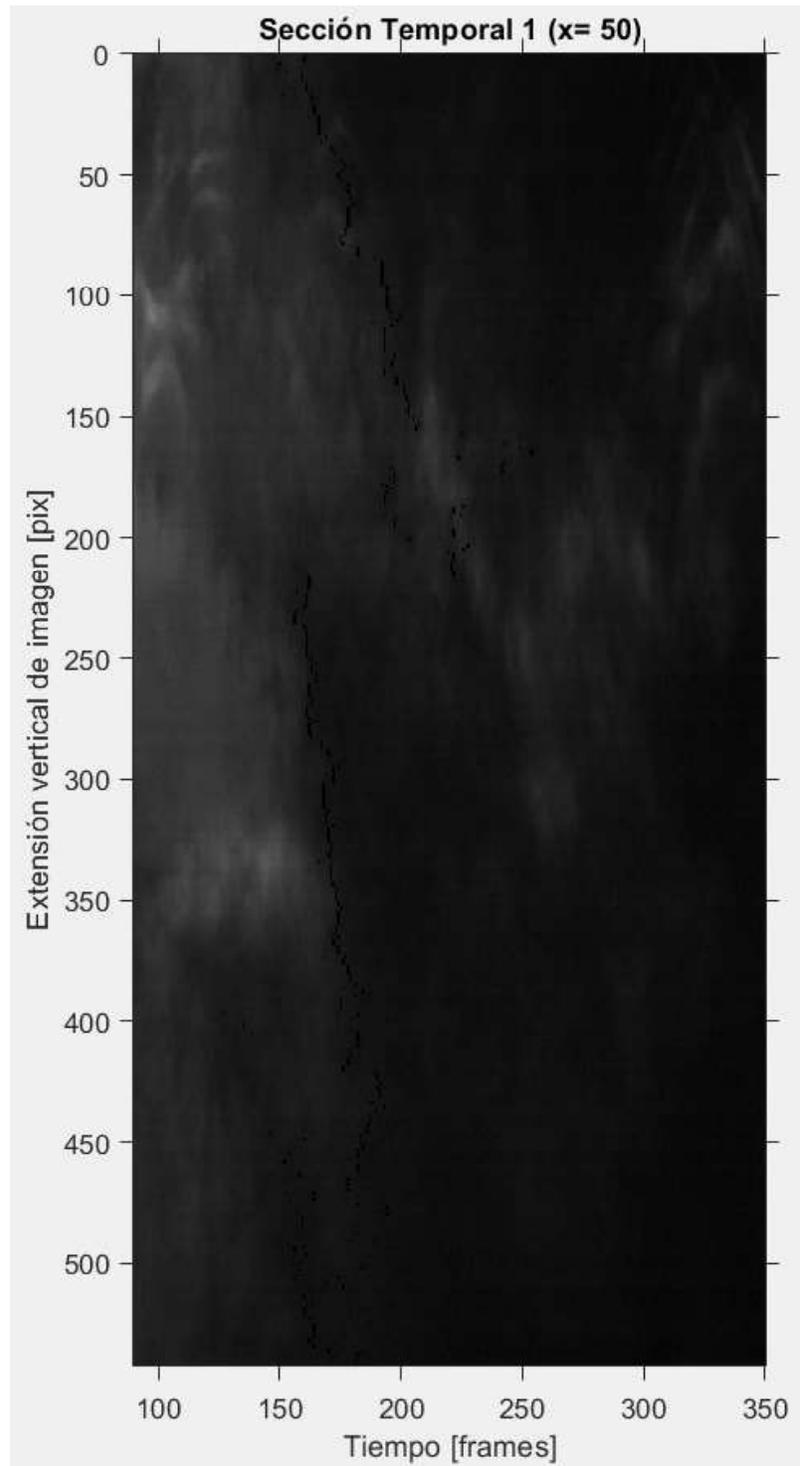
Tabla 4.13 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-02

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 90 | 350 | 260 | 0.52 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 230 | 770 | 540 | 124.74 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 50 | 150 | 100 | 21.3 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

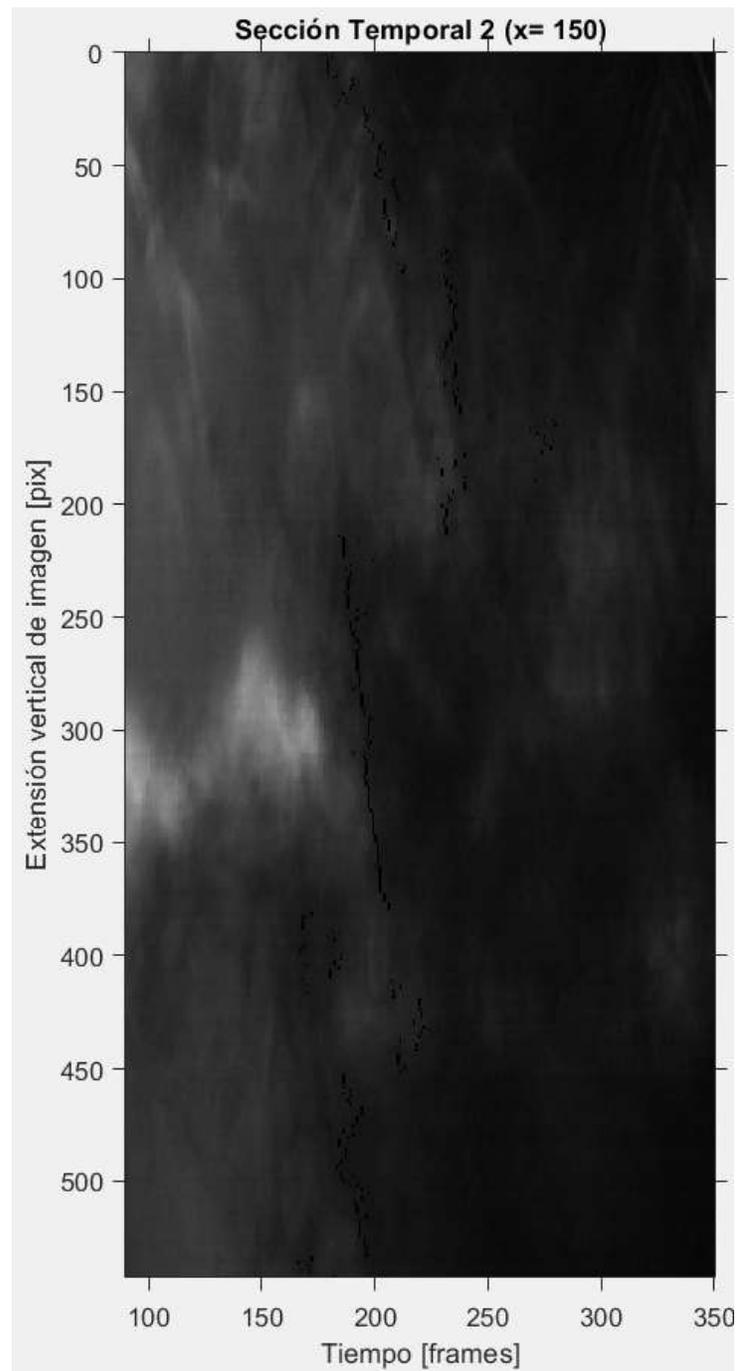
En la figura 4.6 y la figura 4.7 se presentan las secciones temporales obtenidas para el análisis de velocimetría del video 4 de la prueba P-02. La sección 1 está ubicada en la coordenada longitudinal $x=50$ de las imágenes grabadas y la sección 2 está ubicada en la coordenada $x=150$, la distancia longitudinal entre las cuales que define la variable $\Delta x=100$ píxeles lo que equivale a 21.3 mm. El eje horizontal de las secciones temporales es el tiempo de la lectura (260 frames o 0.52 segundos) del video entre el valor de t_0 y t_f (90 frames y 350 frames respectivamente). Ambas secciones temporales tienen como extensión vertical 540 píx, lo que equivale a 124.74 mm según los valores de Y_{sup} y Y_{inf} (230 píx y 770 píx respectivamente).

Figura 4.6 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.7 Sección Temporal 2 del Video 4 de la prueba P-02

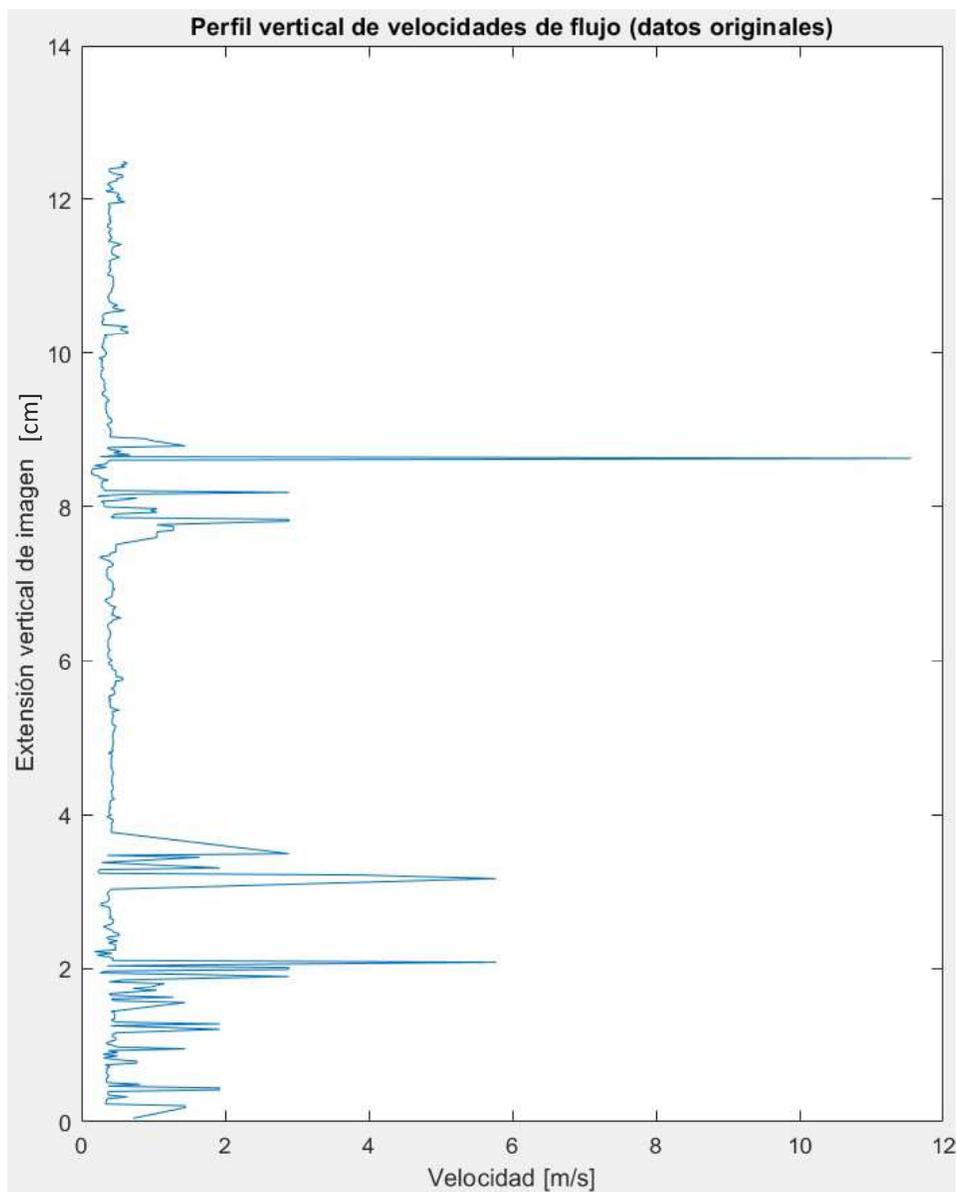


Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Las gráficas en la figura 4.8 y la figura 4.9 representan la distribución vertical (a lo largo de la extensión vertical de lectura) de velocidades horizontales del

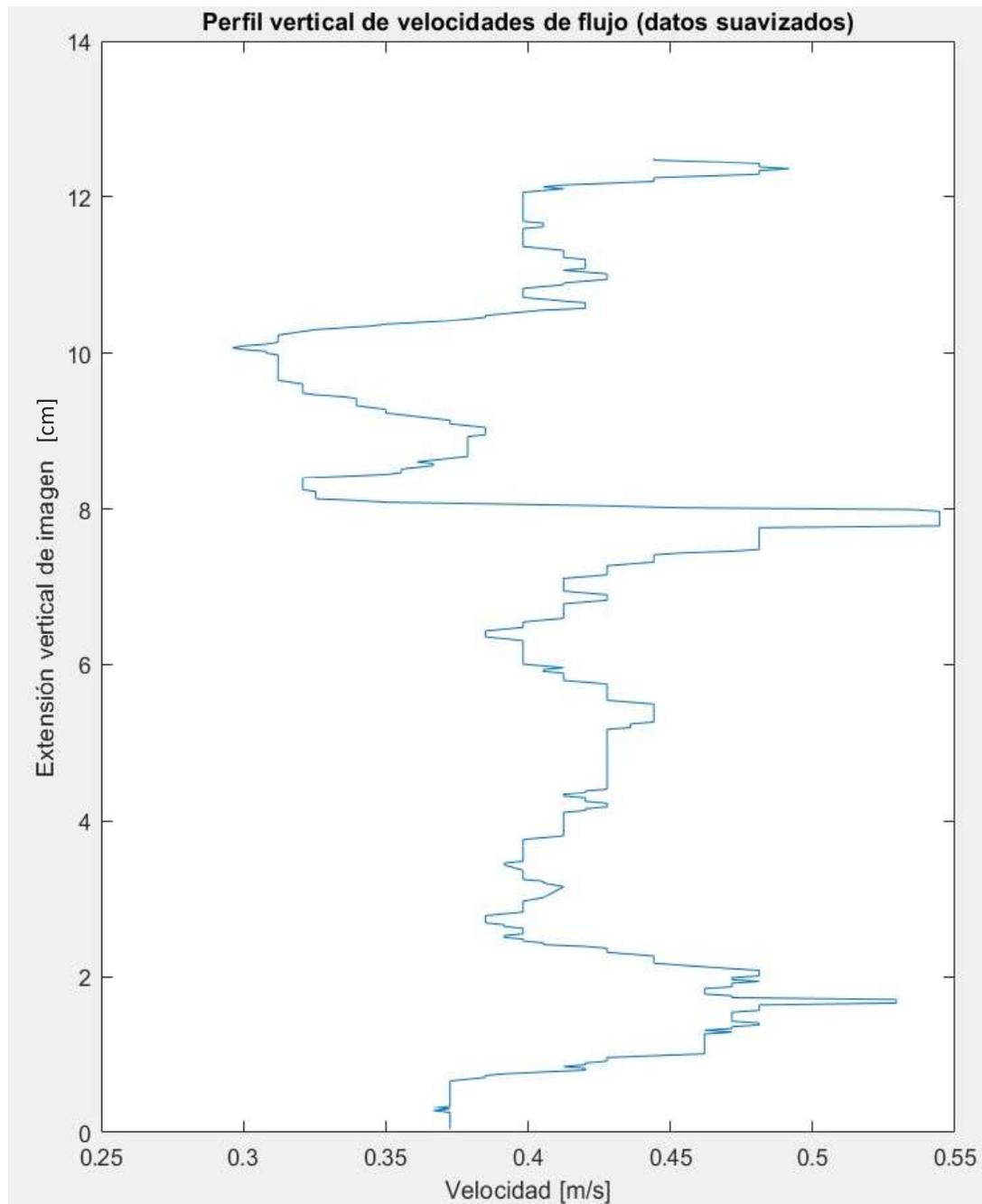
permanganato de potasio en el flujo observado. La primera imagen ilustra los datos obtenidos previamente al filtrado de datos y la siguiente los resultados posteriores a ello. En estas representaciones gráficas, la conversión de unidades temporales y longitudinales ya fue realizada (de píxeles/frame a m/s en el eje horizontal y de píxeles a cm en el eje vertical) para facilitar la interpretación de los resultados.

Figura 4.8 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.9 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

La siguiente tabla presenta los valores de velocidad media del flujo obtenidas mediante el análisis de velocimetría previamente y posteriormente al filtrado de datos y adicionalmente se indica el tamaño del periodo del filtro utilizado para tratar

los datos preliminares. Según la tabla 4.14, mediante el promediado de todos los valores de velocidad obtenidos en el análisis de velocimetría se obtuvo que la velocidad media preliminar del flujo es igual a 0.5562 m/s. Luego de la operación de filtrado por mediana móvil utilizando un periodo de 36 datos se obtuvo una reducción de los picos divergentes de valores de velocidad y se obtuvo finalmente una velocidad media filtrada de 0.4078 m/s.

Tabla 4.14 *Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-02*

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0,5562 | 36 | 0,4078 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Los demás videos grabados y analizados para la prueba P-02 luego de la aplicación del filtro de mediana móvil tuvieron valores de velocidad media de flujo similares al presentado por el video 4, como se puede observar en la tabla 4.15. En la misma tabla se presenta el valor de la desviación estándar de los resultados obtenidos de velocidades medias filtradas de la prueba P-02 para que se analice la variación entre ellos. Igualmente se presenta el promedio de dichos resultados para que este valor sea comparado con los resultados de las actividades de validación del método.

Tabla 4.15 *Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-02 por Visualización*

| Video | Velocidad suavizada de video [m/s] |
|----------------|------------------------------------|
| 1 | 0.371 |
| 2 | 0.392 |
| 3 | 0.374 |
| 4 | 0.408 |
| Promedio [m/s] | Desv. Estándar [%] |
| 0.386 | 1.5 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Para observar el procesamiento y los resultados de dicho análisis de los otros videos de la prueba P-02 de manera más detallada, ver los anexos en la sección 6.5.2 y para una interpretación del conjunto de resultados de las pruebas en comparación con los métodos de validación, ver la sección 4.2.2.

4.4.3 P-03 (Video 4)

En la tabla 4.16, se presentan los datos de entrada necesarios para la aplicación de la rutina de análisis de velocimetría del video 4 de la prueba P-03. Las variables “to” y “tf” definen la porción de la duración del video leída por la rutina (en “frames”), las variables “Ysup” y “Yinf” definen la extensión vertical de las imágenes leídas por la rutina (en píxeles) y las variables “secc_x1” y “secc_x2” corresponden a las ubicaciones longitudinales de las secciones temporales.

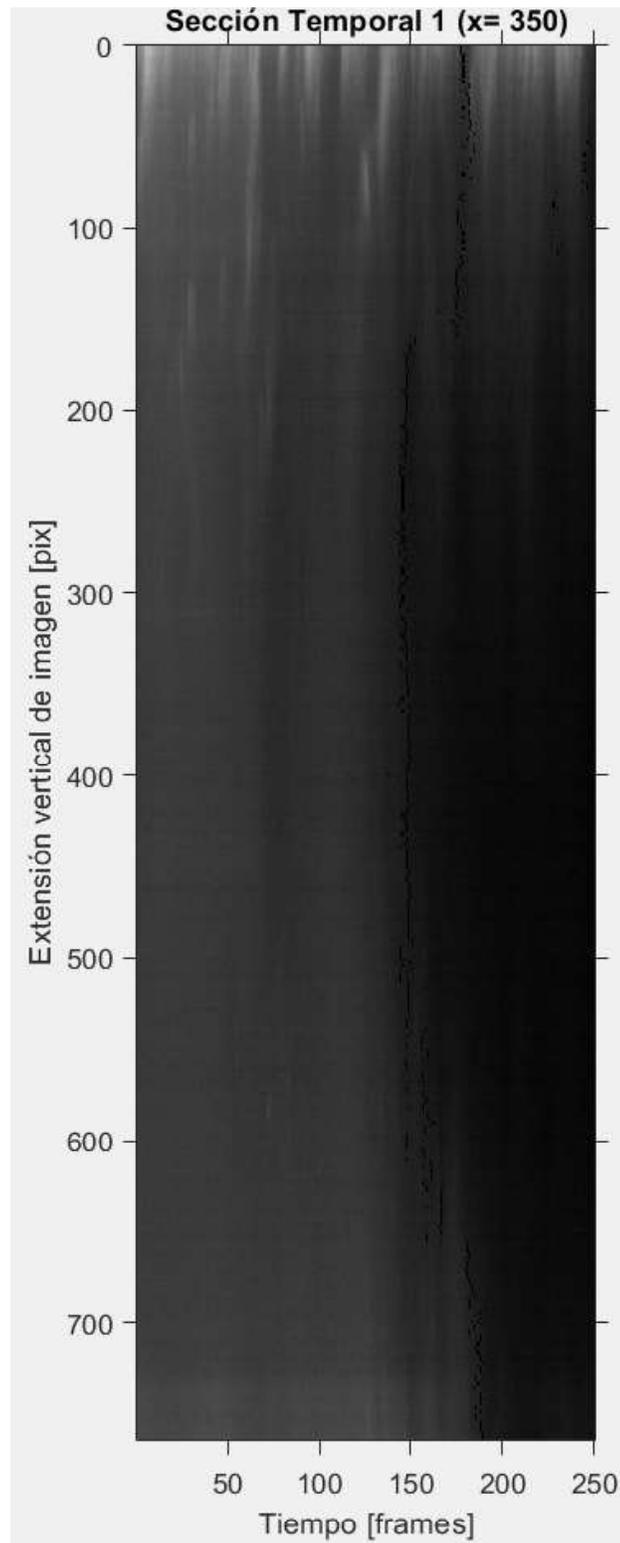
Tabla 4.16 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-03

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 250 | 249 | 0.498 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 110 | 872 | 762 | 89.92 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 350 | 600 | 250 | 29.5 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

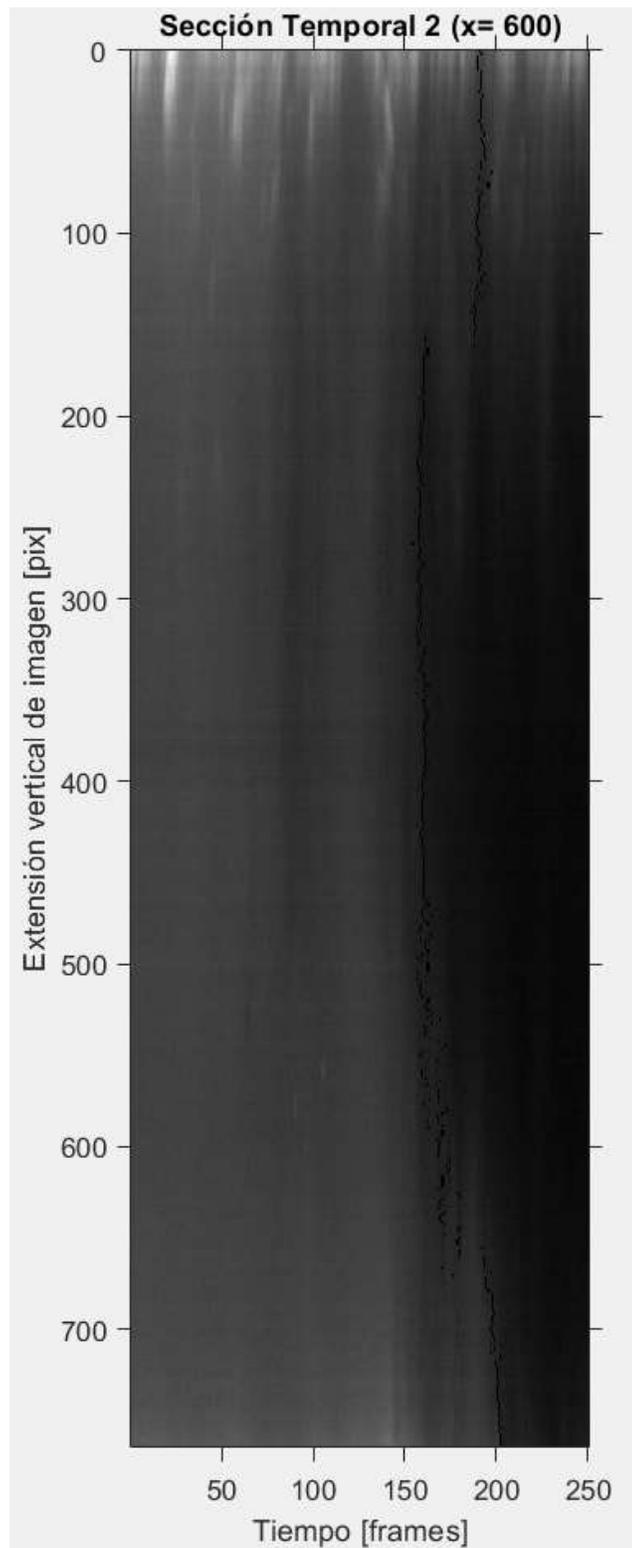
En la figura 4.10 y la figura 4.11 se presentan las secciones temporales obtenidas para el análisis de velocimetría del video 4 de la prueba P-03. La sección 1 está ubicada en la coordenada longitudinal $x=350$ de las imágenes grabadas y la sección 2 está ubicada en la coordenada $x=600$, la distancia longitudinal entre las cuales que define la variable $\Delta x=250$ píxeles lo que equivale a 29.5 mm. El eje horizontal de las secciones temporales es el tiempo de la lectura (249 frames o 0.498 segundos) del video entre el valor de t_0 y t_f (1 frame y 250 frames respectivamente). Ambas secciones temporales tienen como extensión vertical 762 píx, lo que equivale a 89.92 mm según los valores de Y_{sup} y Y_{inf} (110 píx y 872 píx respectivamente). Como mencionado en la sección 3.6.3 los puntos negros presentes en las secciones temporales de este método de análisis son la representación del primer instante de reconocimiento de la presencia del trazador químico en cada coordenada vertical de las secciones.

Figura 4.10 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

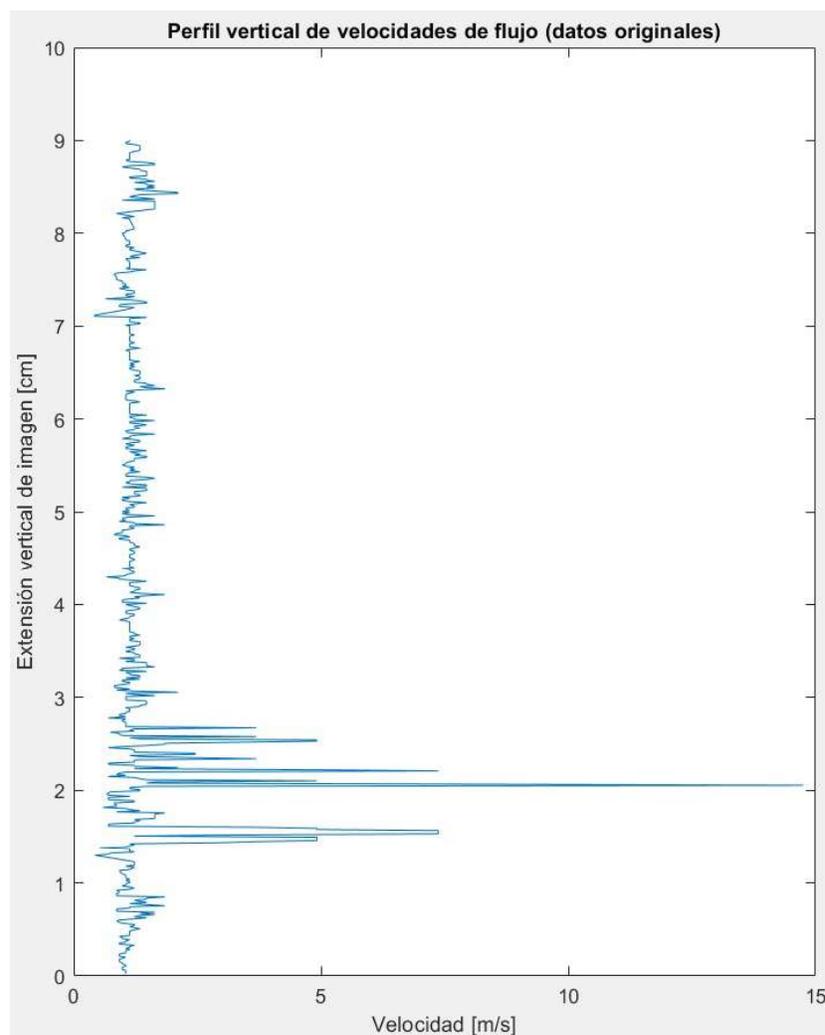
Figura 4.11 Sección Temporal 2 del Video 4 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

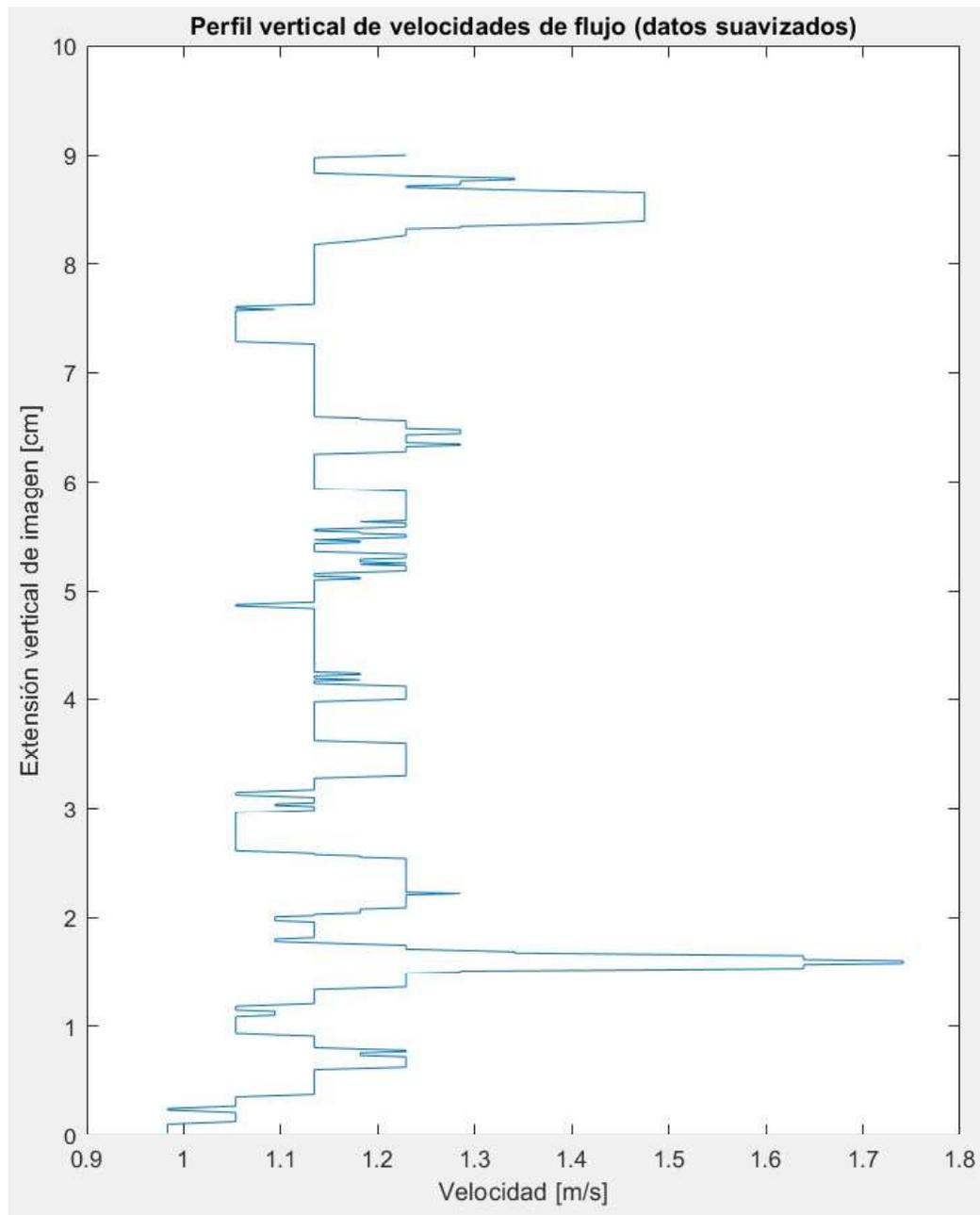
Las gráficas en la figura 4.12 y la figura 4.13 representan la distribución vertical (a lo largo de la extensión vertical de lectura) de velocidades horizontales del permanganato de potasio en el flujo observado. La primera imagen ilustra los datos obtenidos previamente al filtrado de datos y la siguiente los resultados posteriores a ello. En estas representaciones gráficas, la conversión de unidades temporales y longitudinales ya fue realizada (de píxeles/frame a m/s en el eje horizontal y de píxeles a cm en el eje vertical) para facilitar la interpretación de los resultados.

Figura 4.12 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.13 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

La siguiente tabla presenta los valores de velocidad media del flujo obtenidas mediante el análisis de velocimetría previamente y posteriormente al filtrado de datos y adicionalmente se indica el tamaño del periodo del filtro utilizado para tratar

los datos preliminares. Según la tabla 4.17, mediante el promediado de todos los valores de velocidad obtenidos en el análisis de velocimetría se obtuvo que la velocidad media preliminar del flujo es igual a 1.311 m/s. Luego de la operación de filtrado por mediana móvil utilizando un periodo de 30 datos se obtuvo una reducción de los picos divergentes de valores de velocidad y se obtuvo finalmente una velocidad media filtrada de 1.1703 m/s.

Tabla 4.17 *Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-03*

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.311 | 30 | 1.1703 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Los demás videos grabados y analizados para la prueba P-03 luego de la aplicación del filtro de mediana móvil tuvieron valores de velocidad media de flujo similares al presentado por el video 4, como se puede observar en la tabla 4.18. En la misma tabla se presenta el valor de la desviación estándar de los resultados obtenidos de velocidades medias filtradas de la prueba P-03 para que se analice la variación entre ellos. Igualmente se presenta el promedio de dichos resultados para que este valor sea comparado con los resultados de las actividades de validación del método.

Tabla 4.18 *Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-03 por Visualización*

| Video | Velocidad suavizada de video [m/s] |
|----------------|------------------------------------|
| 1 | 1.1613 |
| 2 | 1.1299 |
| 3 | 1.1637 |
| 4 | 1.1703 |
| Promedio [m/s] | Desv. Estándar [%] |
| 1.1563 | 1.56 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Para observar el procesamiento y los resultados de dicho análisis de los otros videos de la prueba P-03 de manera más detallada, ver los Anexos en la sección 6.5.3 y para una interpretación del conjunto de resultados de las pruebas en comparación con los métodos de validación, ver la sección 4.2.3.

4.4.4 P-04 (Video 1)

En la tabla 4.19, se presentan los datos de entrada necesarios para la aplicación de la rutina de análisis de velocimetría del video 1 de la prueba P-04. Las variables “to” y “tf” definen la porción de la duración del video leída por la rutina (en “frames”), las variables “Ysup” y “Yinf” definen la extensión vertical de las imágenes leídas por la rutina (en píxeles) y las variables “secc_x1” y “secc_x2” corresponden a las ubicaciones longitudinales de las secciones temporales.

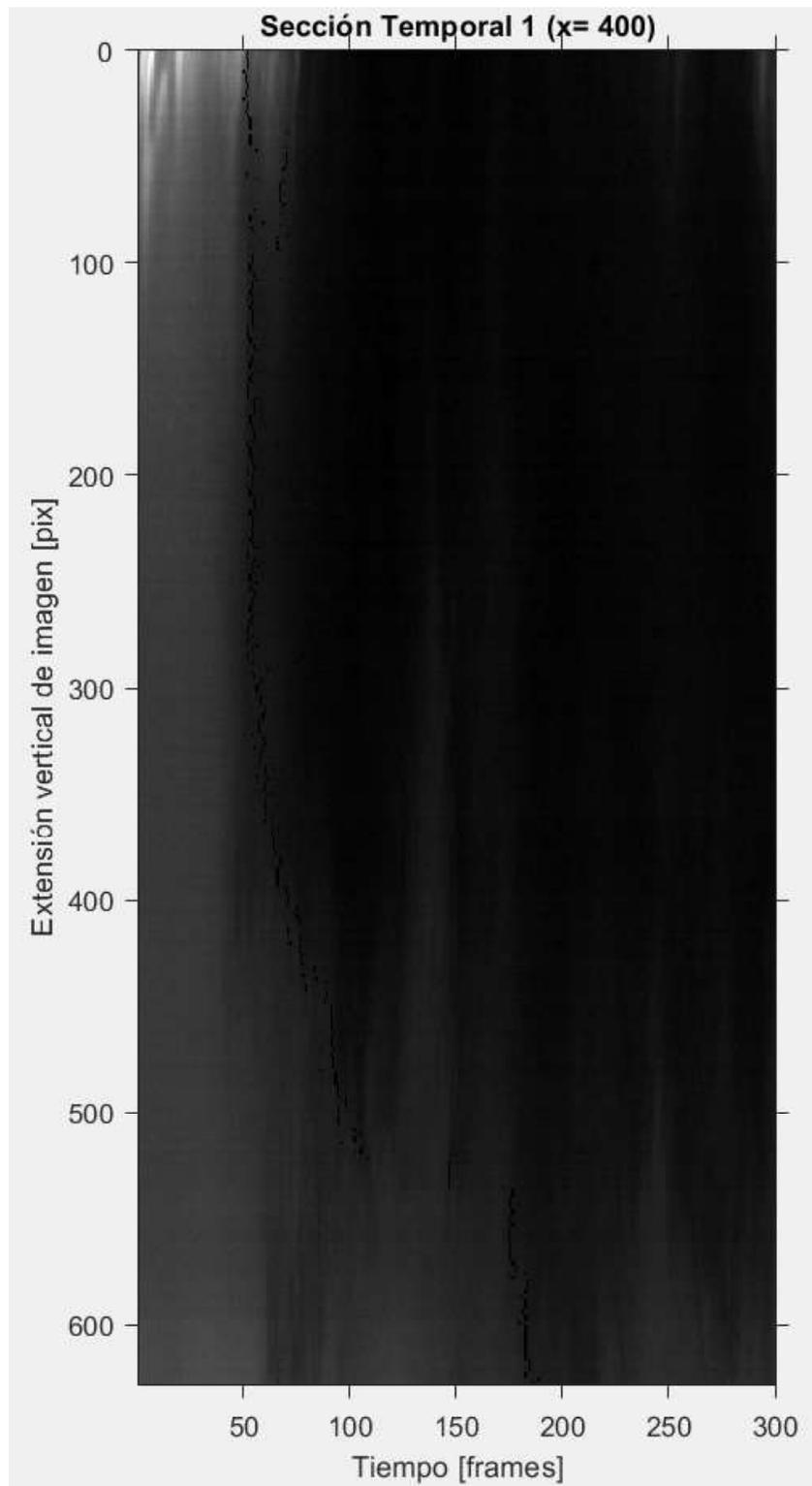
Tabla 4.19 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-04

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 300 | 299 | 0.299 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 154 | 780 | 626 | 67.921 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 400 | 6550 | 150 | 16.275 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

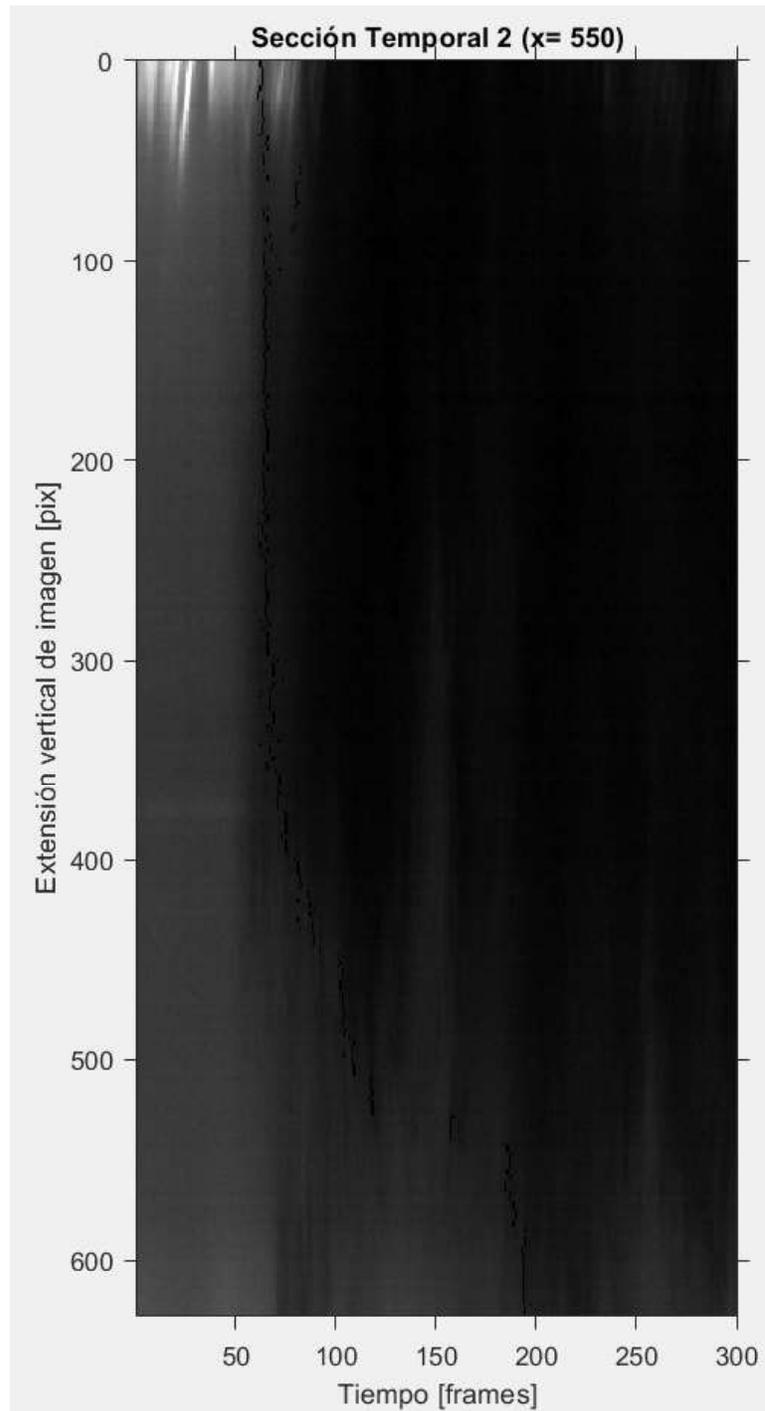
En la figura 4.14 y la figura 4.15 se presentan las secciones temporales obtenidas para el análisis de velocimetría del video 1 de la prueba P-04. La sección 1 está ubicada en la coordenada longitudinal $x=400$ de las imágenes grabadas y la sección 2 está ubicada en la coordenada $x=550$, la distancia longitudinal entre las cuales que define la variable $\Delta x=150$ píxeles lo que equivale a 16.275 mm. El eje horizontal de las secciones temporales es el tiempo de la lectura (299 frames o 0.299 segundos) del video entre el valor de t_0 y t_f (1 frame y 300 frames respectivamente). Ambas secciones temporales tienen como extensión vertical 626 píx, lo que equivale a 67.921 mm según los valores de Y_{sup} y Y_{inf} (154 píx y 780 píx respectivamente). Como mencionado en la sección 3.6.3 los puntos negros presentes en las secciones temporales de este método de análisis son la representación del primer instante de reconocimiento de la presencia del trazador químico en cada coordenada vertical de las secciones.

Figura 4.14 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

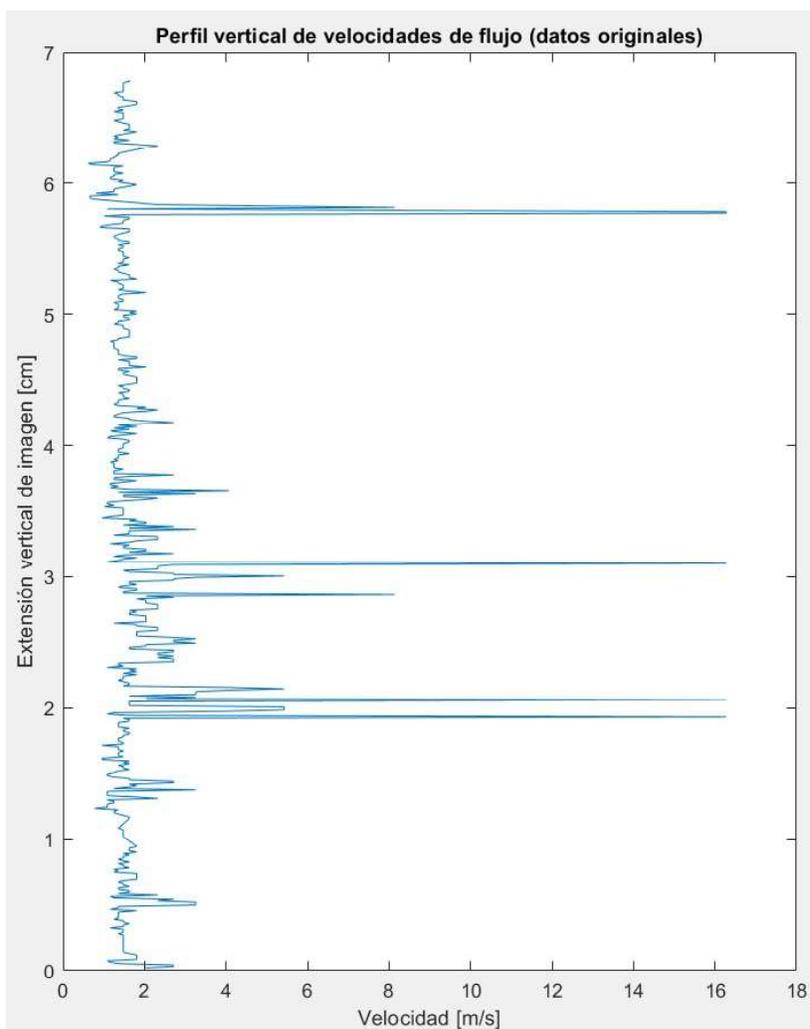
Figura 4.15 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

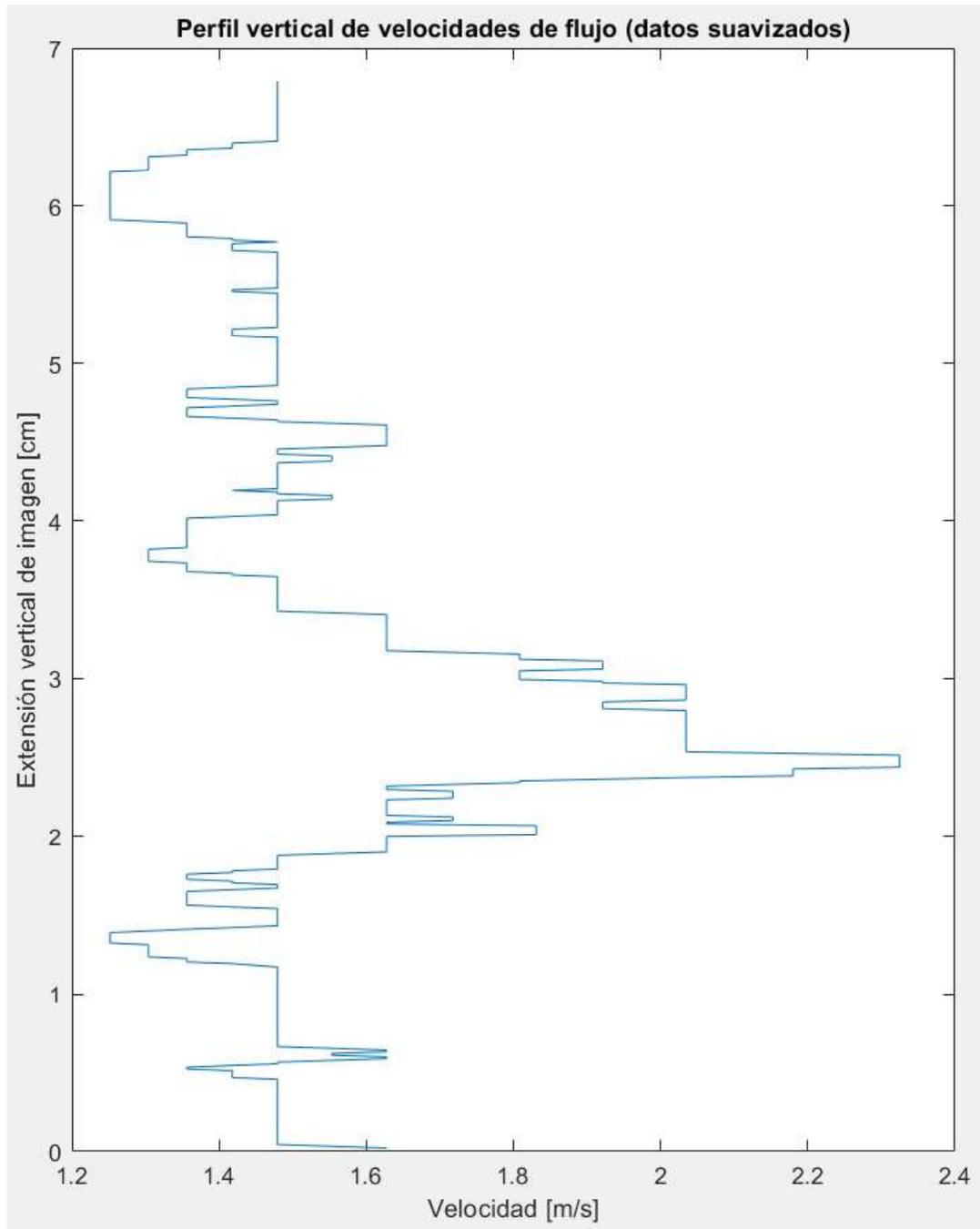
Las gráficas en la figura 4.16 y la figura 4.17 representan la distribución vertical (a lo largo de la extensión vertical de lectura) de velocidades horizontales del permanganato de potasio en el flujo observado. La primera imagen ilustra los datos obtenidos previamente al filtrado de datos y la siguiente los resultados posteriores a ello. En estas representaciones gráficas, la conversión de unidades temporales y longitudinales ya fue realizada (de píxeles/frame a m/s en el eje horizontal y de píxeles a cm en el eje vertical) para facilitar la interpretación de los resultados.

Figura 4.16 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.17 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

La siguiente tabla presenta los valores de velocidad media del flujo obtenidas mediante el análisis de velocimetría previamente y posteriormente al filtrado de

datos y adicionalmente se indica el tamaño del periodo del filtro utilizado para tratar los datos preliminares. Según la tabla 4.20, mediante el promediado de todos los valores de velocidad obtenidos en el análisis de velocimetría se obtuvo que la velocidad media preliminar del flujo es igual a 1.8021 m/s. Luego de la operación de filtrado por mediana móvil utilizando un periodo de 28 datos se obtuvo una reducción de los picos divergentes de valores de velocidad y se obtuvo finalmente una velocidad media filtrada de 1.5392 m/s.

Tabla 4.20 *Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-04*

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.8021 | 28 | 1.5392 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Los demás videos grabados y analizados para la prueba P-04 luego de la aplicación del filtro de mediana móvil tuvieron valores de velocidad media de flujo similares al presentado por el video 1, como se puede observar en la tabla 4.21. En la misma tabla se presenta el valor de la desviación estándar de los resultados obtenidos de velocidades medias filtradas de la prueba P-04 para que se analice la variación entre ellos. Igualmente se presenta el promedio de dichos resultados para que este valor sea comparado con los resultados de las actividades de validación del método.

Tabla 4.21 *Análisis de Resultados Finales de la Prueba P-04 por Visualización*

| Video | Velocidad suavizada de video [m/s] |
|----------------|------------------------------------|
| 1 | 1.539 |
| 2 | 1.655 |
| 3 | 1.587 |
| 4 | 1.601 |
| Promedio [m/s] | Desv. Estándar [%] |
| 1.596 | 4.13 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Para observar el procesamiento y los resultados de dicho análisis de los otros videos de la prueba P-04 de manera más detallada, ver los Anexos en la sección 6.5.4 y para una interpretación del conjunto de resultados de las pruebas en comparación con los métodos de validación, ver la sección 4.2.4.

4.5 Resumen e Interpretación de Resultados

Teniendo en cuenta la información presentada en las tablas 4.12, 4.15, 4.18 y 4.21, las desviaciones estándares calculadas entre los resultados de los videos de cada prueba son pequeñas, lo que indica una variabilidad aceptable de los valores del método de visualización propuesto. Sin embargo, se observa que existe una tendencia al aumento de la desviación estándar entre valores obtenidos por distintos videos grabados durante una misma prueba con el aumento de la velocidad del flujo observado. Esta tendencia es probablemente dada debida al aumento del orden de magnitud relativo de los resultados obtenidos a velocidades más altas.

4.6 Medición de Velocidad con Micro Molinete

Para cada sesión de pruebas realizadas con videos de la cámara de alta velocidad Photron Fastcam Mini Ux100, se presenta la serie de datos de velocidades puntuales obtenidas por el micro molinete de marca OTT modelo C2 con fines de validar el método propuesto. Utilizando los valores de velocidades puntuales obtenidos por el micro molinete, se pudo determinar valores de velocidades medias de los flujos ensayados mediante el método de interpolación de valores para obtener la velocidad puntual a 60% del calado del flujo (medido a partir de la superficie libre). Se consideró también la velocidad obtenida por el concepto de continuidad ya que se conoce el caudal total que pasa por el modelo y su área de sección transversal.

Luego de la presentación de los resultados del método intrusivo, estos serán comparados entre sí mediante la obtención de su desviación estándar. Finalmente, los promedios de los resultados obtenidos por tanto el método no intrusivo propuesto y los métodos de validación (uso del micro molinete y velocidad media por continuidad) serán comparados mediante la obtención del porcentaje de error entre ellos.

Figura 4.18 *Micro Molinete OTT C2*



Nota. Recuperado de OTT Hydromet GmbH. (2019). Technical Data OTT C2 (p. 3). p. 3. Recuperado de <https://www.ott.com/products/water-flow-3/ott-c2-385/productAction/outputAsPdf/>.

4.6.1 P-01

4.6.1.1 Datos de micro molinete.

El micro molinete OTT C2 dispone de una serie de hélices de diferentes formatos, diámetros y coeficientes de cálculo para diferentes rangos de velocidad de flujo. En la tabla 4.22 se especifica el número de hélice utilizado para las mediciones realizadas en el flujo de la prueba P-01. Igualmente se presenta la duración de tiempo de cada medición de giros de la hélice (parámetro definido en el contador electrónico del equipo).

Tabla 4.22 *Especificaciones de Uso del Micro Molinete en la Prueba P-01*

| Número de hélice utilizada [#] | Tiempo de medición [s] |
|--------------------------------|------------------------|
| 5 | 15 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

En cada prueba se utilizó el mico molinete OTT C2 para obtener las velocidades de flujo en distintos puntos del calado de los flujos observados. Para el flujo de la

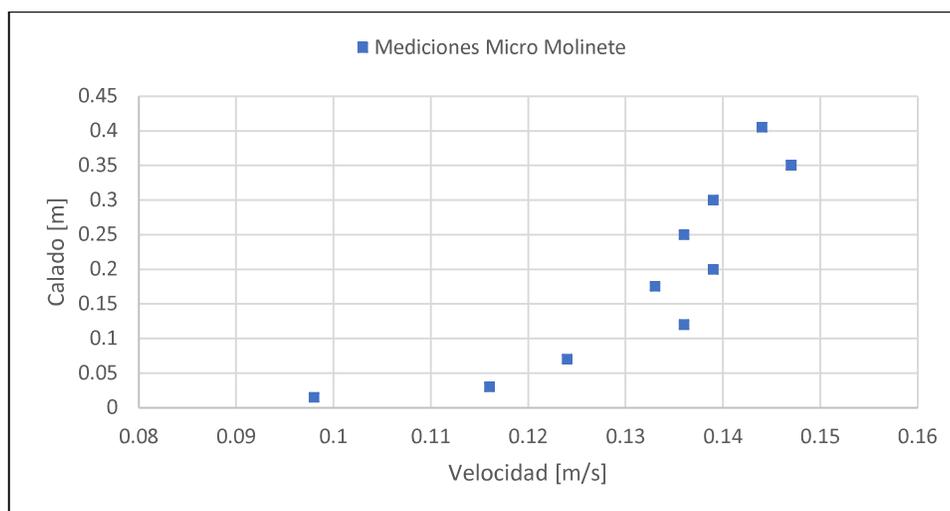
prueba P-01 se midieron 10 valores de velocidades a distintas profundidades a lo largo del calado del flujo. Estas mediciones fueron realizadas en la misma abscisa de canal que el punto de observación utilizado para la grabación de los videos. La tabla 4.23 y la figura 4.19 representan los valores de velocidades obtenidos.

Tabla 4.23 Resultados Experimentales por Micro Molinete para la Prueba P-01

| Medición | Profundidad [m] | Velocidad [m/s] |
|----------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0.015 | 0.098 |
| 2 | 0.030 | 0.116 |
| 3 | 0.070 | 0.124 |
| 4 | 0.120 | 0.136 |
| 5 | 0.175 | 0.133 |
| 6 | 0.200 | 0.139 |
| 7 | 0.250 | 0.136 |
| 8 | 0.300 | 0.139 |
| 9 | 0.350 | 0.147 |
| 10 | 0.405 | 0.144 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.19 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Excel por Terra B. Quito, 2019.

A partir de los datos obtenidos por el micro molinete y por el concepto de continuidad de flujo se pudo obtener 2 distintos valores de velocidad media del flujo para que estos sean comparados con los valores obtenidos por la metodología de visualización y análisis propuesta. La medición de velocidad por el micro molinete realizada en la profundidad correspondiente al 60% del calado medido desde la superficie libre del flujo tiene un valor que es considerado igual a la velocidad media del flujo. El concepto de caudal o continuidad de flujo indica que la velocidad media de un flujo puede ser obtenida mediante la expresión 2.3 ($V = \frac{Q}{A}$). En la tabla 4.24 la cual corresponde a la prueba P-01, se presentan ambos valores descritos en esta sección de velocidad media, la desviación estándar entre ellos y su valor promedio (este valor promedio será comparado con los valores obtenidos por el análisis de los videos grabados en la siguiente sección).

Tabla 4.24 *Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-01*

| Velocidad media por d*60% [m/s] | Velocidad media por continuidad [m/s] | Promedio [m/s] | Desv. estándar [%] |
|------------------------------------|--|-------------------|-----------------------|
| 0.133 | 0.120 | 0.126 | 0.67 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.6.1.2 Comparación de resultados.

Para validar los resultados obtenidos por el método propuesto, en esta sección estos datos serán comparados con los métodos de validación. En la tabla 4.25 se presentan los valores a ser comparados según el flujo observado en la prueba P-01 y el porcentaje de error entre ellos.

Tabla 4.25 Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-01

| Velocidad de validación promedio [m/s] | Velocidad por visualización promedio [m/s] | Porcentaje de error [%] |
|--|--|-------------------------|
| 0.126 | 0.122 | 3.47 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.6.2 P-02

4.6.2.1 Datos de micro molinete.

En la tabla 4.26 se especifica el número de hélice utilizado para las mediciones realizadas en el flujo de la prueba P-02. Igualmente se presenta la duración de tiempo de cada medición de giros de la hélice (parámetro definido en el contador electrónico del equipo).

Tabla 4.26 Especificaciones de Uso de Micro Molinete en la Prueba P-02

| Número de hélice utilizada [#] | Tiempo de medición [s] |
|--------------------------------|------------------------|
| 5 | 20 |

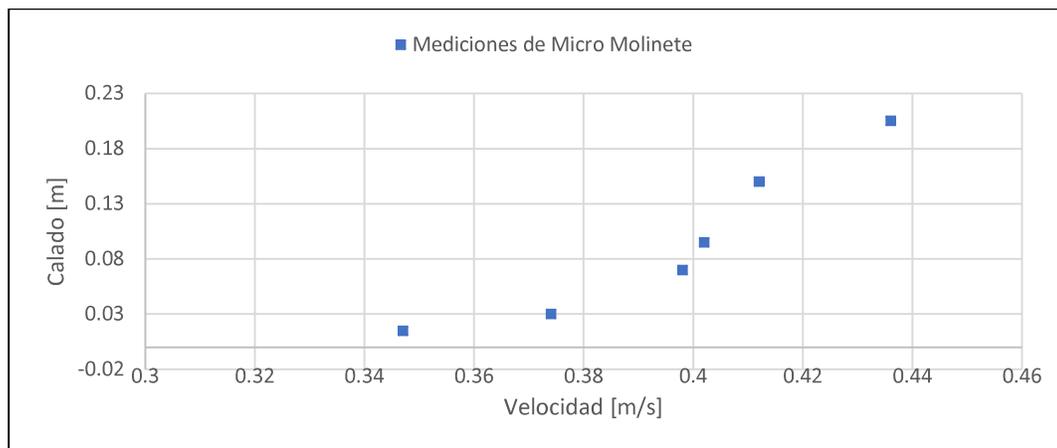
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Para el flujo de la prueba P-02 se midieron 6 valores de velocidades a distintas profundidades a lo largo del calado del flujo. Estas mediciones fueron realizadas en la misma abscisa de canal que el punto de observación utilizado para la grabación de los videos. La tabla 4.27 y la figura 4.20 representan los valores de velocidades obtenidos.

Tabla 4.27 Resultados Experimentales por Micro Molinete para la Prueba P-02

| Medición | Profundidad [m] | Velocidad [m/s] |
|----------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0.015 | 0.347 |
| 2 | 0.03 | 0.374 |
| 3 | 0.07 | 0.398 |
| 4 | 0.095 | 0.402 |
| 5 | 0.15 | 0.412 |
| 6 | 0.205 | 0.436 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.20 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-02

Nota. Captura de pantalla recuperada de Excel por Terra B. Quito, 2019.

En la tabla 4.28, la cual corresponde a la prueba P-02, se presentan ambos valores descritos en esta sección de velocidad media, la desviación estándar entre ellos y su valor promedio (este valor promedio será comparado con los valores obtenidos por el análisis de los videos grabados en la siguiente sección).

Tabla 4.28 Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-02

| Velocidad media por d*60% [m/s] | Velocidad media por continuidad [m/s] | Promedio [m/s] | Desv. Estándar [%] |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------|
| 0.402 | 0.405 | 0.403 | 0.133 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.6.2.2 Comparación de resultados

Para validar los resultados obtenidos por el método propuesto, en esta sección estos datos serán comparados con los métodos de validación. En la tabla 4.29 se presentan los valores a ser comparados según el flujo observado en la prueba P-02 y el porcentaje de error entre ellos.

Tabla 4.29 Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-02

| Velocidad de validación promedio [m/s] | Velocidad por visualización promedio [m/s] | Porcentaje de error [%] |
|--|--|-------------------------|
| 0.403 | 0.386 | 4.28 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.6.3 P-03

4.6.3.1 Datos de micro molinete.

En la tabla 4.30 se especifica el número de hélice utilizado para las mediciones realizadas en el flujo de la prueba P-03. Igualmente se presenta la duración de tiempo de cada medición de giros de la hélice (parámetro definido en el contador electrónico del equipo).

Tabla 4.30 Especificaciones de Uso del Micro Molinete en la Prueba P-03

| Número de hélice utilizada [#] | Tiempo de medición [s] |
|--------------------------------|------------------------|
| 3 | 20 |

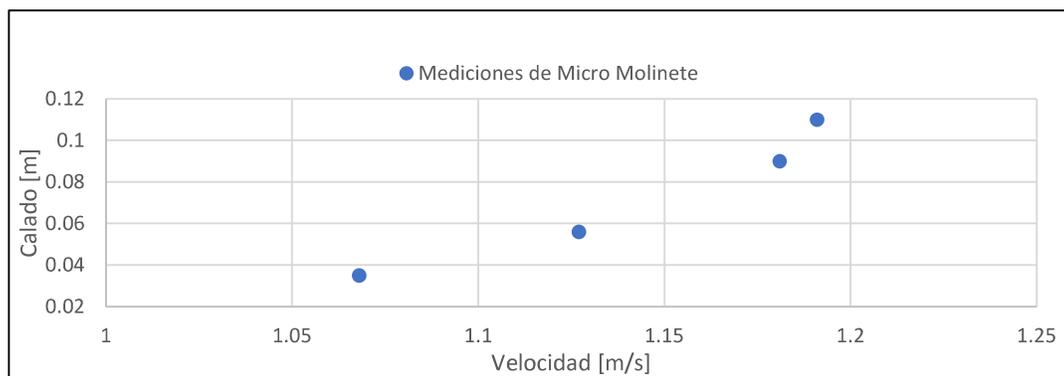
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Para el flujo de la prueba P-03 se midieron 4 valores de velocidades a distintas profundidades a lo largo del calado del flujo. Estas mediciones fueron realizadas en la misma abscisa de canal que el punto de observación utilizado para la grabación de los videos. La tabla 4.31 y la figura 4.21 representan los valores de velocidades obtenidos.

Tabla 4.31 Resultados Experimentales por Micro Molinete para la Prueba P-03

| Medición | Profundidad [m] | Velocidad [m/s] |
|----------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0.035 | 1.068 |
| 2 | 0.056 | 1.127 |
| 3 | 0.09 | 1.181 |
| 4 | 0.11 | 1.191 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.21 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-03

Nota. Captura de pantalla recuperada de Excel por Terra B. Quito, 2019.

En la tabla 4.32, la cual corresponde a la prueba P-03, se presentan ambos valores descritos en esta sección de velocidad media, la desviación estándar entre ellos y su valor promedio (este valor promedio será comparado con los valores obtenidos por el análisis de los videos grabados en la siguiente sección).

Tabla 4.32 Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-03

| Velocidad media por d*60% [m/s] | Velocidad media por continuidad [m/s] | Promedio [m/s] | Desv. Estándar [%] |
|---------------------------------|---------------------------------------|----------------|--------------------|
| 1.127 | 1.219 | 1.173 | 4.6 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.6.3.2 Comparación de resultados

Para validar los resultados obtenidos por el método propuesto, en esta sección estos datos serán comparados con los métodos de validación. En la tabla 4.33 se

presentan los valores a ser comparados según el flujo observado en la prueba P-03 y el porcentaje de error entre ellos.

Tabla 4.33 *Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-03*

| Velocidad de validación promedio [m/s] | Velocidad por visualización promedio [m/s] | Porcentaje de error [%] |
|--|--|-------------------------|
| 1.173 | 1.156 | 1.42 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.6.4 P-04

4.6.4.1 Datos de micro molinete.

En la tabla 4.34 se especifica el número de hélice utilizado para las mediciones realizadas en el flujo de la prueba P-04. Igualmente se presenta la duración de tiempo de cada medición de giros de la hélice (parámetro definido en el contador electrónico del equipo).

Tabla 4.34 *Especificaciones de Uso del Micro Molinete en la Prueba P-04*

| Número de hélice utilizada [#] | Tiempo de medición [s] |
|--------------------------------|------------------------|
| 3 | 20 |

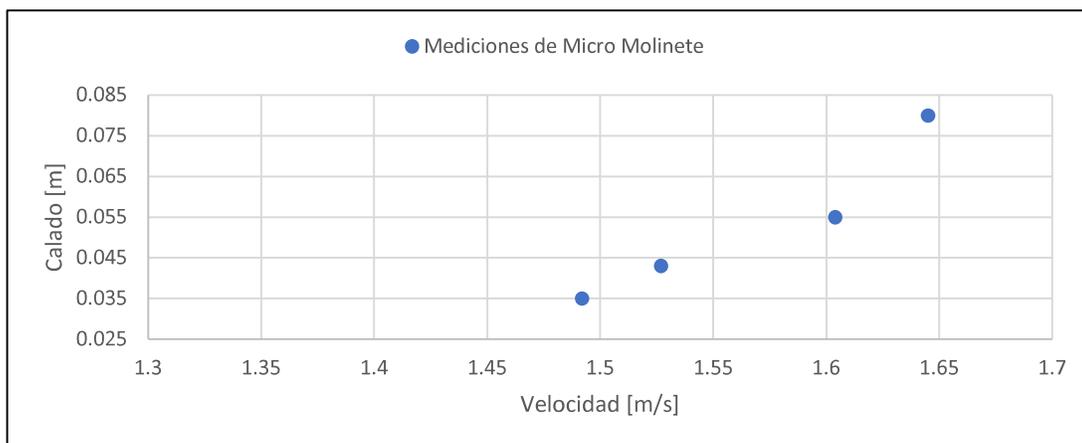
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

En cada prueba se utilizó el mico molinete OTT C2 para obtener las velocidades de flujo en distintos puntos del calado de los flujos observados. Para el flujo de la prueba P-04 se midieron 4 valores de velocidades a distintas profundidades a lo largo del calado del flujo. Estas mediciones fueron realizadas en la misma abscisa de canal que el punto de observación utilizado para la grabación de los videos. La tabla 4.35 y la figura 4.22 representan los valores de velocidades obtenidos.

Tabla 4.35 Resultados Experimentales por Micro Molinete Para la Prueba P-04

| Medición | Profundidad [m] | Velocidad [m/s] |
|----------|-----------------|-----------------|
| 1 | 0.035 | 1.492 |
| 2 | 0.043 | 1.527 |
| 3 | 0.055 | 1.604 |
| 4 | 0.08 | 1.645 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 4.22 Gráfica de Resultados Experimentales de Validación para la Prueba P-04

Nota. Captura de pantalla recuperada de Excel por Terra B. Quito, 2019.

En la tabla 4.36, la cual corresponde a la prueba P-04, se presentan ambos valores descritos en esta sección de velocidad media, la desviación estándar entre ellos y su valor promedio (este valor promedio será comparado con los valores obtenidos por el análisis de los videos grabados en la siguiente sección).

Tabla 4.36 Velocidades Medias por Validación de la Prueba P-04

| Velocidad media por d*60% [m/s] | Velocidad media por continuidad [m/s] | Promedio [m/s] | Desv. Estándar [%] |
|------------------------------------|--|-------------------|-----------------------|
| 1.527 | 1.582 | 1.555 | 2.77 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.6.4.2 Comparación de resultados.

Para validar los resultados obtenidos por el método propuesto, en esta sección estos datos serán comparados con los métodos de validación. En la tabla 4.37 se presentan los valores a ser comparados según el flujo observado en la prueba P-04 y el porcentaje de error entre ellos.

Tabla 4.37 Comparación de Resultados de Validación y Visualización para la Prueba P-04

| Velocidad de validación promedio [m/s] | Velocidad por visualización promedio [m/s] | Porcentaje de error [%] |
|--|--|-------------------------|
| 1.555 | 1.596 | 2.63 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.7 Resumen e Interpretación de Análisis Comparativo

En todas las pruebas realizadas, los porcentajes de error entre los valores obtenidos por el método no intrusivo propuesto y las metodologías de validación se mantuvieron aceptablemente pequeños (menores al 5% de error).

4.8 Clasificación de los Flujos de las Pruebas

Gracias a la medición de las velocidades medias de los flujos observados, ahora es posible caracterizar los flujos de cada prueba mediante la obtención del número adimensional según Froude y el número adimensional según Reynolds.

Tabla 4.38 Números de Froude y Reynolds de Flujos de las Pruebas

| Prueba | Número de Reynolds | Nivel de turbulencia | Número de Froude | Régimen |
|--------|--------------------|----------------------|------------------|--------------|
| P-01 | $6.39 \cdot 10^4$ | Turbulento | 0.062 | Subcrítico |
| P-02 | $1.06 \cdot 10^5$ | Turbulento | 0.262 | Subcrítico |
| P-03 | $1.83 \cdot 10^5$ | Turbulento | 0.983 | Crítico |
| P-04 | $1.93 \cdot 10^5$ | Turbulento | 1.55 | Supercrítico |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

La prueba P-03 tiene un número adimensional según Froude muy cercano a 1, entonces se considera que este flujo es crítico.

Gracias a esta tabla se puede ver que la metodología de velocimetría mediante visualización de flujos propuesta en esta investigación fue probada en un rango amplio de condiciones de flujo según los regímenes calculados (2 flujos subcríticos, un flujo crítico y un flujo supercrítico) y según las velocidades de los flujos observados (4 pruebas entre 0.12 m/s y 1.6 m/s aproximadamente).

4.9 Manual Práctico de Use de la Cámara de Alta Velocidad y Procesamiento de Velocimetría en Matlab

Se presenta a continuación un manual con las actividades necesarias para la realización del ensayo de velocimetría de flujo mediante el uso de la cámara de alta velocidad Photron Fastcam Mini Ux100 con análisis matricial en Matlab.

4.9.1 Lista de Componentes Necesarios

Se deben disponer de los siguientes ítems para poder realizar el ensayo de velocimetría de flujo con ayuda de la cámara de alta velocidad Photron Fastcam Mini Ux100.

Tabla 4.39 Lista de Componentes Necesarios para la Prueba Visual de Velocimetría

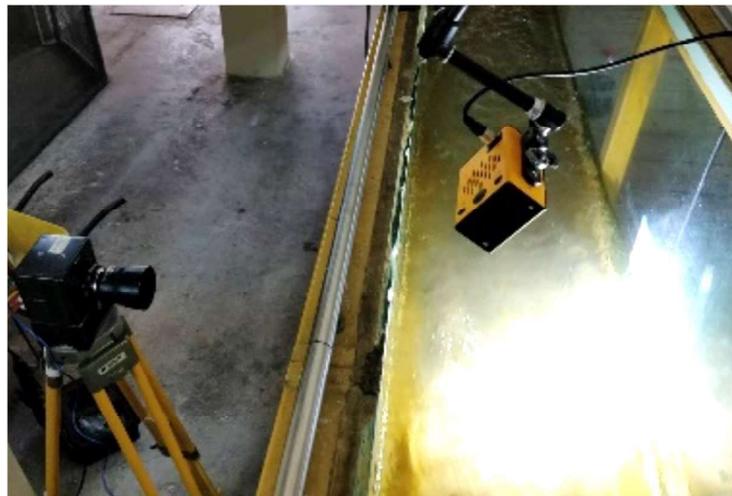
| | | |
|--|---|--|
| <p>Cuerpo de la cámara (sin lente)</p>  | <p>Fuente de poder AC</p>  | <p>Cable AC</p>  |
| <p>Lente (Nikkor AF-S 50 mm f/1.8G) y Capucha de lente</p>  | <p>Cable de extensión DC de 2m</p>  | <p>Cable LAN (Ethernet)</p>  |
| <p>Trípode (con perno propio)</p>  | <p>Pernos (4x1/4-20UNC) y Pieza adaptadora trípode ↔ cámara</p>  | <p>Computadora portátil con entrada tipo ethernet, programa PFV instalado, mouse y cable de potencia</p>  |
| <p>Brazo mecánico de soporte de iluminación</p>  | <p>Iluminación LED con cable de potencia</p>  | <p>Dispositivo inyector de trazador químico</p>  |
| <p>4 jeringas de 20 ml y solución de permanganato de potasio</p>  | | |

Nota. Imágenes recuperadas de Photron. (2013). FASTCAM Mini UX100 Hardware Manual. Tokyo, Japan y fotografías por Terra, B. Quito, 2019.

4.9.2 Ubicación en Canal

Se debe seleccionar el punto en el canal donde de presente el patrón de flujo que se desea medir y exista visibilidad clara del flujo respecto al posicionamiento de la cámara de alta velocidad.

Figura 4.23 *Ubicación en Canal*



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.2.1 Posicionamiento de Inyector.

Se debe escoger un punto de observación de flujo que permita el posicionamiento del dispositivo inyector de permanganato de potasio entre 0.5 m y 2 m de distancia aguas arriba de la ubicación de la cámara. Naturalmente la ubicación del dispositivo inyector debe permitir su operación.

Figura 4.24 *Ubicación de Inyector de Trazador Químico*



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.2.2 Fondo Reflector.

Para redireccionar la luz de manera que se puedan registrar datos relevantes para el análisis de velocimetría, se requiere instalar un fondo reflector (hojas de papel blanco) en el lado opuesto de la cámara de alta velocidad.

Figura 4.25 *Fondo Reflector*



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.2.2.1 Posicionar Cámara.

La posición de la cámara de alta velocidad respecto al modelo observado debe ser muy cuidadosamente impuesta ya que esto tiene gran influencia en las imágenes registradas.

4.9.2.2.2 Soporte de Cámara.

Se debe posicionar el trípode que soportará a la cámara en una superficie o plataforma muy estable y que permita pequeños ajustes de la cámara para corregir su perspectiva.

Figura 4.26 *Soporte de Cámara*



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.2.2.3 Orientación Ortogonal y Nivelación.

Es importante instalar la cámara de manera que su plano de visualización sea paralelo al plano de la pared del modelo observado para evitar la distorsión de las imágenes grabadas. Por la misma lógica del posicionamiento ortogonal de la cámara, es importante la nivelación horizontal de este equipo.

Figura 4.27 Nivelación de Cámara

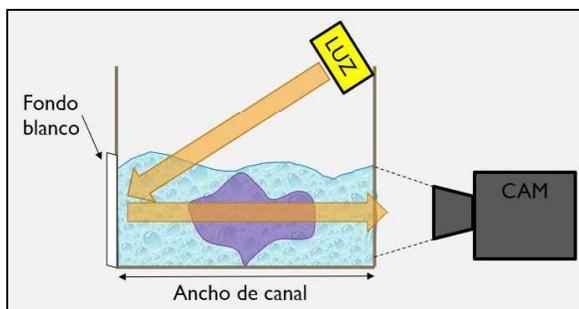


Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.2.3 Posicionar Iluminación.

Se debe fijar el brazo mecánico al canal y conectar la iluminación al brazo de manera que no se den movimientos imprevistos de estos elementos. Posicionar el brazo de tal manera que la iluminación esta direccionada hacia el fondo reflector relativamente cerca de la superficie libre del agua sin permitir que se moje cualquier parte del equipo. Ajustar la posición y orientación de la iluminación con ayuda de la pantalla de la computadora para maximizar la claridad de las imágenes capturadas por la cámara de alta velocidad.

Figura 4.28 Posicionamiento de Iluminación con Respecto a la Cámara



Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

4.9.3 Conexión de Cámara

Para poder visualizar el campo de vista de la cámara rápida y poder registrar imágenes, se debe conectarla a una computadora con el programa PFV. En primer lugar, se debe conectar el cable tipo Ethernet entre la computadora y la cámara de alta velocidad. Luego, conectar los cables de potencia de la cámara y de la computadora.

Figura 4.29 Cámara Conectada a Computadora Mediante PFV



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.3.1 Computadora y Cámara.

En seguida se debe prender la computadora con el programa PFV previamente instalado. Luego, accionar la cámara con el botón en la parte de atrás del cuerpo del equipo.

4.9.3.2 Abrir Programa PFV.

Con ambos equipos prendidos y conectados se debe abrir el programa PFV para permitir su funcionamiento conjunto.

4.9.3.3 Configurar IP de Conexión.

Debido a la funcionalidad de transferencia de grandes cantidades de datos entre la cámara y la computadora mediante el cable tipo Ethernet, la conexión entre la cámara Photron y la computadora utilizada requiere que la computadora tenga un número de IP específico durante su utilización. Mediante la herramienta “Network Setup Assistant Tool” del programa PFV se debe modificar el IP de la computadora a “192.168.0.1” y la máscara de subred “255.255.255.0”.

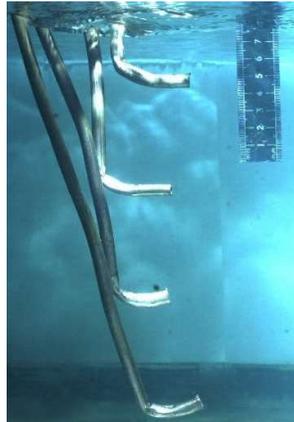
4.9.4 Ajuste de Variables de Grabación

Para optimizar la calidad de las imágenes registradas por la cámara de alta velocidad se deben ajustar algunos parámetros del propio equipo y su software de control.

4.9.4.1 Enfoque.

Utilizando algún objeto (regla, los tubos del dispositivo de inyección del trazador químico, etc.) introducido al flujo en el centro del canal en el punto de observación, se debe enfocar la lente de la cámara de alta velocidad hasta que la imagen del objeto se vea nítida.

Figura 4.30 Operación de Enfoque de Cámara



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.4.2 “Framerate”.

Considerando la velocidad de traslado del trazador químico y la capacidad de procesamiento de la computadora que realizará el análisis de velocimetría, se debe escoger un valor de “framerate” apropiado para el flujo medido. Variar este valor experimentalmente según el rendimiento del equipo computacional para realizar el análisis de velocimetría.

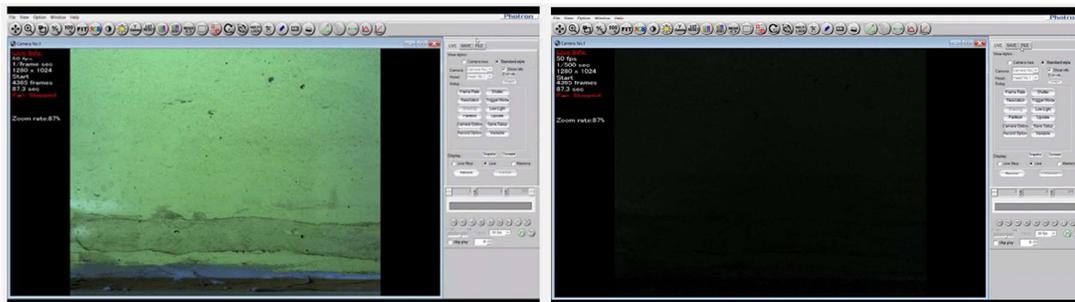
4.9.4.3 Resolución.

Imponer el nivel de resolución máxima posible según el “framerate” escogido para tener el máximo nivel de detalle de imagen.

4.9.4.4 “Shutter Speed”.

Imponer un valor de “shutter speed” apropiado para la calidad de imagen. No oscurecer la imagen demasiado para impedir la visualización del contraste de colores del trazador. Como un criterio adicional se debe considerar que, con un flujo rápido, es preferible imponer un “shutter speed” pequeño para evitar registrar imágenes borrosas.

Figura 4.31 *Diferentes Tiempos de Apertura de Diafragma o “Shutter Speed”*



Nota. Capturas de pantalla recuperada de Photron Fastcam Viewer por Terra B. Quito, 2019.

4.9.4.5 Apertura de Lente.

Ajustar la apertura de la lente de tal manera que no se oscurezca demasiado la imagen. Se debe considerar que, si la apertura está muy abierta, el campo de profundidad del enfoque se limita y esto puede resultar en imágenes borrosas.

Figura 4.32 *Diferentes Diámetros de Apertura de Lente*

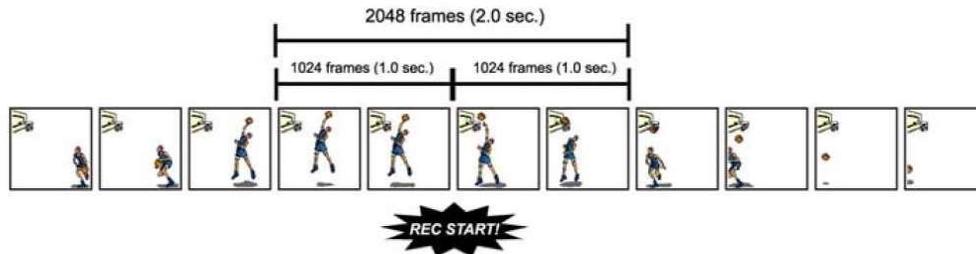


Nota. Capturas de pantalla recuperada de Photron Fastcam Viewer por Terra B. Quito, 2019.

4.9.4.6 “Trigger Mode”.

Para reducir el error humano en el momento de empezar la grabación del ensayo, se recomienda escoger el modo de disparo (trigger mode) “center” ya que así se registrarán imágenes momentos antes y momentos después del instante del disparo de la cámara.

Figura 4.33 Gráfica Explicativa de Modo de Disparo Central

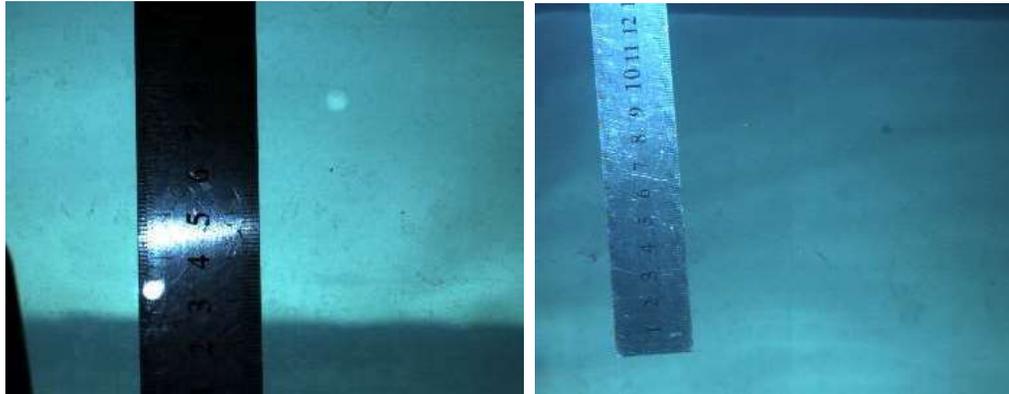


Nota. Recuperado de Photron. (2013). FASTCAM Mini UX100 Hardware Manual. Tokyo, Japan.

4.9.4.7 Referencia Espacial.

Para correlacionar las distancias visualizadas en las imágenes (en píxeles) a distancias físicas reales (en mm), se debe usar la función del PFV “Display Scale”. Luego de introducir una regla en el centro del flujo en el punto de observación, imponer dos puntos en la pantalla medibles por la regla y obtener un factor de conversión dimensional (si necesario utilizar la función “zoom” para realizar esta operación más precisamente). Considerando los efectos de expansión volumétrica de la mancha se debe repetir la operación de referencia dimensional con la regla en contacto con la pared del modelo más cerca de la cámara (reajustar el enfoque de la lente según necesario y retornar el enfoque al centro del modelo antes de realizar el ensayo). Guardar ambos valores de factor de conversión de unidades.

Figura 4.34 Definición de Referencia Espacial (Regla Cerca de la Cámara y Regla en el Centro del Canal)



Nota. Fotografía por Terra B. Quito, 2019.

4.9.5 Preparar Inyector de Trazador

4.9.5.1 Posicionar Aparato de Inyección.

Luego de realizar las operaciones de enfoque y referencia espacial se debe posicionar el aparato de inyección en el centro del modelo y distanciarle del punto de observación apropiadamente para realizar el ensayo. Esta distancia varía según la velocidad del flujo observado y debe ser ajustada manualmente: si el aparato está muy cerca, la velocidad de traslado del trazador será equivalente a la velocidad en la cual salió del tubo de inyección (y no del flujo observado), si está muy lejos, el trazador estará muy disuelto en el agua como para presentar un contraste de colores instantáneo.

4.9.5.2 Posicionar Tubos de Inyección.

En planta, los tubos de inyección deben siempre seguir el eje central del modelo observado. Dependiendo del calado del flujo presente, se deberán ubicar los tubos verticalmente de manera que estos estén equidistantes entre sí y centrados entre el fondo del modelo y la superficie libre del agua. Si el calado es mucho mayor que

la extensión vertical de las imágenes registradas, priorizar que el permanganato inyectado pueda ser visto por la cámara. Si el calado es mucho menor que la extensión vertical, no utilizar todas las jeringas del aparato de inyección. Llenar las jeringas que serán usadas a su máxima capacidad de permanganato de potasio (20 ml).

4.9.6 Realización de Prueba Experimental

4.9.6.1 Inyección de Trazador.

Para que se presente una mancha de trazador químico uniforme y concentrada en el campo de visión de la cámara rápida, se debe presionar todas las jeringas del aparato de inyección de manera rápida y simultánea con la ayuda de una tabla pequeña. Se debe evitar desplazar el aparato durante esta etapa.

4.9.6.2 Disparo de Cámara.

El momento en que la mancha de trazador químico este directamente frente a la cámara de alta velocidad debe ser el instante del inicio de la grabación. Cuando se aplasta el botón "Record" por la primera vez en un ensayo, su texto se convierte en "Trigger In" y su color cambia a amarillo. Si se aplasta una vez más el mismo botón, su nombre se convierte en "Endless Rec" y su color en verde. Para efectivamente empezar la grabación de un video, se debe aplastar el mismo botón más una vez para que este se convierta en "Recording" y tenga un color tomate. Se recomienda aplastar este botón 2 veces previamente a la inyección del trazador para que el momento del inicio del video requiera solamente un aplastar del botón en el instante deseado.

4.9.6.3 Cortar Video.

Luego de la grabación del video, se puede delimitar su punto de inicio y de fin en el programa PFV para eliminar porciones del video anteriores y posteriores a la visualización del trazador químico.

4.9.6.4 Guardar Archivo.

Guardar el video registrado en formato “.mraw” utilizando una nomenclatura conveniente para su archivo.

4.9.7 Rutina de Programación

Para realizar el análisis de velocimetría del flujo con los videos grabados por la cámara de alta velocidad, se debe abrir el programa Matlab y tener en su carpeta actual 3 rutinas:

- La rutina principal de análisis de velocidades por reconocimiento del trazador químico “Rutina_Principal_Velocimetria.m”
- La rutina paralela de conversión de los videos registrados en información matricial “mraw.m” (Lindner, 2017)
- La rutina de filtrado de resultados posterior al análisis “Filtrado_Mediana_Movil.m”

4.9.7.1 Selección de Video.

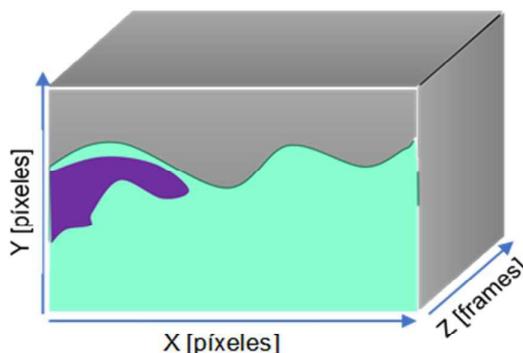
La primera variable que debe ser definida en el programa es el video que debe ser leído para el análisis. La función “mraw” acciona el algoritmo del mismo nombre para transformar la información visual del video elegido en información matricial. La

variable “subject” almacena la información obtenida por esta transformación. Se debe copiar la dirección virtual del almacenamiento del video elegido y su nombre de archivo (excluyendo el tipo de archivo), insertar esta información luego de la función “mraw” para realizar esta acción.

Ej. “ subject = mraw('C:\PHOTRON\videos de canal\Video1); ”

4.9.7.2 Definición de Variables.

Figura 4.35 Esquema Gráfico de Organización de Datos



Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

- Variables “to” y “tf”

Delimitar los frames del video que serán leídos para el análisis de velocimetría del flujo observado. Se debe imponer cual será el primer y último “frame” del análisis. Se debe garantizar que, en ambas secciones temporales capturadas en el análisis, se observe un breve periodo de frames no afectadas por la presencia del trazador químico y que al final del intervalo de lectura se hayan registrado puntos de reconocimiento del trazador químico a lo largo de toda la extensión vertical de las secciones temporales.

- Variables “Ysup” y “Yinf”

Considerando que la extensión vertical del análisis de velocimetría debe limitarse a la porción de las imágenes que visualiza el fondo reflector instalado en el modelo, se debe delimitar esta extensión mediante la asignación de las coordenadas verticales del punto superior y del punto inferior de esta superficie reflectora.

- Variable “rel_pix_mm”

Se debe obtener un promedio entre los dos valores de factor de conversión de unidades longitudinales medidos e imponerlo en la rutina para el cálculo de velocidades.

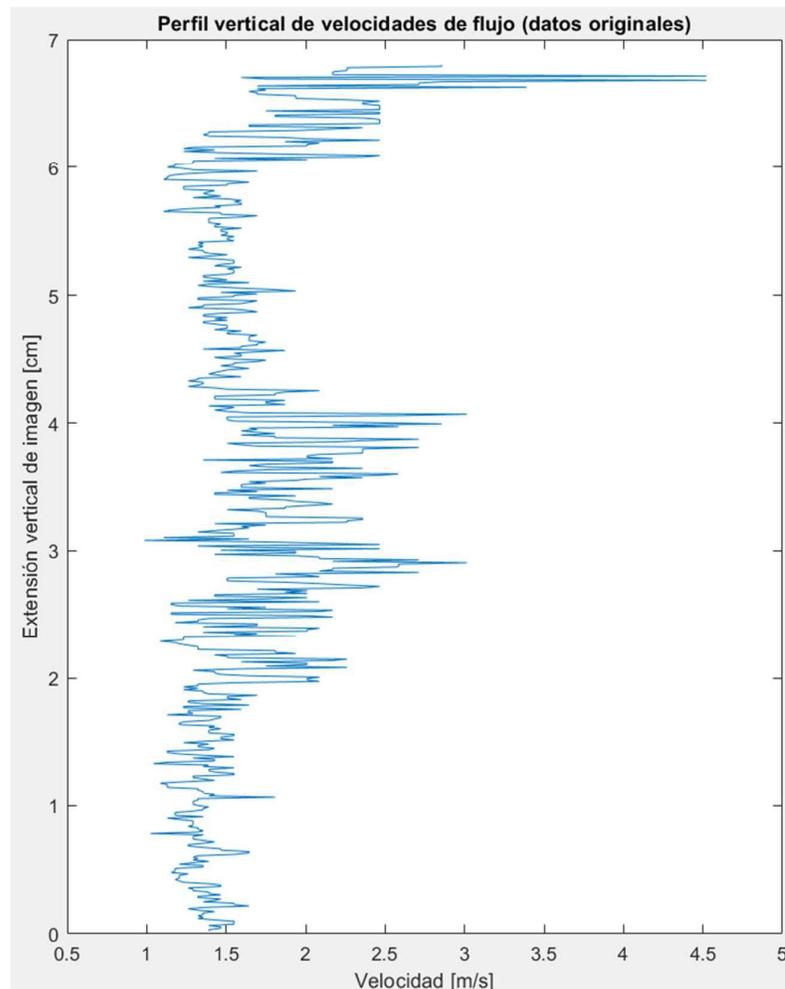
- Variables “secc_x1” y “secc_x2”

Finalmente se requiere definir el intervalo de espacio longitudinal del cálculo de la velocidad de traslado del trazador químico. El componente Δx de la ecuación de velocidad debe ser amplio lo suficiente para que la obtención de los valores de Δt tengan un rango de variabilidad representativo del fenómeno presenciado.

4.9.7.3 Presentación de Resultados (Antes de Filtrado).

Luego de la definición de las variables necesarias y ejecutar la rutina de análisis, el programa presenta los resultados del análisis automáticamente. En el área de la ventana de comandos se presenta el valor único de la velocidad media calculada del flujo. En una ventana separada, se presenta la gráfica de velocidad para cada coordenada vertical de las imágenes grabadas.

Figura 4.36 Gráfica Preliminar de Velocidades



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

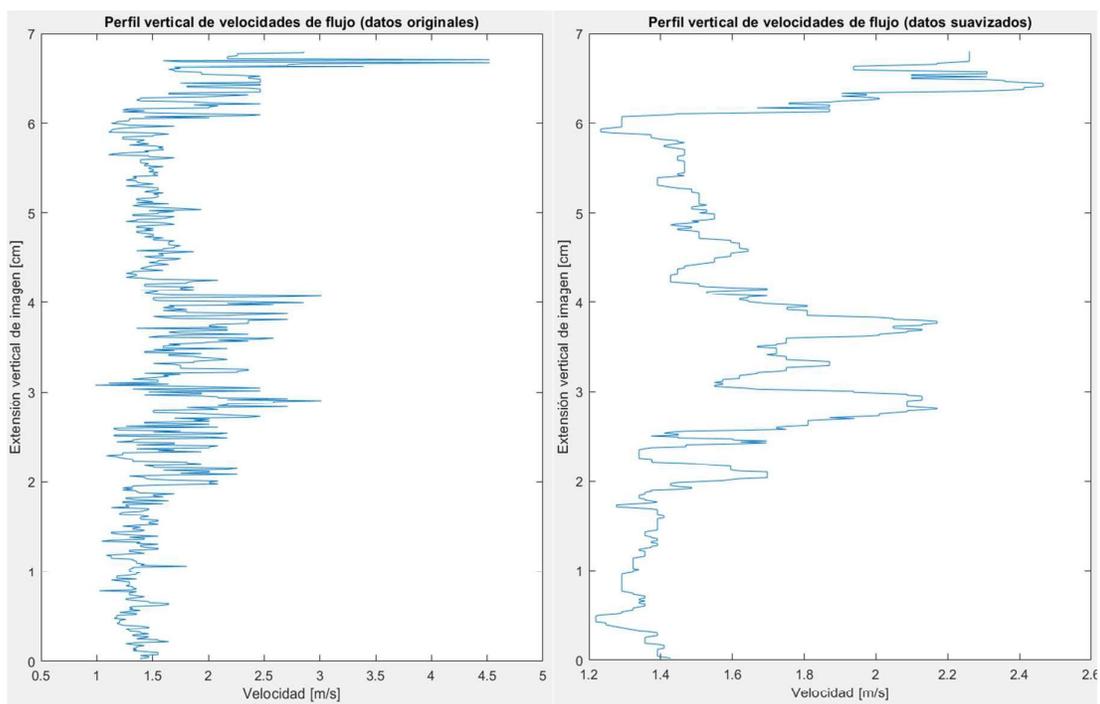
4.9.7.4 Filtrado de Resultados.

En la rutina de filtrado de datos, se requiere escoger un valor del tamaño de la ventana del método de suavizado según el tamaño de los picos discrepantes presentes en los resultados preliminares.

4.9.7.5 Presentación de Resultados Definitivos (Después de Filtrado).

Luego de filtrar los resultados originales, la rutina de suavizado presenta automáticamente el nuevo valor de la velocidad media del flujo calculada a partir de los resultados filtrados y presenta las gráficas de distribución vertical de velocidades horizontales antes y después del filtrado de datos.

Figura 4.37 Gráficas Preliminar y Definitiva de Velocidades



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La metodología práctica de uso de la cámara de alta velocidad para mediciones de velocidad de flujo con trazador químico toma en cuenta todas las consideraciones necesarias (sean prácticas o de software) para la grabación de videos cuyas imágenes sean nítidas y relevantes para su análisis matricial posterior. Se indicaron recomendaciones de uso general y específico de los equipos utilizados en las pruebas y se describieron las variables que deben ser ajustadas y definidas por el usuario para optimizar la captura de imágenes.
- Ya que se propuso un método de medición hidráulica basado en la visualización de un flujo, fue sumamente importante considerar como la luz utilizada para resaltar el fenómeno observado interactuaba con el medio hidráulico en el canal. La luz presenta propiedades de traslado y de disipación (refracción) en el agua distintas de sus propiedades en el aire o en el vacío. Dependiendo de la configuración y posicionamiento de los equipos utilizados en un ensayo de visualización, se pueden presenciar efectos de amplificación de imágenes a través de la presencia del agua. En el caso del canal hidrodinámico utilizado en las pruebas de esta investigación, se utilizó una regla graduada en centímetros a diferentes distancias de la cámara de alta velocidad para observar de manera detallada

como el agua distorsiona las dimensiones de objetos observados en dicho medio. Los fenómenos de distorsión de la luz cuando ella pasa por diferentes medios, son la razón por la cual los factores de conversión de dimensiones longitudinales deben ser medidos a distintas profundidades de imagen y promediados. Efectivamente esta consideración toma en cuenta la tridimensionalidad del fenómeno observado ya que cada nivel de profundidad de imagen tiene un distinto factor de conversión espacial.

- La rutina de programación realizada en el programa Matlab lee la información de los archivos de video generados por la cámara de alta velocidad, reconoce la presencia y el movimiento de la pigmentación del trazador químico en un flujo observado, luego calcula y presenta las velocidades horizontales de este desplazamiento.
- Los valores considerados anomalías en las series de velocidades de movimiento del trazador químico son producidos debido al movimiento vertical de dichas partículas ya que la rutina de análisis de velocimetría únicamente mide desplazamientos horizontales. Se aplicó la operación de filtrado de datos por mediana móvil para reconocer y ratificar la presencia de dichas discrepancias de manera efectiva. Luego de eliminar los picos no representativos de las gráficas de velocidad resultantes del análisis matricial, se observó que los valores de velocidad obtenidos tienden al valor de la velocidad media del flujo observado.
- La metodología de velocimetría mediante visualización de flujos propuesta en esta investigación fue probada en un rango amplio de condiciones de flujo

según los regímenes calculados (2 flujos subcríticos, un flujo crítico y un flujo supercrítico) y según las velocidades de los flujos observados (4 pruebas entre 0.12 m/s y 1.6 m/s aproximadamente).

- Teniendo en cuenta las desviaciones estándares calculadas entre los resultados de los videos de cada prueba, se observa que la variabilidad entre los resultados de los videos grabados es pequeña, lo que indica la aceptabilidad de los valores del método de visualización propuesto. Sin embargo, se observa que existe una tendencia al aumento de la desviación estándar entre valores obtenidos por distintos videos grabados durante una misma prueba con el aumento de la velocidad del flujo observado. Esta tendencia es probablemente dada debida al aumento del orden de magnitud relativo de los resultados obtenidos a velocidades de flujo más altas.
- Cuando los valores de velocidad media de flujo obtenidos por la metodología propuesta son comparados con los valores obtenidos por otros métodos reconocidos por la literatura técnica (micro molinete y continuidad) se obtienen diferencias muy pequeñas y aceptables (porcentajes de error menores al 5% en todas las pruebas), lo que efectivamente confirma la validez de la metodología propuesta.
- Un manual práctico y sucinto referente a la metodología de medición de velocidad de flujo fue redactado de tal manera que cualquier usuario puede utilizar los equipos y la rutina de programación para realizar pruebas de velocimetría en investigaciones similares bajo condiciones como las presentadas en este trabajo de titulación.

5.2 Trabajo Futuros

- Se puede aplicar la metodología propuesta en modelos físicos donde se presencien flujos a velocidades mayores a las presentadas en esta investigación. Se necesitaría probablemente realizar la validación de las mediciones con otros métodos no intrusivos para comprobar los valores obtenidos.
- Si se amplifica el campo de visión de la cámara de alta velocidad, se podría observar el comportamiento de flujos no uniformes en modelos físicos de estructuras hidráulicas más complejas utilizando la metodología propuesta.
- Se puede modificar la metodología práctica y la rutina de programación de análisis de velocidades obtener valores de velocidad en modelos físicos donde se observe el fenómeno de flujos bifásicos. El uso de la cámara de alta velocidad en este tipo de procesos podría proporcionar información cuantitativa y cualitativa sobre la auto aireación de un flujo.
- En el campo de diseño de automóviles y aeronaves, una técnica utilizada para observar sus características aerodinámicas de los prototipos creados es el túnel de viento. Este ensayo consiste en posicionar el prototipo en una cámara donde se fuerza un flujo de aire con chorros discretos de humo o vapor para que las líneas de flujo del aire sean visibles. La metodología propuesta de uso de la cámara de alta velocidad y una rutina de análisis de velocimetría pueden ser adaptados para este fin.

Referencias

- Aberle, J., Rennie, C. D., Admiraal, D. M., & Muste, M. (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management*. En P. A. Davies & R. Ettema (Eds.), CRC Press/Balkema. <https://doi.org/10.1201/9781315158921>
- Abrahams, A. D., Parsons, A. J., & Luk, S. -H. (1986). Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11(6), 653–657. <https://doi.org/10.1002/esp.3290110608>
- Bung, D. B., & Valero, D. (2015). *Image Processing for Bubble Image Velocimetry in Self-Aerated Flows*. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, (21), 8. The Hague: IAHR.
- Calderón Vásquez, D. N. (2017). *Modelación Física de Separadores de Caudales Hacia Colectores Pluvial y Sanitario Para Alcantarillados Combinados Usados en Ciudades Andinas en Ecuador. Caso de la Descontaminación y Recuperación del Río Machángara en Quito (Universidad de Buenos Aires)*. Recuperado de <http://laboratorios.fi.uba.ar/lse/tesis/LSE-FIUBA-Trabajo-Final-CESE-Jhon-Vargas-Yaya-2017.pdf>
- Chanson, H. (1999). *The Hydraulics of Open Channel Flow – An Introduction (2nd ed., Vol. 1)*. [https://doi.org/10.1016/s1462-0758\(00\)00018-2](https://doi.org/10.1016/s1462-0758(00)00018-2)
- DeCoursey, W. J. (2003). *Statistics and Probability With Microsoft Excel*. Saskatoon, Canada.
- García, J. T., Viguera-rodríguez, A., Castillo, L. G., & Carrillo, J. M. (2018). Towards a characterization of turbulence structure in hydraulic jumps by BIV imaging method. *5th IAHR Europe Congress - New challenges in hydraulic research and engineering*, (June), 3. Cartagena, Spain: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Ghilardi, T., Franca, M. J., & Schleiss, A. J. (2014). Bulk velocity measurements by video analysis of dye tracer in a macro-rough channel. *Measurement Science and Technology*, 25(3), 11. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/3/035003>
- Goring, D. G., & Nikora, V. I. (2002). Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117–128. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2002\)128:1\(117\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2002)128:1(117))
- Hidalgo Marcelo E. (2006). *Introducción a la Teoría de Modelos Hidráulicos y Aplicaciones Básicas*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Justusson, B. I. (1981). Median filtering: statistical properties. En *Two-dimensional digital signal processing II*. <https://doi.org/10.1007/bfb0057597>

Kvam, P. H., & Vidakovic, B. (2007). *Nonparametric Statistics with Applications to Science and Engineering*. En *Nonparametric Statistics with Applications to Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1002/9780470168707>

Leandro, J., Bung, D. B., & Carvalho, R. (2014). *Measuring void fraction and velocity fields of a stepped spillway for skimming flow using non-intrusive methods*. *Experiments in Fluids*, 55(5), 17. <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1732-6>

Leandro, J., Carvalho, R., Chachereau, Y., & Chanson, H. (2012). *Estimating void fraction in a hydraulic jump by measurements of pixel intensity*. *Experiments in Fluids*, 52(5), 1307–1318. <https://doi.org/10.1007/s00348-011-1257-1>

Lindner, M. (2017). *Reader class for Photron .mraw-Files*. Recuperado de File Exchange website: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/62219-reader-class-for-photron-mraw-files>

Marbello, R. (2005). *Vertederos y Calibración de Vertederos*. En *Manual de prácticas de laboratorio de hidráulica* (pp. 5–47). Recuperado de [http://www.bdigital.unal.edu.co/12697/31/3353962.2005.Parte 6.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/12697/31/3353962.2005.Parte%206.pdf)

Martín, R. Salcedo, R. F. (2011). *MECÁNICA DE FLUIDOS Tema 3- Medida de caudales*. Universidad de alicante, 1–21.

Muste, M., Kim, D., & González-Castro, J. A. (2010). *Near-transducer errors in ADCP measurements: Experimental findings*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(5), 275–289. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000173](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000173)

Nagar, S. (2017). *Introduction to Matlab*. En *Introduction to Matlab: For Engineers and Scientists*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4842-3192-0>

NIST/SEMATECH. (2012). *e-Handbook of Statistical Methods*.

Norah, L. (2019). *A Guide to the Exposure Triangle in Photography - Finding the Universe*. Recuperado el 21 de noviembre de 2019, de <https://www.findingtheuniverse.com/exposure-triangle-photography/>

Photron. (2013). *FASTCAM Mini UX100 Hardware Manual*. Tokyo, Japan.

Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2007). *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide* (2nd Editio). Berlin, Germany: Springer.

Roca Martínez, J., García Bermejo, J. T., Viguera Rodríguez, A., & Castillo Elsitdié, L. G. (2016). *Anuario de Jóvenes Investigadores* (Vol. 8; J. M. Carrillo, Ed.). Cartagena, Spain: Universidad Politécnica de Cartagena.

Ryu, Y., Chang, K. A., & Lim, H. J. (2005). *Use of bubble image velocimetry for measurement of plunging wave impinging on structure and associated greenwater*. *Measurement Science and Technology*, 16(10), 1945–1953. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/16/10/009>

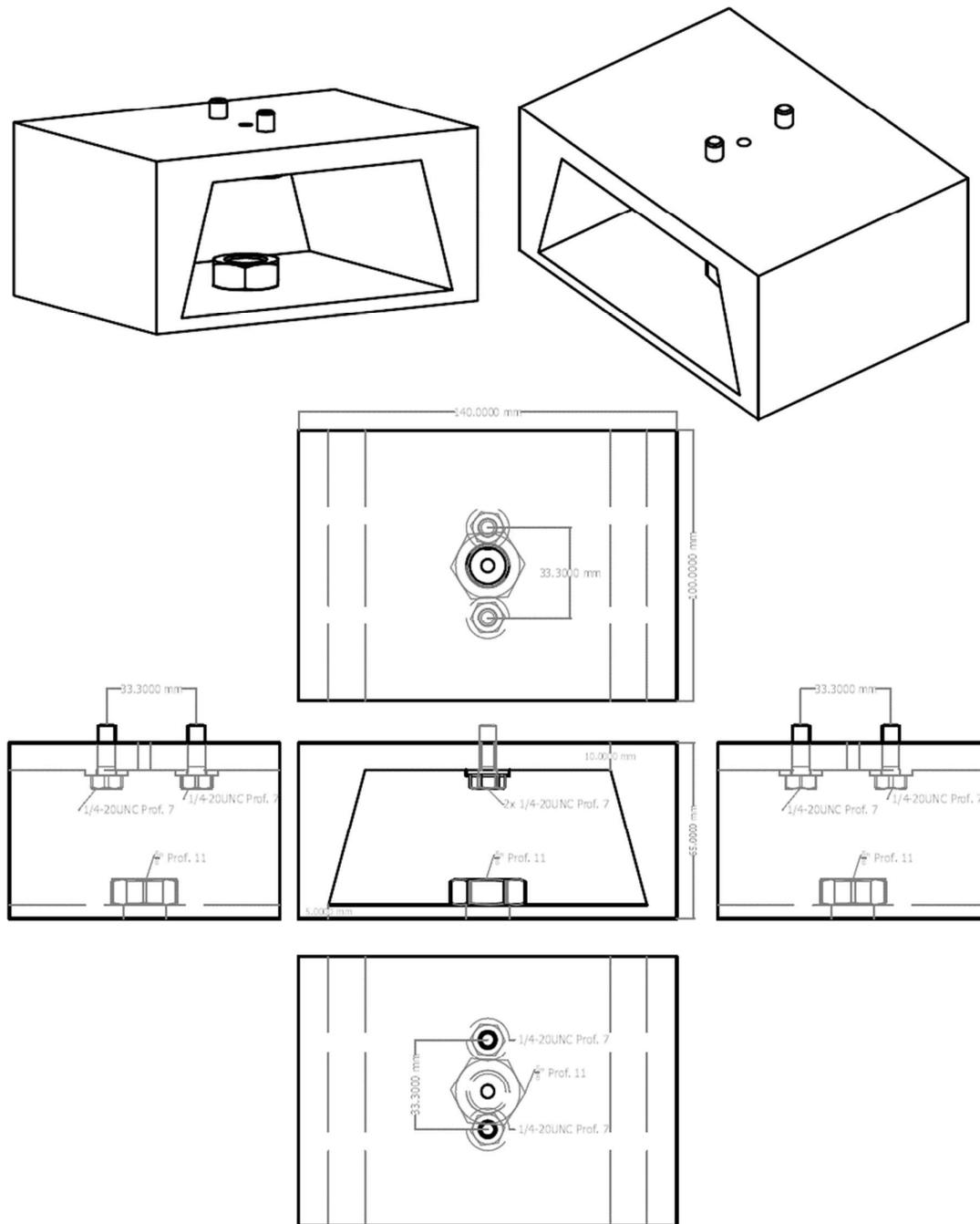
Westerweel, J. (1997). *Fundamentals of digital particle image velocimetry*. *Measurement Science and Technology*, 8(12), 1379–1392. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/12/002>

Yang, J., Lin, C., Kao, M. J., Teng, P., & Raikar, R. V. (2018). *Application of SIM, HSPIV, BTM, and BIV techniques for evaluations of a two-phase air-water chute aerator flow*. *En Water (Switzerland)* (Vol. 10). <https://doi.org/10.3390/w10111590>

6. Anexos

6.1 Anexo 1: Diagrama Detallado de Pieza entre Cámara Photron y Trípode

Figura 6.1 Diagrama Detallado de Pieza entre Cámara Photron y Trípode



Nota. Elaborado por Escobar J. Quito, 2019.

6.2 Anexo 2: Código de Rutina Principal de Análisis de Velocimetría “Rutina_Principal_Velocimetria.m”

```

clc
clear

subject = mraw(''); % ARCHIVO .MRAW PARA ANÁLISIS

to=; % PRIMERA FRAME A SER LEIDA
tf=; % PRIMERA FRAME A NO SER LEIDA
t=to;
time_solid=ones(tf-to,subject.Height,subject.Width);
RGB=2;
for ts = 1 : 1 : tf-to
    while t==ts+to-1
        if t==to
            prev_frames=0;
        end
        this_frame = subject.getFrame(t);
        this_frame=this_frame(:, :, RGB);

        for i=1:subject.Height
            time_solid(ts,i,:)=this_frame(i,:);
        end

        time_solid=double(time_solid);
        this_frameNum=double(this_frame);
        prev_frames=prev_frames+this_frameNum;
        t=t+1;
    end

end

%% Delimitación vertical de datos de análisis
Ysup=; % COORDENADA VERTICAL SUPERIOR DE ANÁLISIS (valor
menor)
Yinf=; % COORDENADA VERTICAL INFERIOR DE ANÁLISIS (valor
mayor)
hc=1;
time_solidC=ones(ts,Yinf-Ysup,subject.Width);
for h=Ysup:Yinf
    time_solidC(:,hc,:)=time_solid(:,h,:);
    hc=hc+1;
end
clear time_solid
%% Ubicación de secciones temporales
avg_line=cell(1,subject.Width);
for j=1:subject.Width

```

```

avg_line{j}=time_solidC(:,:,j);
avg_line{j}=[avg_line{j}]';
avg_line{j}=uint8(avg_line{j});
end
    secc_x1=; % COORDENADA EN X DE SECCIÓN TEMPORAL 1
    (valor menor)
    secc_x2=; % COORDENADA EN X DE SECCIÓN TEMPORAL 2
    (valor mayor)
        LPlane1=avg_line{secc_x1};
        LPlane2=avg_line{secc_x2};
        clear time_solidC
%% Lectura de capa roja
RGB=1;
t=to;
Rtime_solid=ones(tf-to,subject.Height,subject.Width);
for ts = 1 : 1 : tf-to
    while t==ts+to-1
        if t==to
            Rprev_frames=0;
        end

            Rthis_frame = subject.getFrame(t);
            Rthis_frame=Rthis_frame(:,:,RGB);

        for i=1:subject.Height
            Rtime_solid(ts,i,:)=Rthis_frame(i,:);
        end

            Rtime_solid=double(Rtime_solid);
            Rthis_frameNum=double(Rthis_frame);
            Rprev_frames=Rprev_frames+Rthis_frameNum;
            t=t+1;
        end

    end

%% Delimitación vertical de datos en la capa roja
hc=1;
Rtime_solidC=ones(ts,Yinf-Ysup,subject.Width);
for h=Ysup:Yinf
    Rtime_solidC(:,hc,:)=Rtime_solid(:,h,:);
    hc=hc+1;
end
clear Rtime_solid
%% Ubicación secciones temporales de la capa Roja
Ravg_line=cell(1,subject.Width);
for j=1:subject.Width
    Ravg_line{j}=Rtime_solidC(:,:,j);

```

```

Ravg_line{j}=[Ravg_line{j}]';
Ravg_line{j}=uint8(Ravg_line{j});
end
    RLPlane1=Ravg_line{secc_x1};
    RLPlane2=Ravg_line{secc_x2};
    clear Rtime_solidC
%% Análisis de secciones temporales
Ttraz1=zeros(hc-1,1);
Ttraz2=zeros(hc-1,1);
Difcol1=zeros(hc-1,ts-1);
readM1=zeros(hc-1,ts-1);
RreadM1=zeros(hc-1,ts-1);

for k1=1:ts-1
    readM1(:,k1)=LPlane1(:,k1);
    readM1=double(readM1);
    RreadM1(:,k1)=RLPlane1(:,k1);
    RreadM1=double(RreadM1);
    for y1=1:hc-1
        Difcol1(y1,k1)=readM1(y1,k1)-RreadM1(y1,k1);
        if Difcol1(y1,k1)<0
            if Ttraz1(y1,1)==0
                Ttraz1(y1,1)=k1;
            end
        end
    end
end
readM2=zeros(hc-1,ts-1);
RreadM2=zeros(hc-1,ts-1);
Difcol2=zeros(hc-1,ts-1);
for k2=1:ts-1
    readM2(:,k2)=LPlane2(:,k2);
    readM2=double(readM2);
    RreadM2(:,k2)=RLPlane2(:,k2);
    RreadM2=double(RreadM2);
    for y2=1:hc-1
        Difcol2(y2,k2)=readM2(y2,k2)-RreadM2(y2,k2);
        if Difcol2(y2,k2)<0
            if Ttraz2(y2,1)==0
                Ttraz2(y2,1)=k2;
            end
        end
    end
end
end

    for y1=1:hc-1

```

```

    if Ttraz1(y1,1)>0
        LPlane1(y1,Ttraz1(y1,1))=0;
    end
end
for y2=1:hc-1
    if Ttraz2(y2,1)>0
        LPlane2(y2,Ttraz2(y2,1))=0;
    end
end

line_fig1 = figure('visible','on'); %GRAF. SECCIÓN
TEMPORAL 1
imshow(LPlane1,'XData',to:tf, 'YData',0:hc);
xlabel('Tiempo [frames]');
ylabel('Extensión vertical de imagen [pix]')
axis on
title(sprintf(['Sección Temporal 1 (x= ',
num2str(secc_x1), ')']));
line_fig2 = figure('visible','on'); %GRAF. SECCIÓN
TEMPORAL 2
imshow(LPlane2,'XData',to:tf, 'YData',0:hc);
xlabel('Tiempo [frames]');
ylabel('Extensión vertical de imagen [pix]')
axis on
title(sprintf(['Sección Temporal 2 (x= ',
num2str(secc_x2), ')']));

%% Cálculo de velocidades
rel_pix_mm=% FACTOR DE REFERENCIA ESPACIAL
DISTpix=abs(secc_x2-secc_x1);
DISTmm=DISTpix*rel_pix_mm;
DISTm=DISTmm/1000;
for yp=1:length(Ttraz1)
    if Ttraz1(yp,1)~=0 && Ttraz2(yp,1)~=0
        deltaTf(yp,1)=Ttraz2(yp,1)-Ttraz1(yp,1);
        if deltaTf(yp,1)<0
            deltaTf(yp,1)=0;
        end
    end
end
deltaTs=deltaTf./subject.FrameRate;
Velocity=zeros(length(deltaTs),1);
term=0;
while term==0
for yp=1:length(deltaTs)
    if yp>=length(Velocity)

```

```

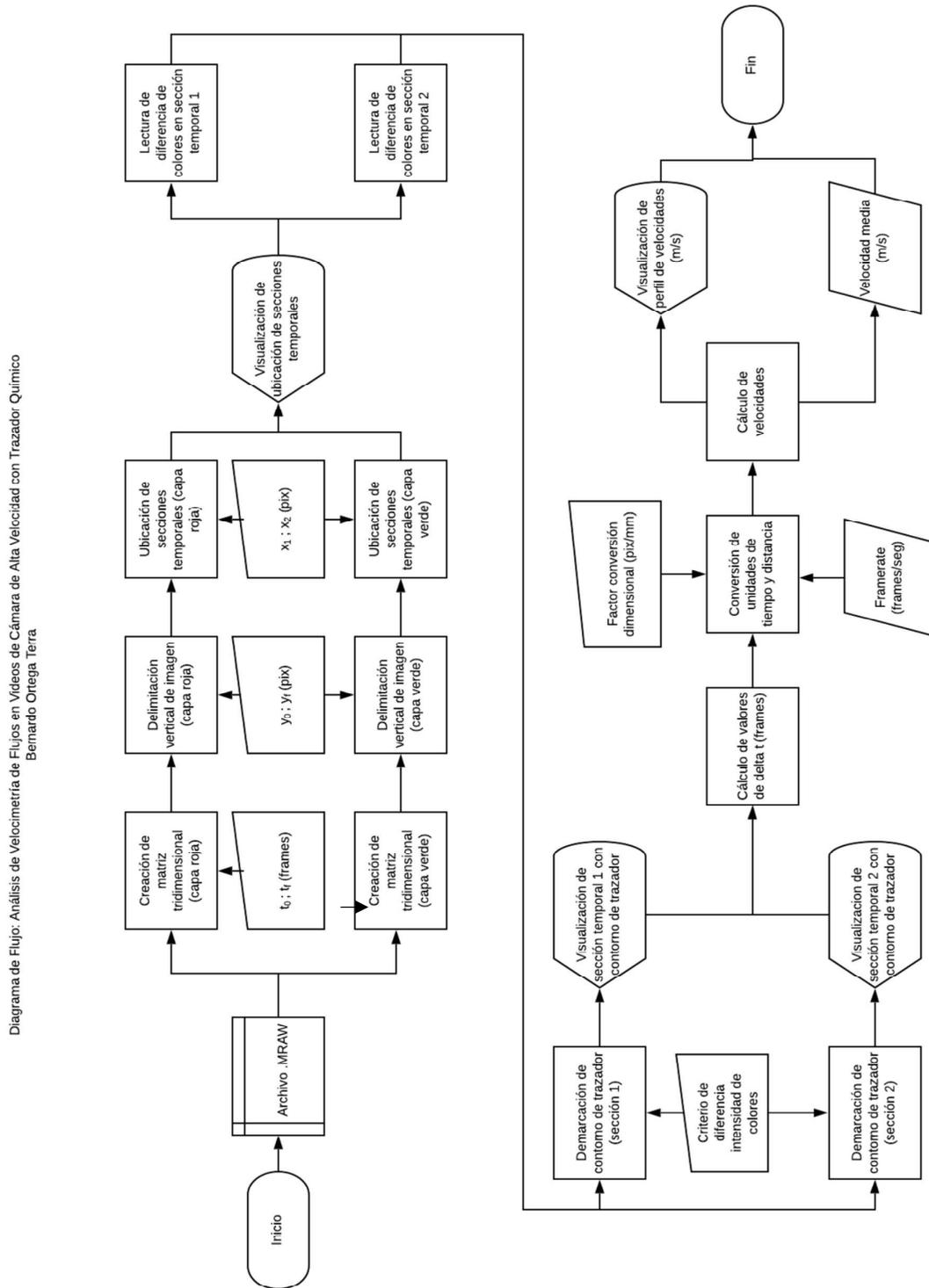
        term=1;
    break
end
if deltaTs(yp,1)~=0
    Velocity(yp,1)=DISTm/deltaTs(yp,1);
end
if deltaTs(yp,1)==0
    Velocity(yp,:)=0;
end
end
end
VelPlot=zeros(length(deltaTs),2);
for yp=1:length(deltaTs)
    VelPlot(yp,2)=Velocity(yp);
    VelPlot(yp,1)=hc-yp;
end
term=0;
while term==0
for yp=1:length(deltaTs)
    if yp>length(VelPlot)
        term=1;
    break
    end
    if VelPlot(yp,2)==0
        VelPlot(yp,:)=[];
        break
    end
end
end
end
VelPlot=VelPlot';
VelPlot(1,:)=VelPlot(1,:)*rel_pix_mm/10;
term=0;
VPlot=figure;
plot(VelPlot(2,:),VelPlot(1,:));
meanV=mean(VelPlot(2,:))

```

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

6.3 Anexo 3: Diagrama de Flujo de Rutina de Programación “Rutina_Principal_Velocimetria.m”

Figura 6.2 Diagrama de Flujo de Rutina de Programación “Rutina_Principal_Velocimetria.m”



Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

6.4 Anexo 4: Código de Rutina de Filtrado de Datos “Filtrado_Mediana_Movil.m”

```

Vdev=std(VelPlot(2,:));
PHVel=VelPlot;
PHVel(2,:)=smoothdata(VelPlot(2,:), 'movmedian', ); %Tamaño
de periodo de filtrado
VPlot=figure;
subplot(1,2,1)
plot(VelPlot(2,:),VelPlot(1,:))
title('Perfil vertical de velocidades de flujo (datos
originales)')
xlabel('Velocidad [m/s]')
ylabel('Extensión vertical de imagen [cm]')
subplot(1,2,2)
plot(PHVel(2,:),PHVel(1,:));
title('Perfil vertical de velocidades de flujo (datos
suavizados)')
xlabel('Velocidad [m/s]')
ylabel('Extensión vertical de imagen [cm]')
meanV=mean(PHVel(2,:))

```

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

6.5 Anexo 5: Resultados de Videos Adicionales

6.5.1 P-01

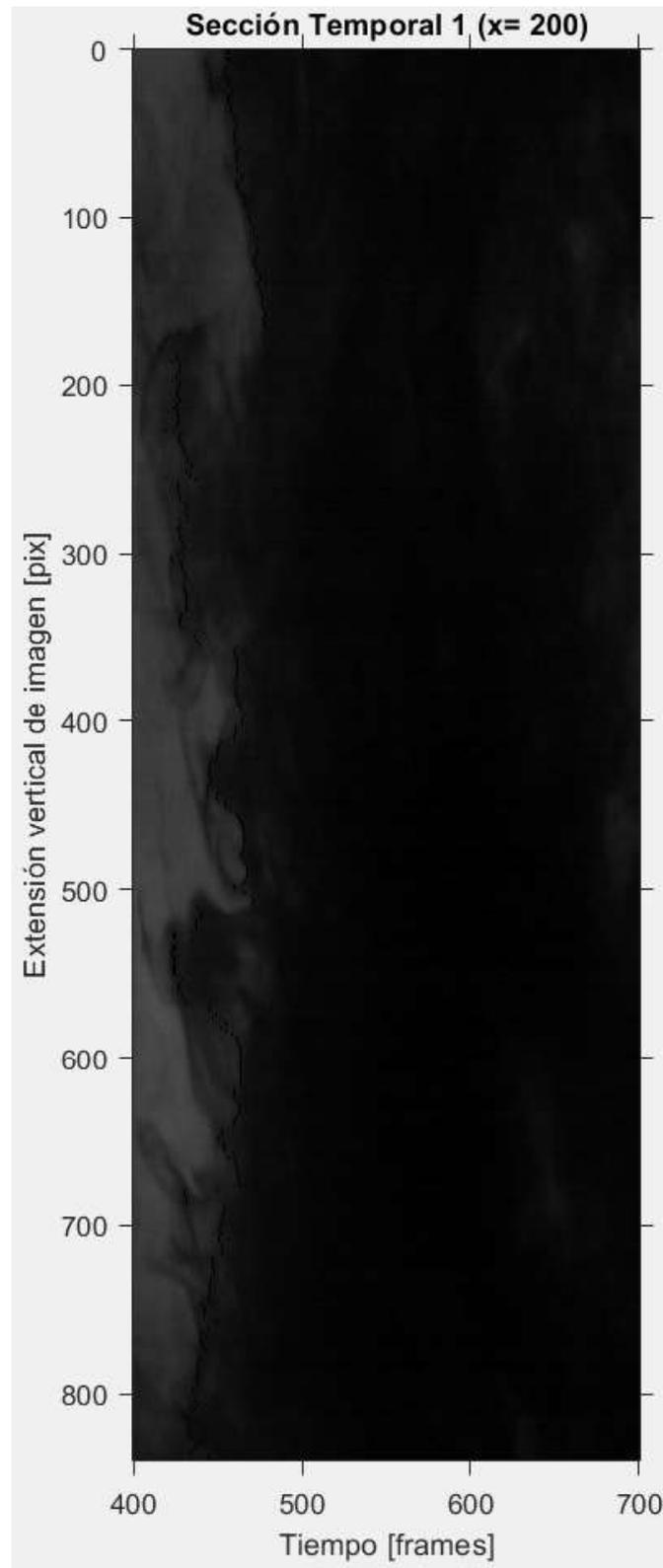
6.5.1.1 Video 1.

Tabla 6.1 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-01

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 400 | 700 | 300 | 1.2 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 200 | 500 | 300 | 60.45 |

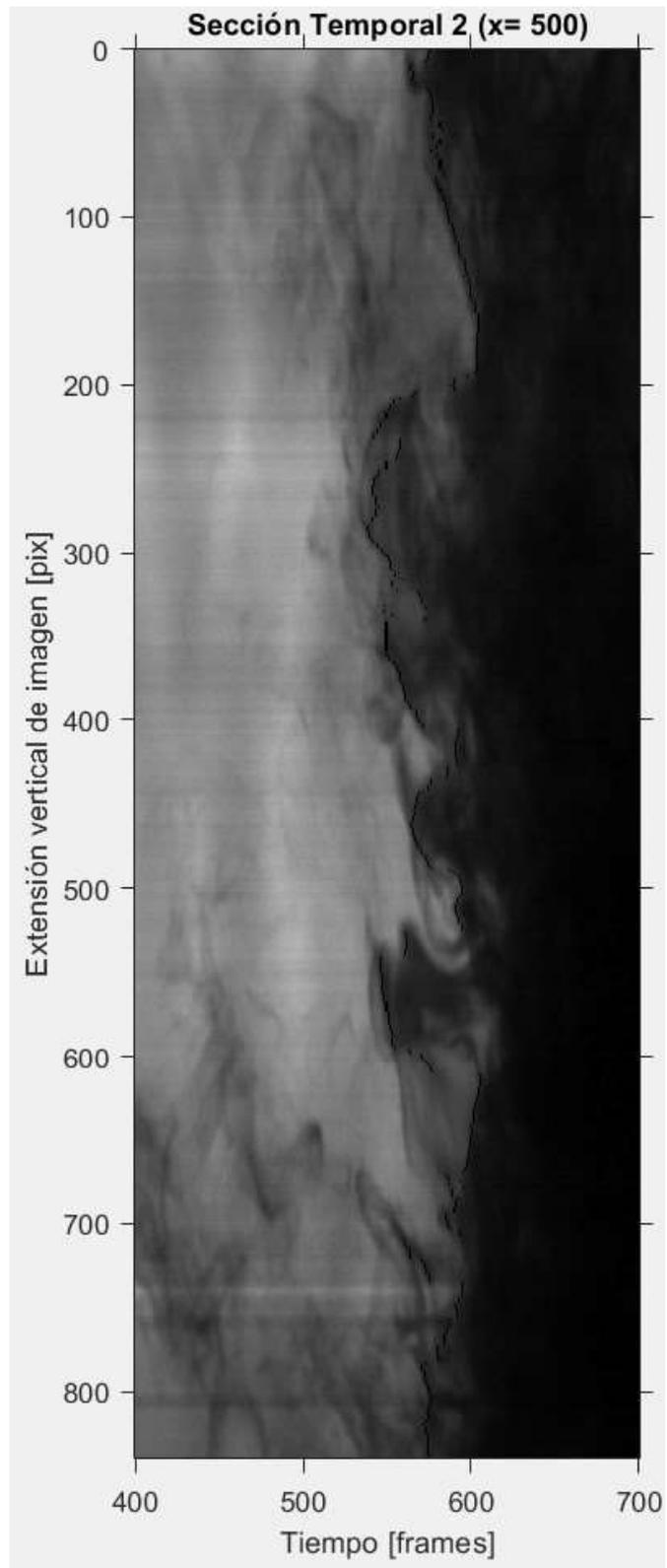
Nota. Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.3 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-01



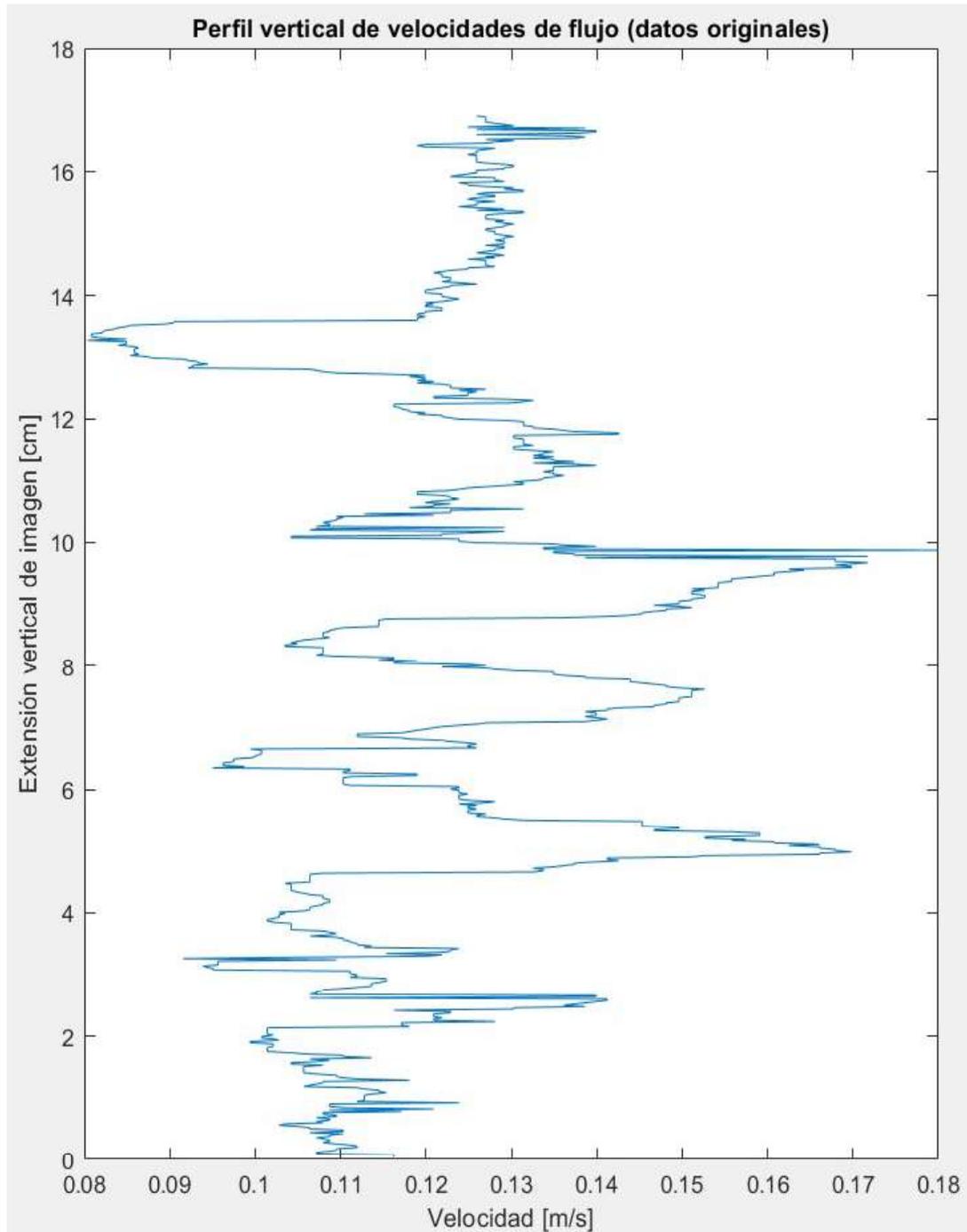
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.4 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-01



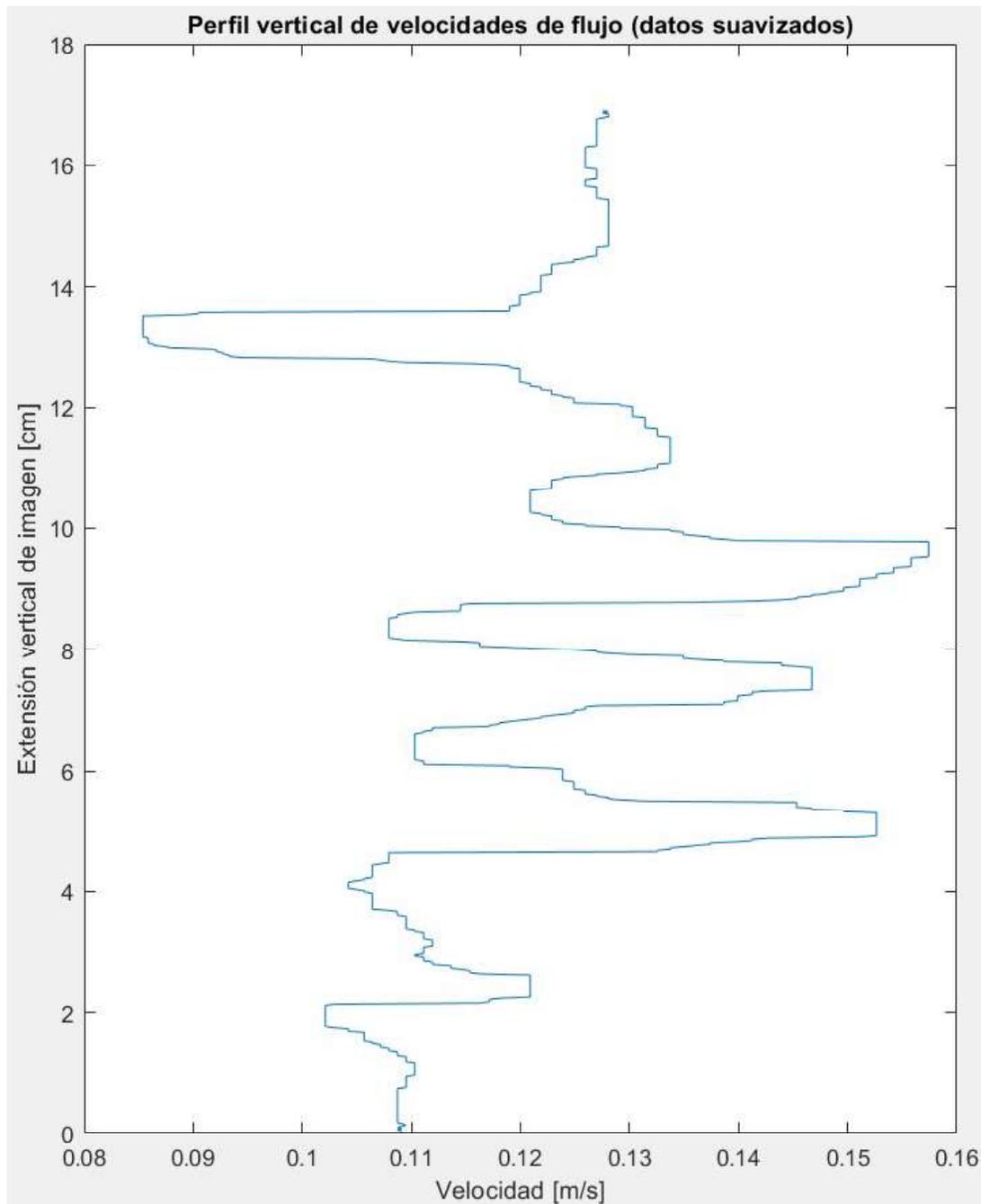
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.5 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.6 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.2 Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1221 | 35 | 0.1218 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

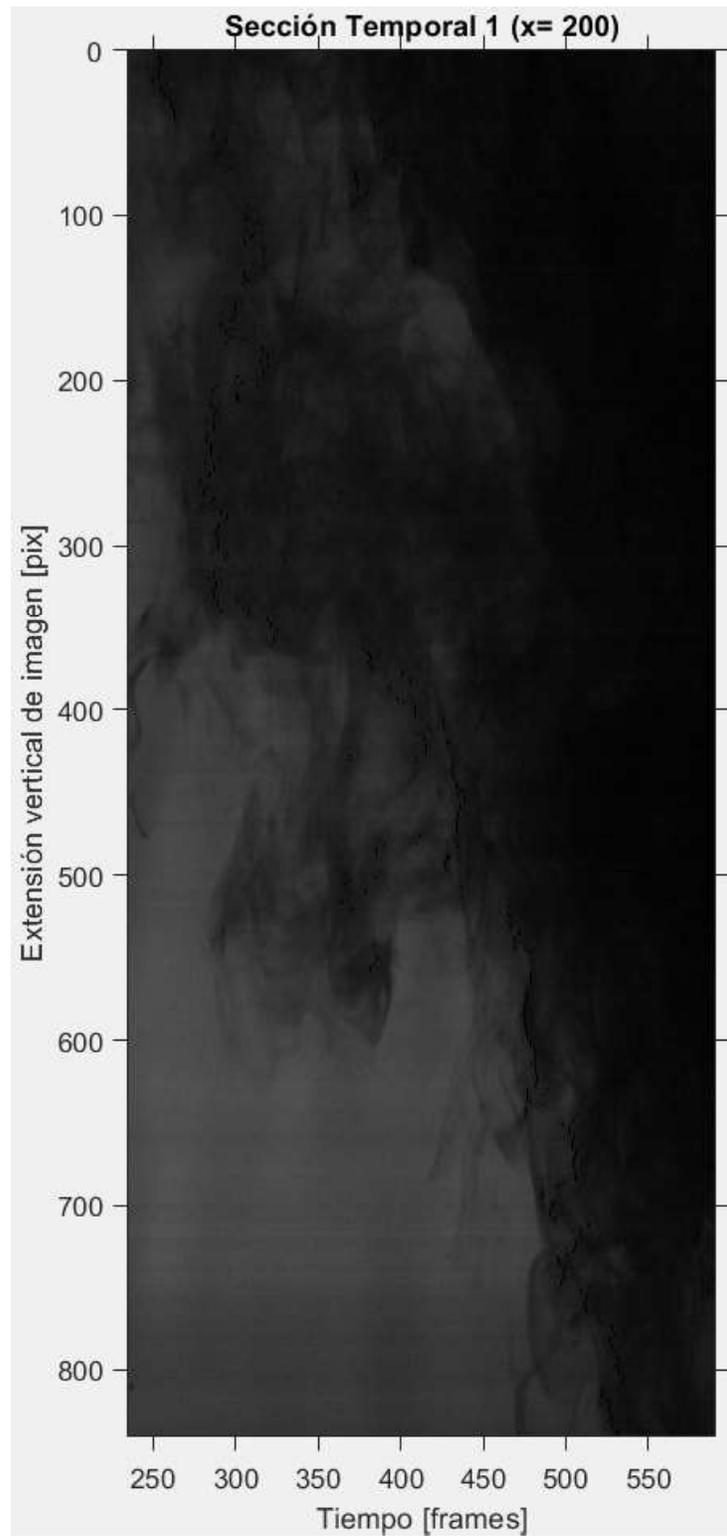
6.5.1.2 Video 2.

Tabla 6.3 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-01

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 235 | 590 | 355 | 1.42 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 200 | 320 | 120 | 24.18 |

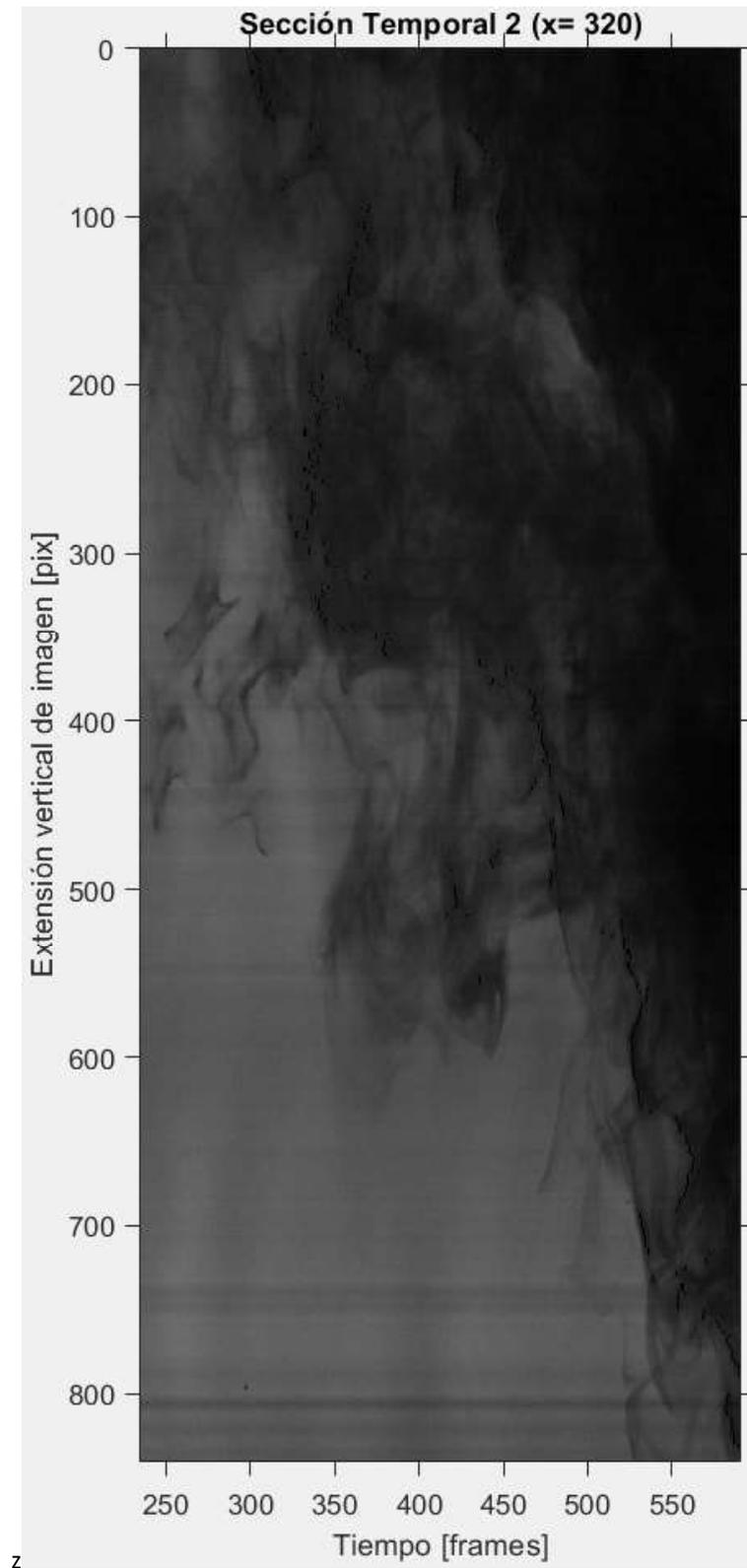
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.7 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-01



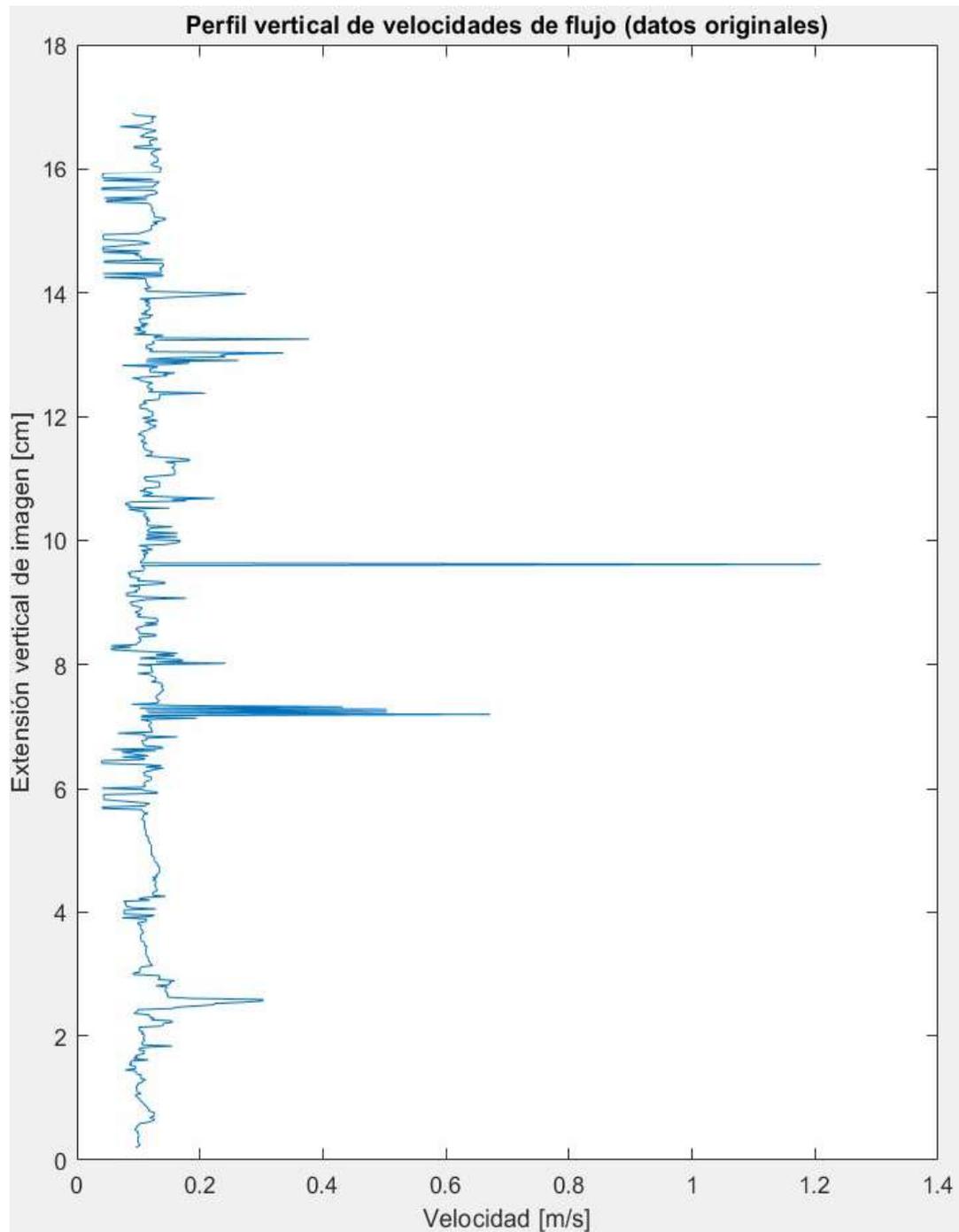
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.8 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-01



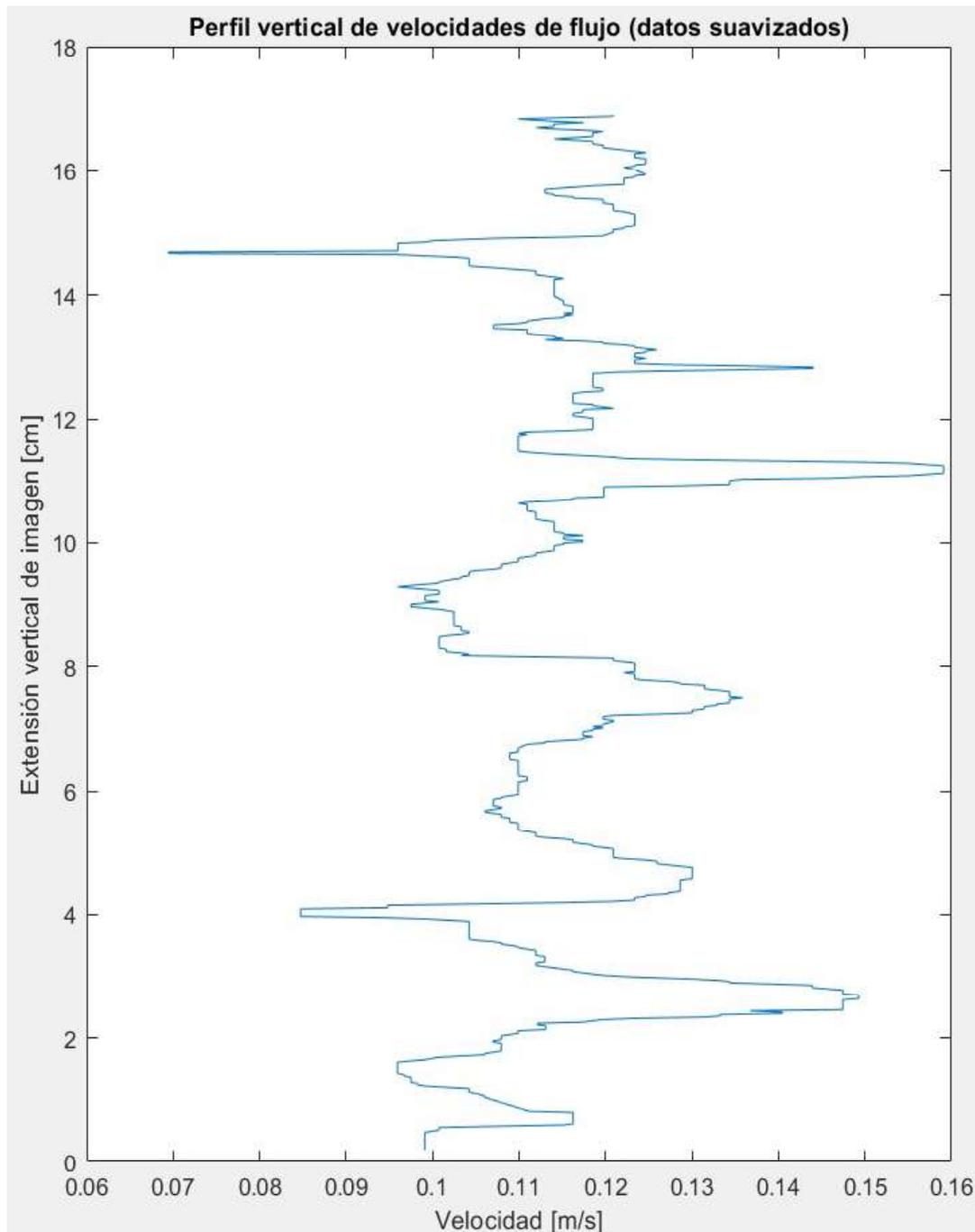
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.9 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.10 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.4 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1194 | 20 | 0.1152 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

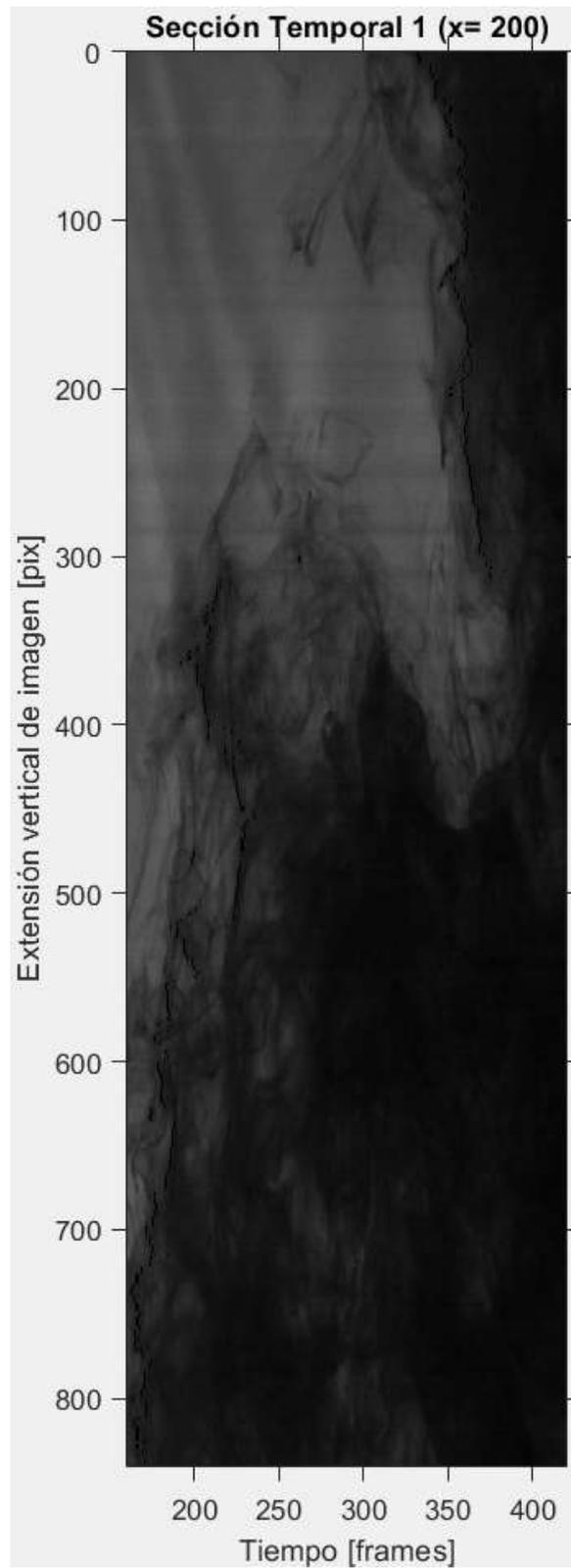
6.5.1.3 Video 3

Tabla 6.5 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-01

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 160 | 420 | 260 | 1.04 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 200 | 300 | 100 | 20.15 |

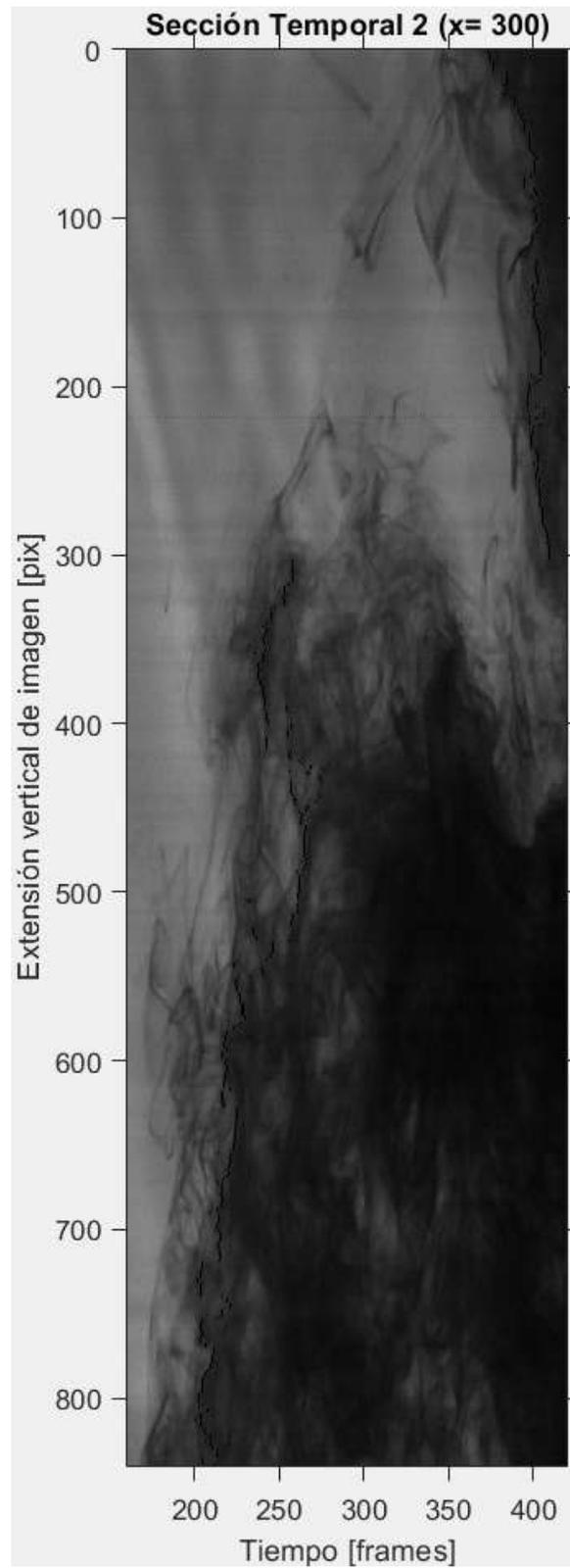
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.11 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-01



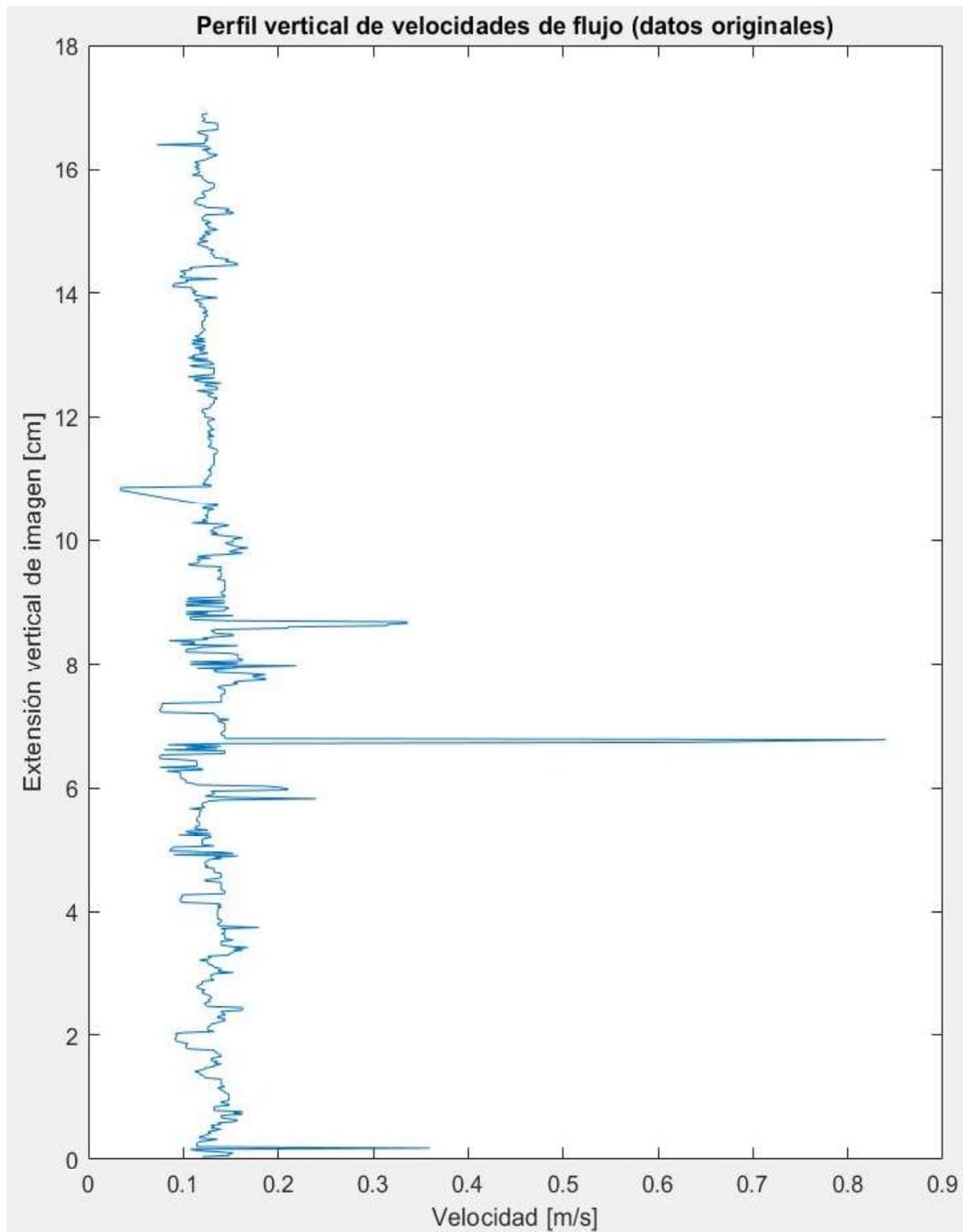
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.12 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-01



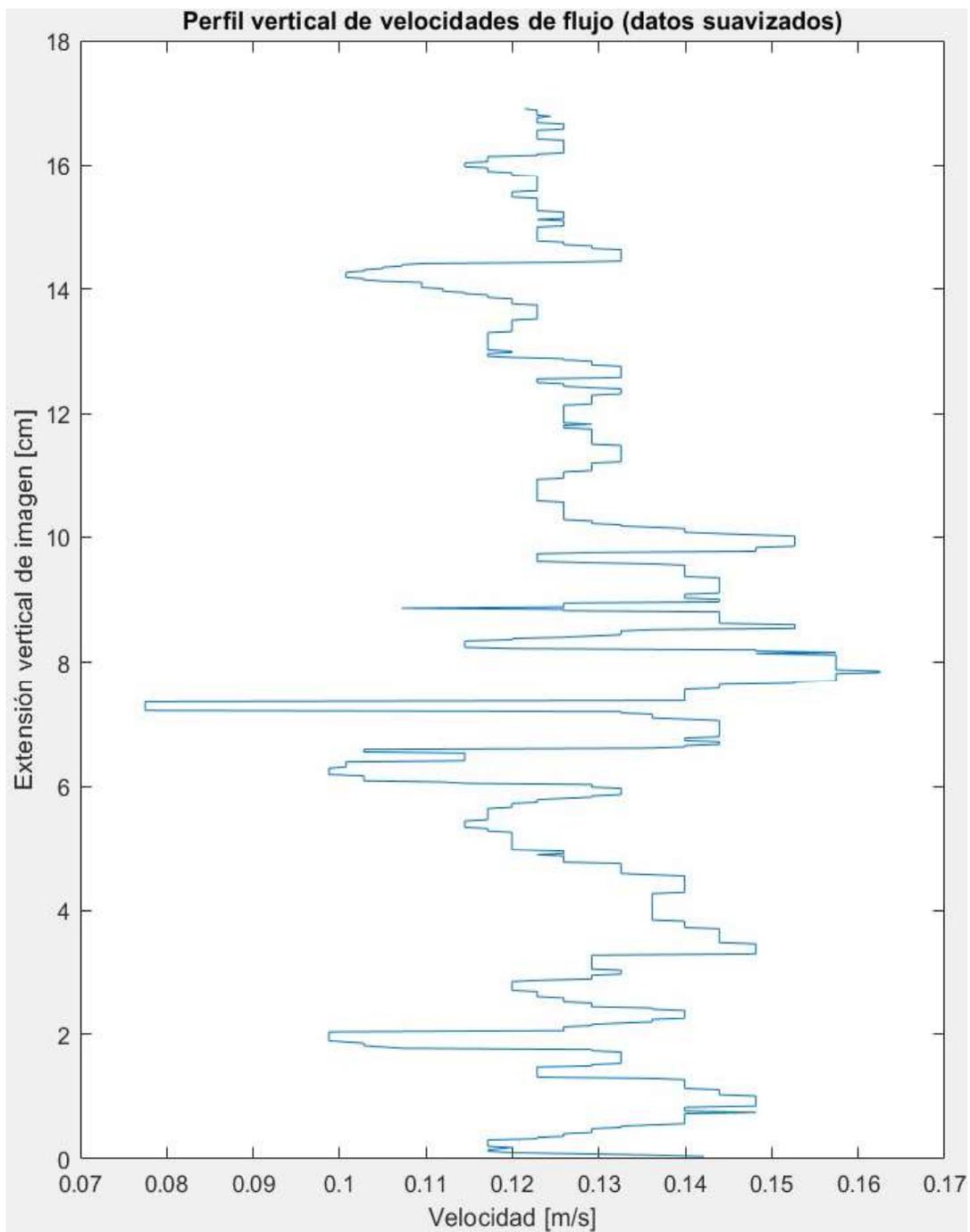
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.13 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.14 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.6 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1313 | 15 | 0.1285 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

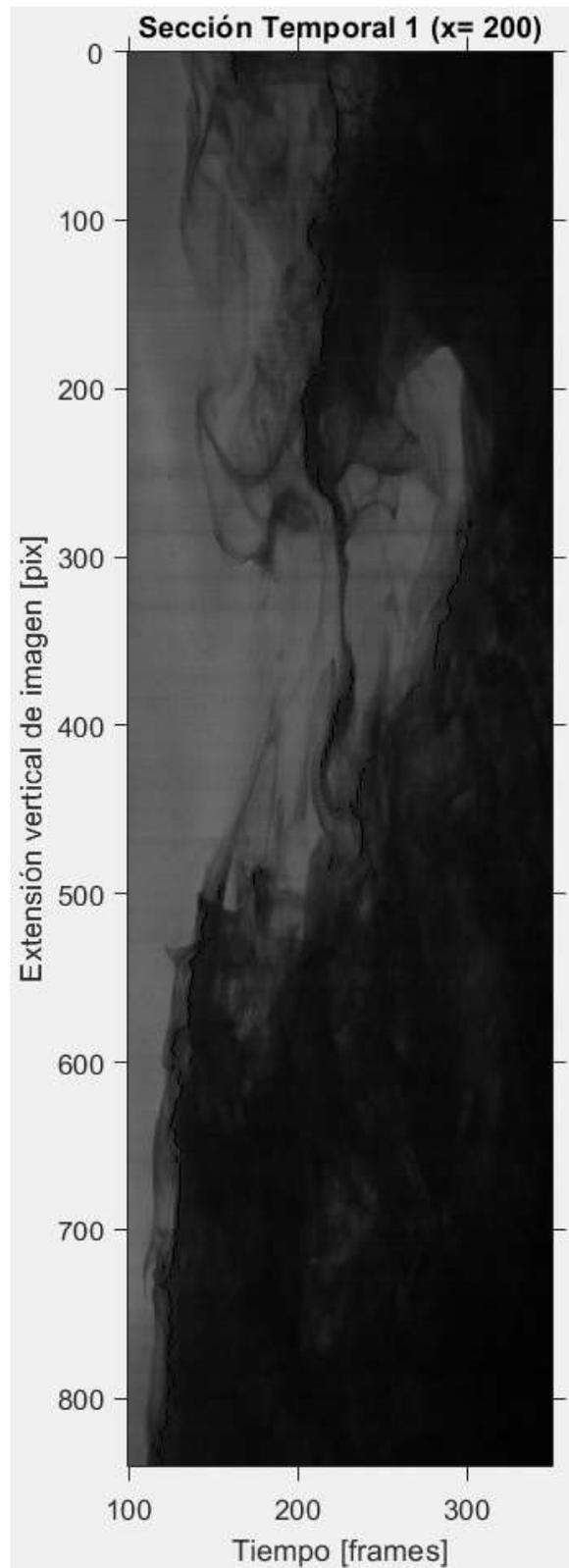
6.5.1.4 Video 4.

Tabla 6.7 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-01

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 100 | 350 | 250 | 1 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 200 | 300 | 100 | 20.15 |

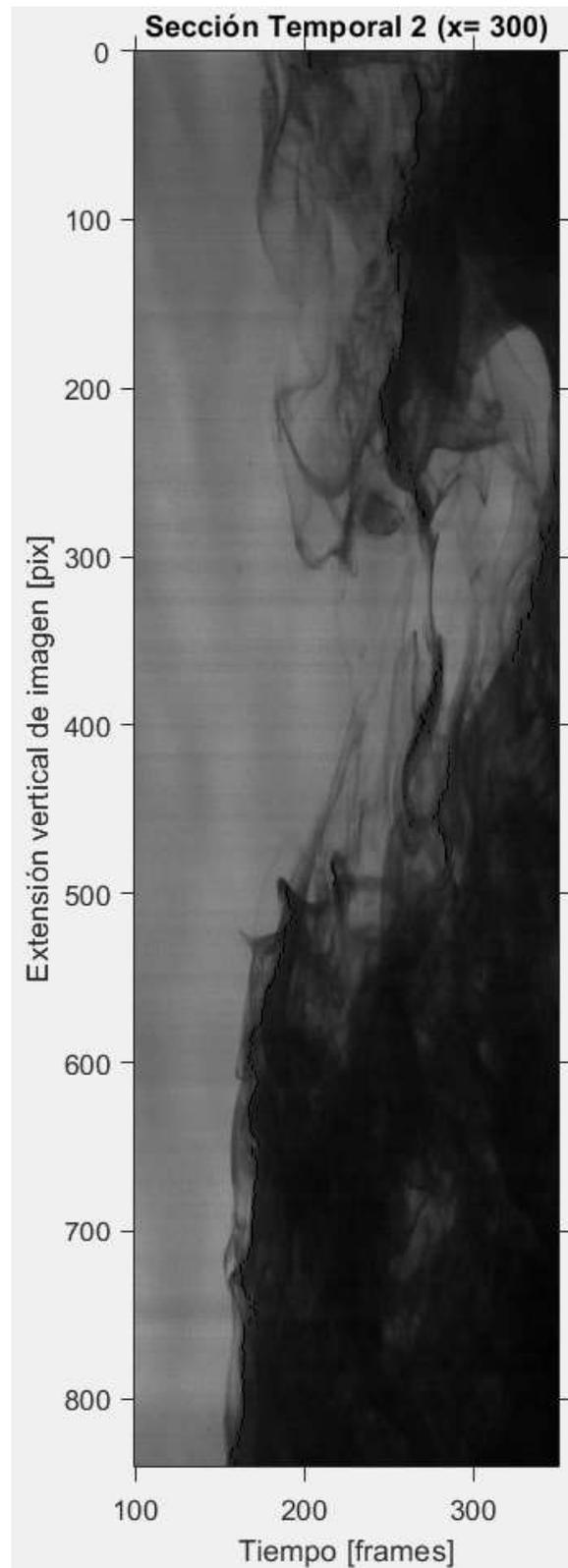
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.15 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-01



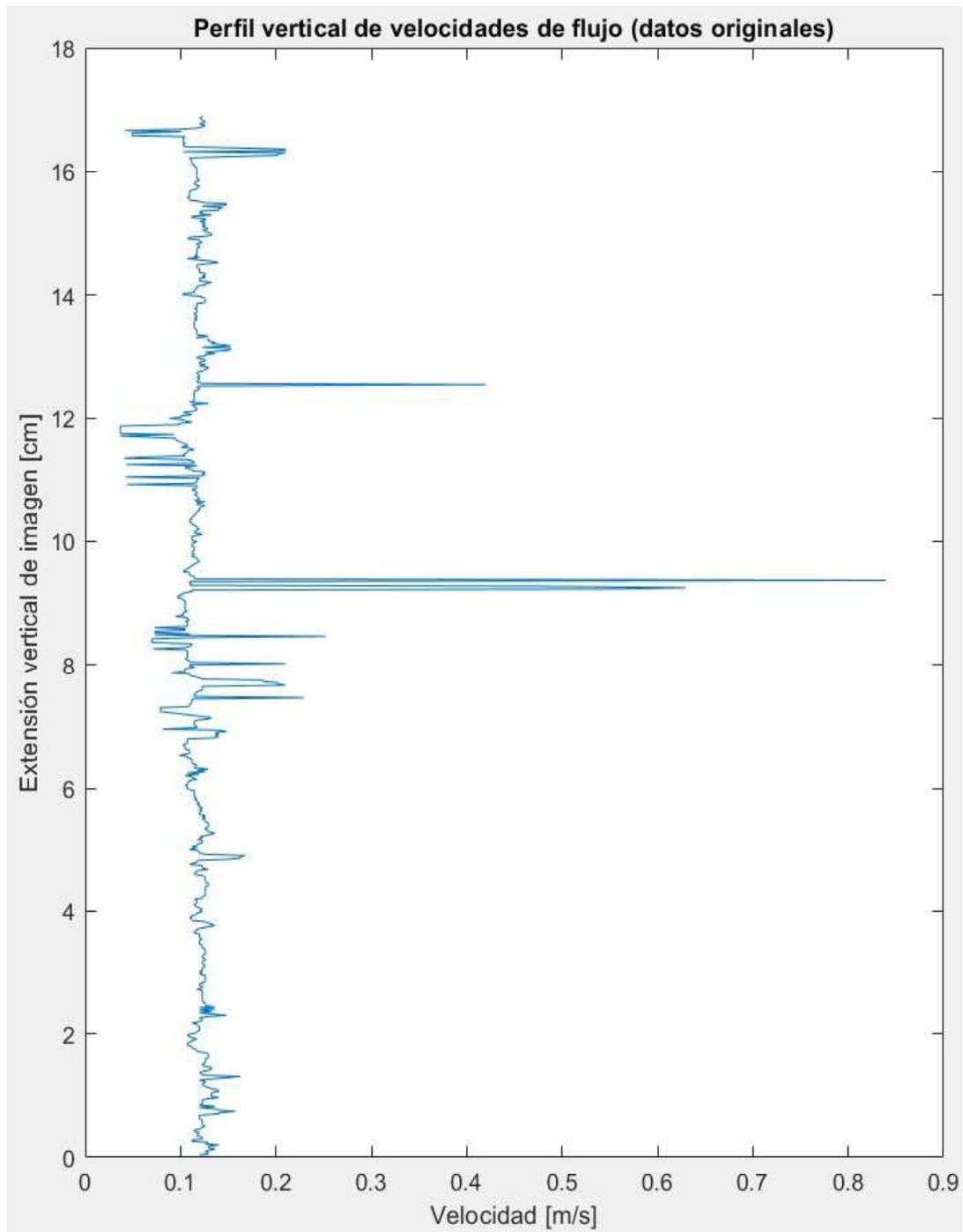
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.16 Sección Temporal 2 del Video 4 de la Prueba P-01



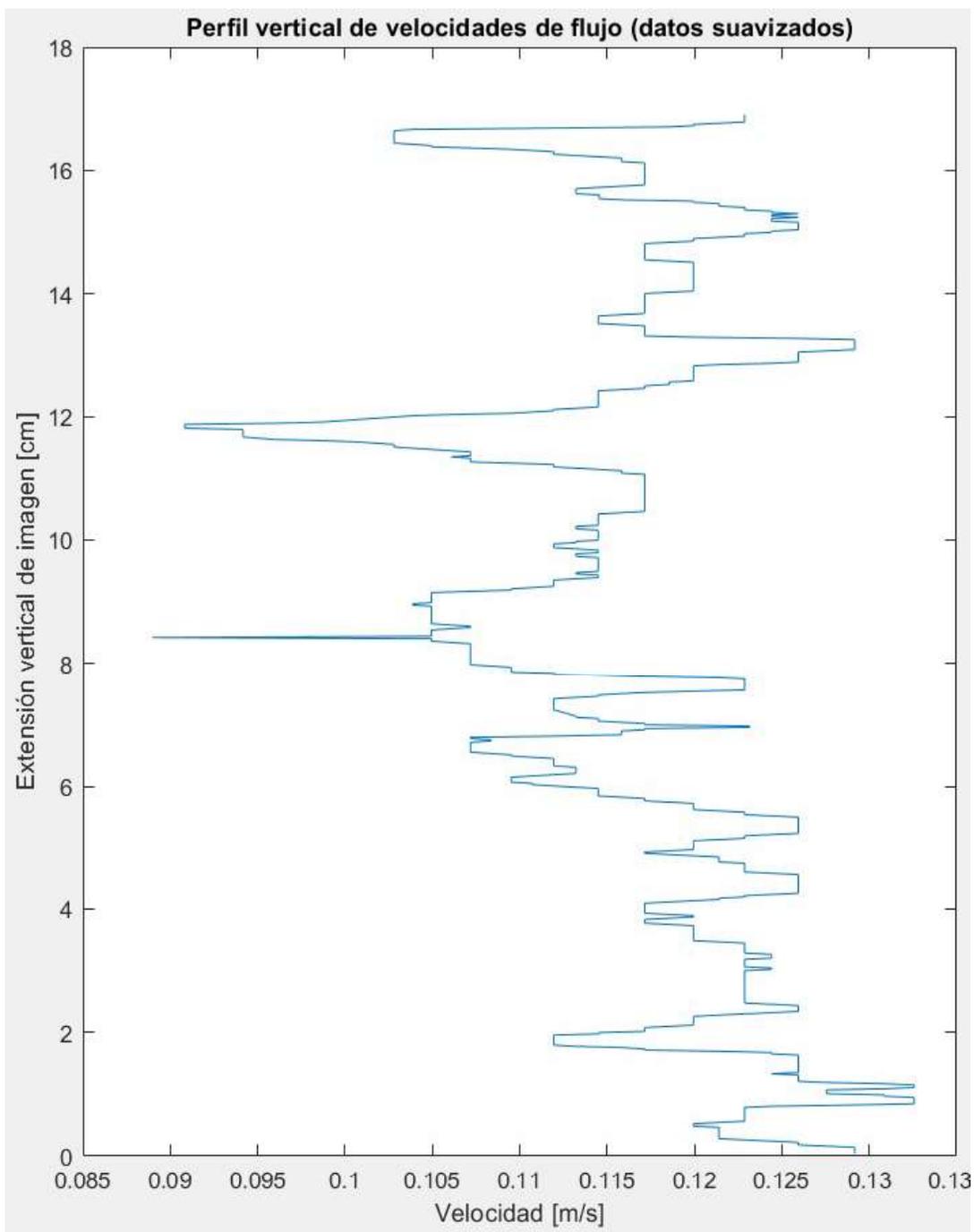
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.17 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.18 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.8 Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1205 | 18 | 0.117 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

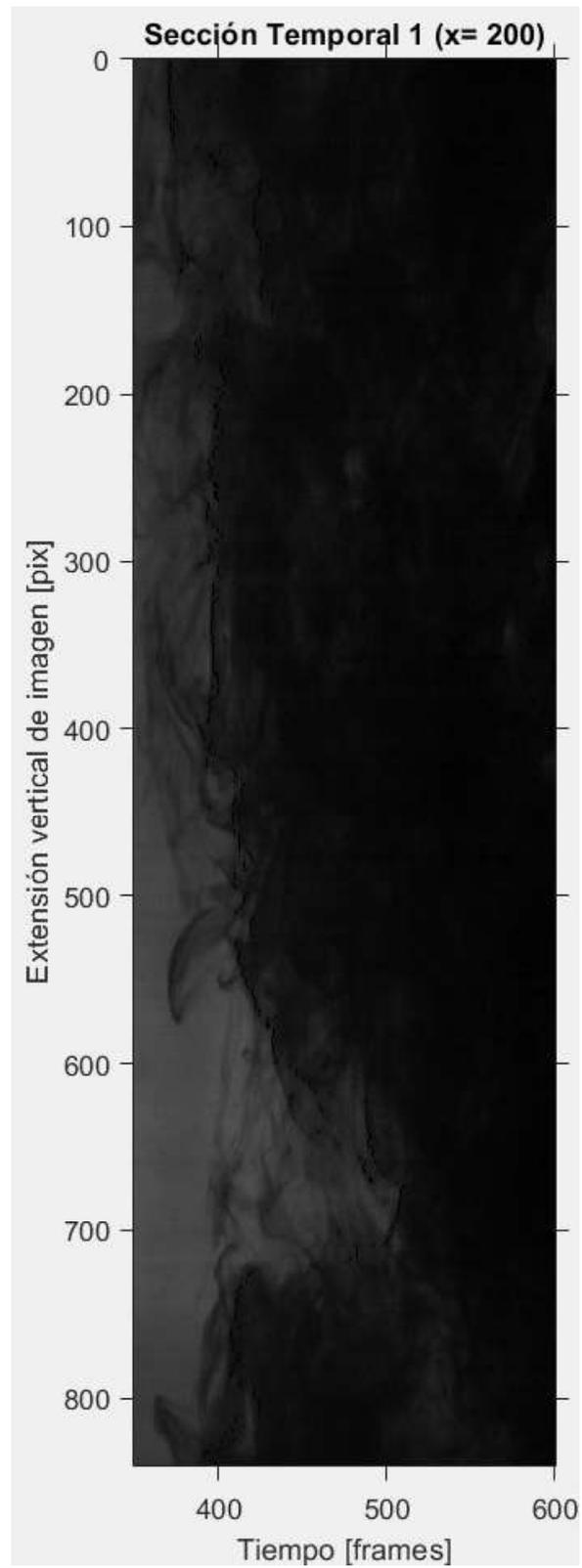
6.5.1.5 Video 5.

Tabla 6.9 Datos de Entrada para el Video 5 de la Prueba P-01

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 350 | 600 | 250 | 1 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 200 | 350 | 150 | 30.225 |

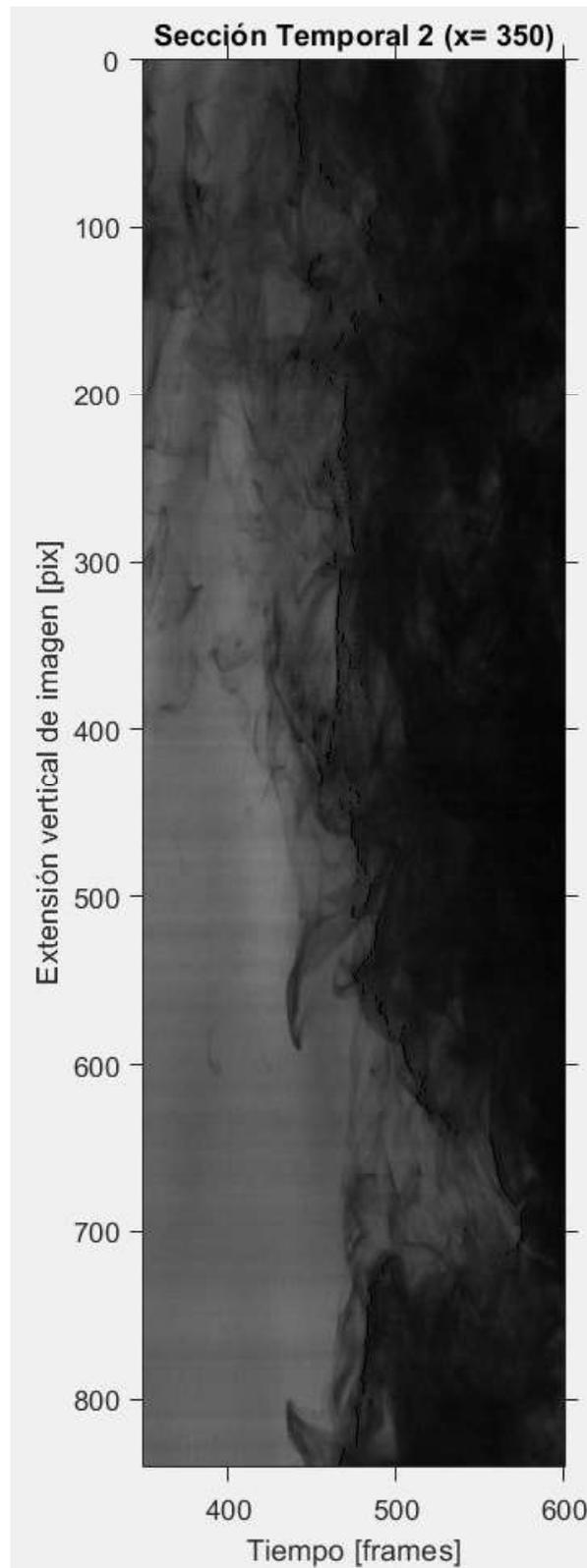
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.19 Sección Temporal 1 del Video 5 de la Prueba P-01.



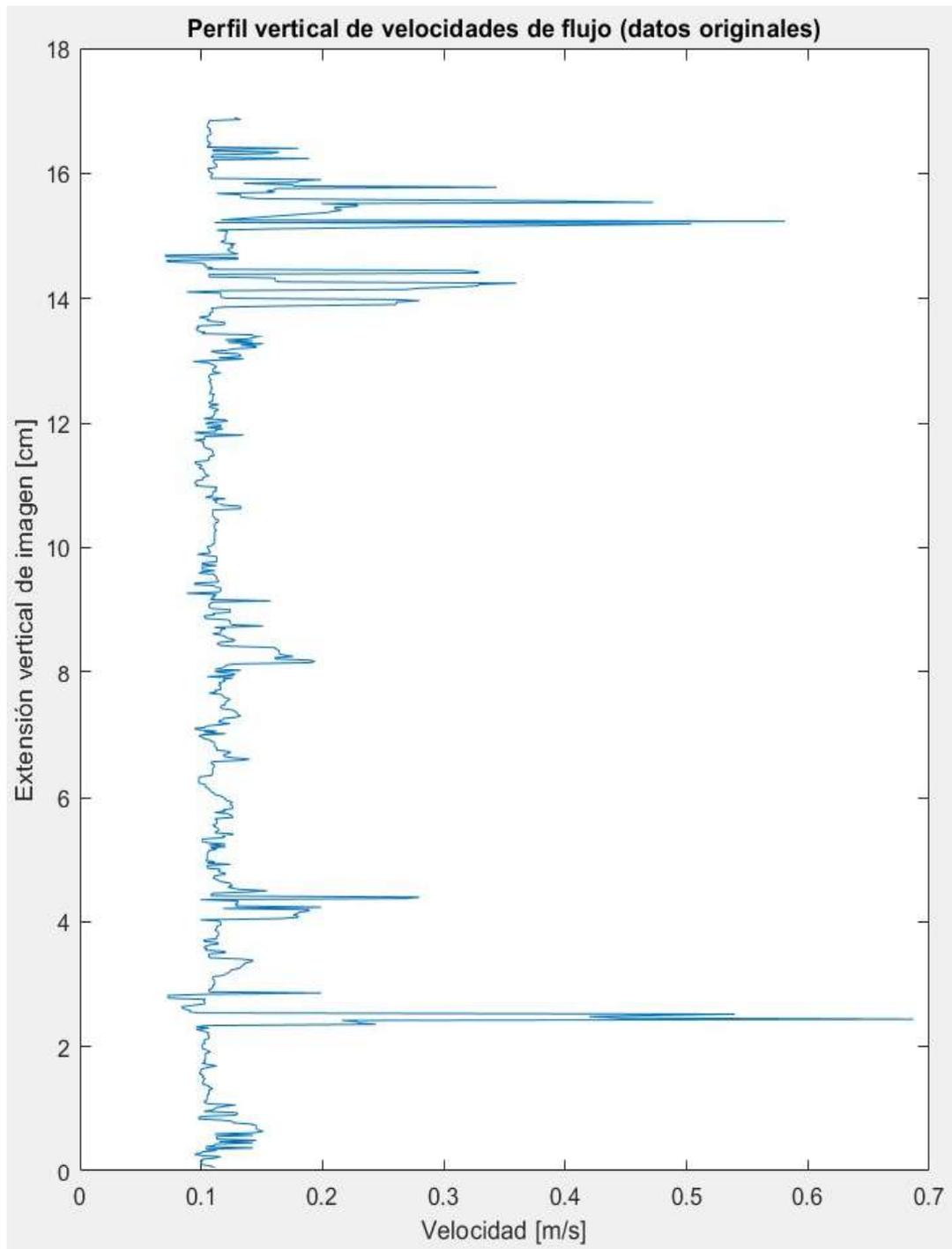
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.20 Sección Temporal 2 del Video 5 de la Prueba P-01



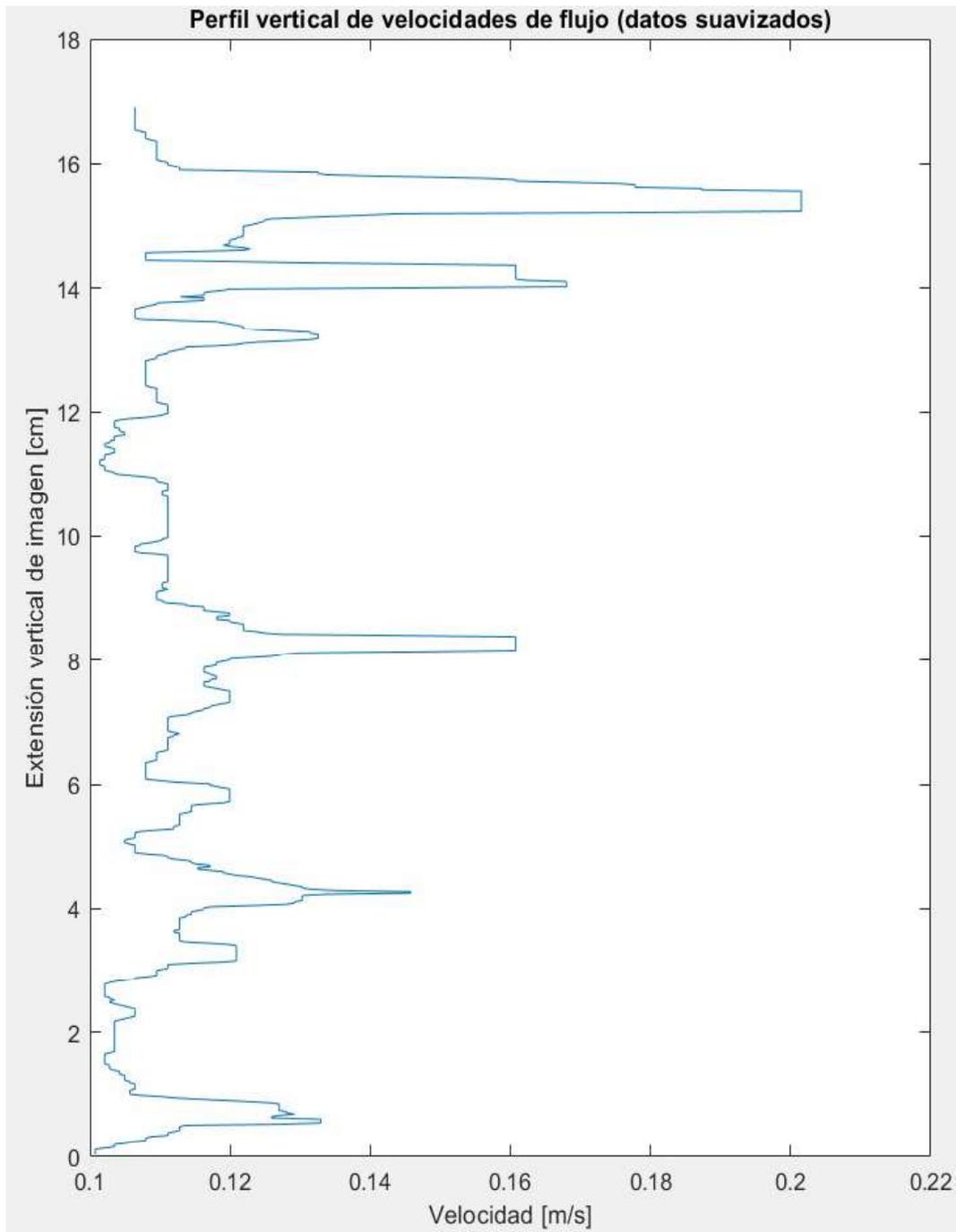
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.21 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 5 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.22 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 5 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.10 Resultados Finales para el Video 5 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1249 | 24 | 0.1165 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

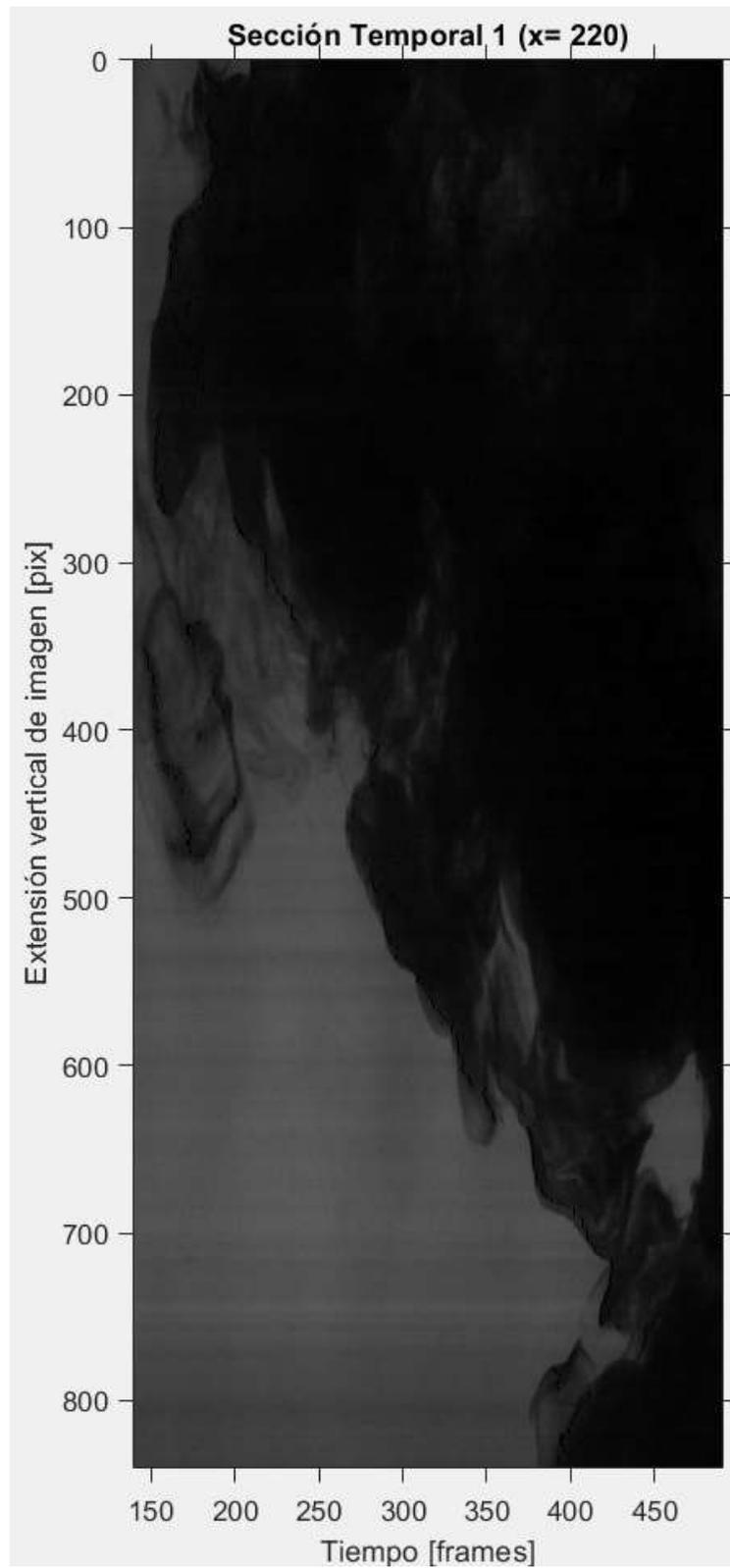
6.5.1.6 Video 6.

Tabla 6.11 Datos de Entrada para el Video 6 de la Prueba P-01

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 140 | 490 | 350 | 1.4 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 220 | 330 | 110 | 22.165 |

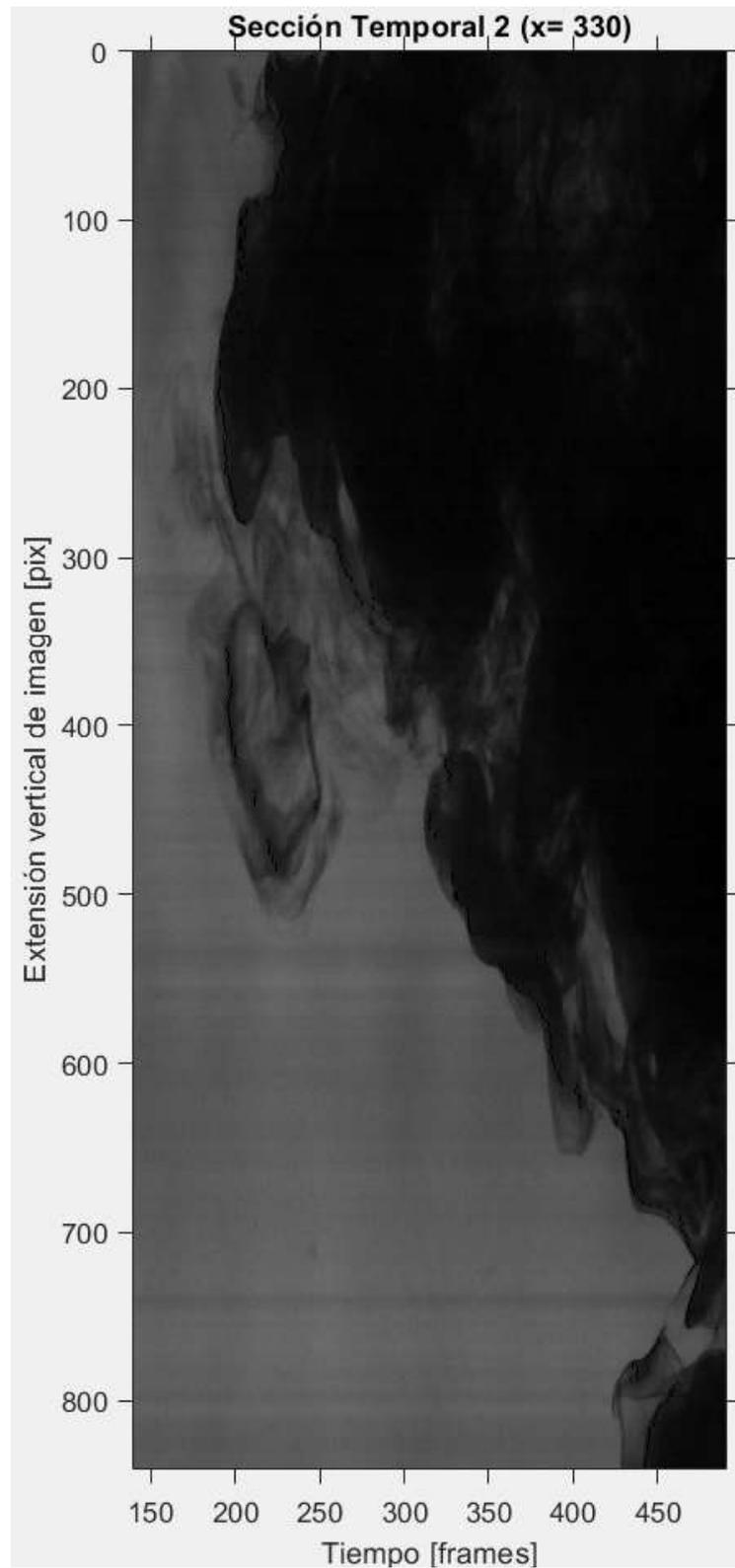
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.23 Sección temporal 1 del Video 6 de la Prueba P-01



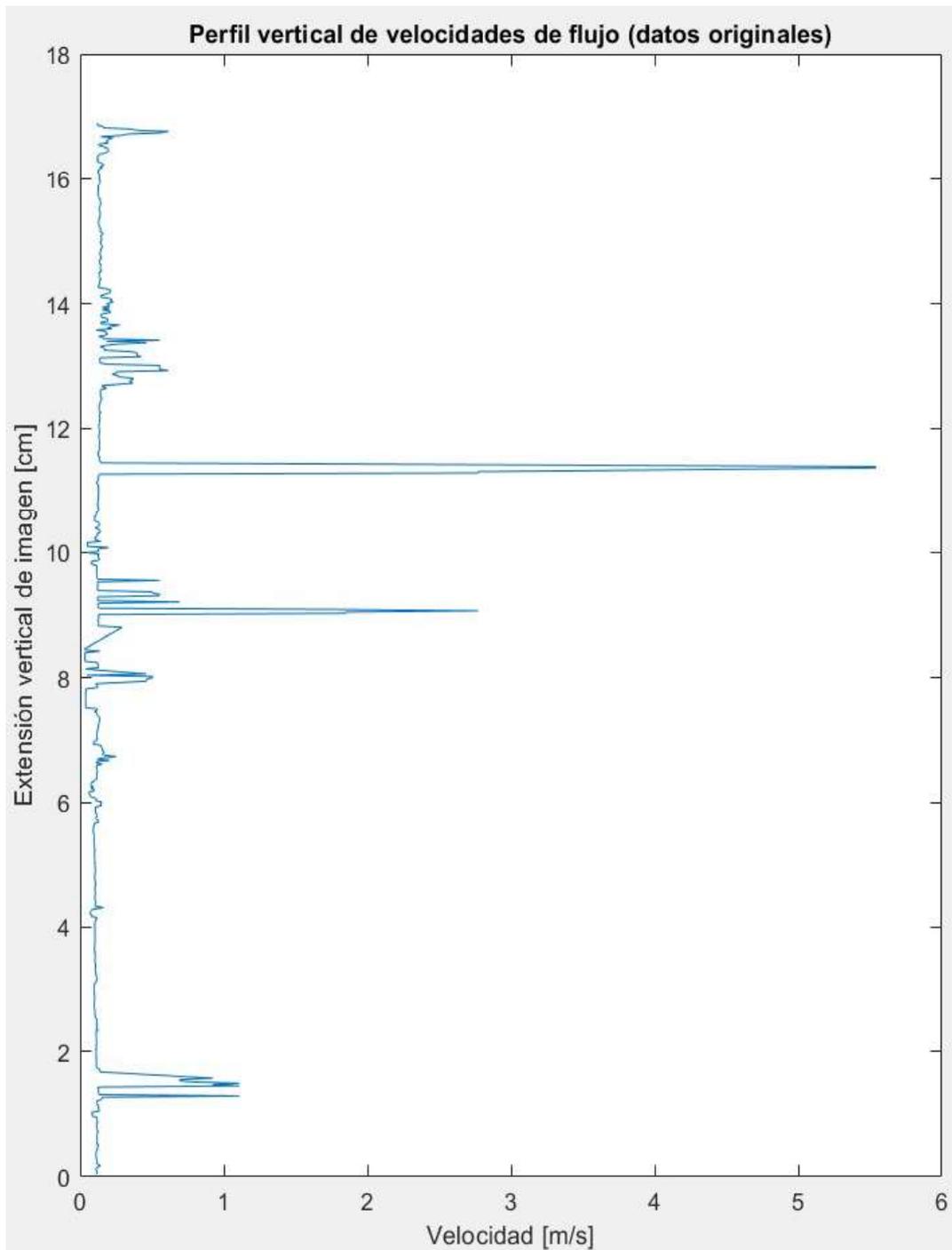
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.24 Sección Temporal 2 del Video 6 de la Prueba P-01



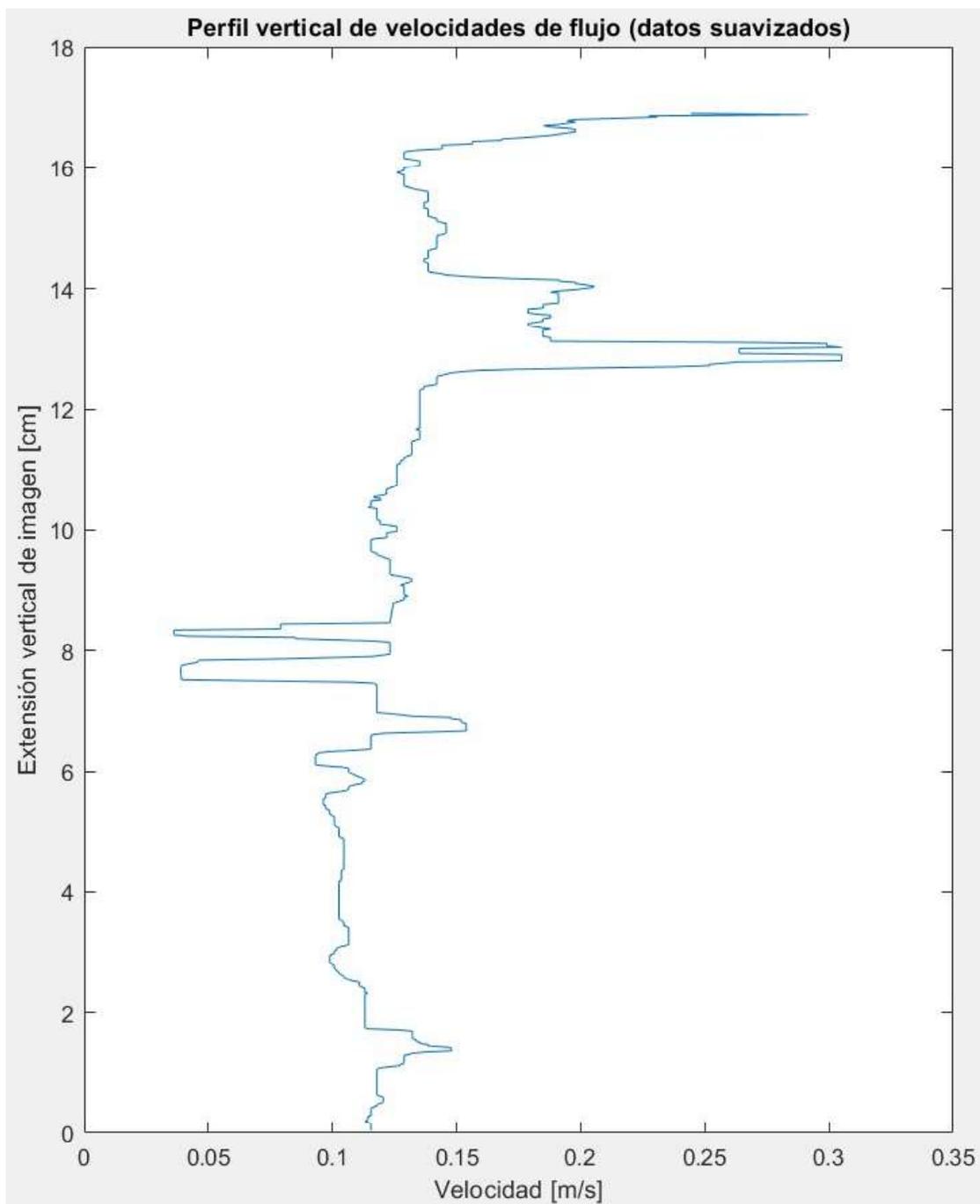
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.25 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 6 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.26 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 6 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.12 Resultados Finales para el Video 6 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1765 | 20 | 0.129 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

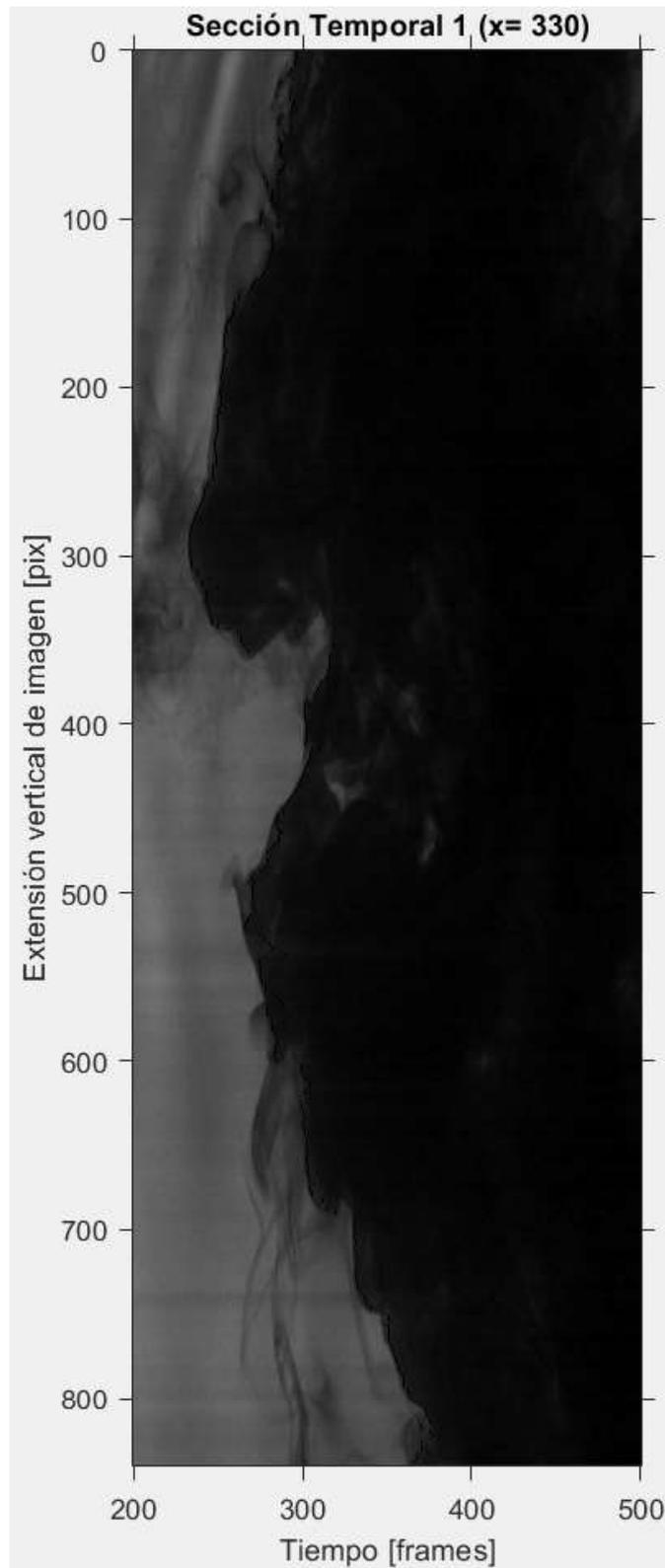
6.5.1.7 Video 8.

Tabla 6.13 Datos de Entrada para el Video 8 de la Prueba P-01

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 200 | 500 | 300 | 1.2 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 330 | 430 | 100 | 20.15 |

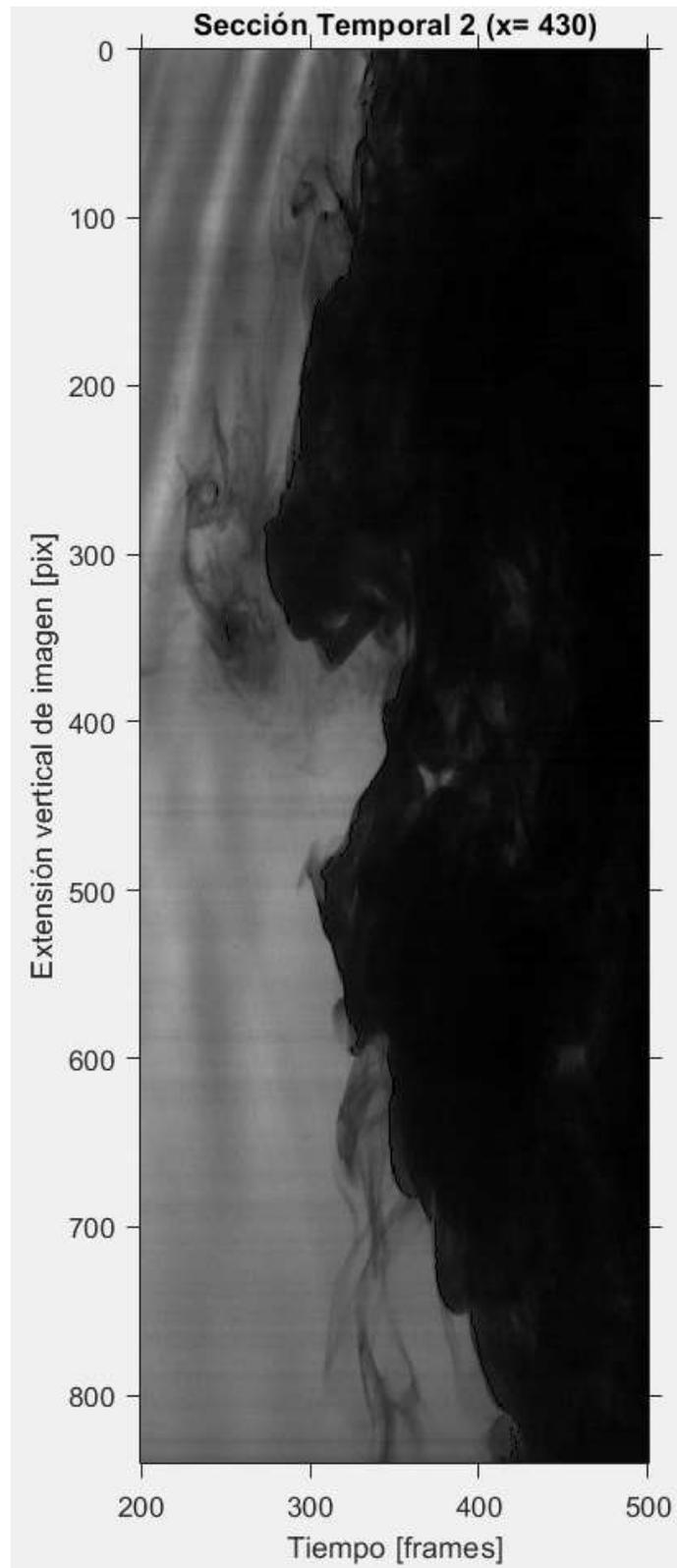
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.27 Sección Temporal 1 del Video 8 de la Prueba P-01



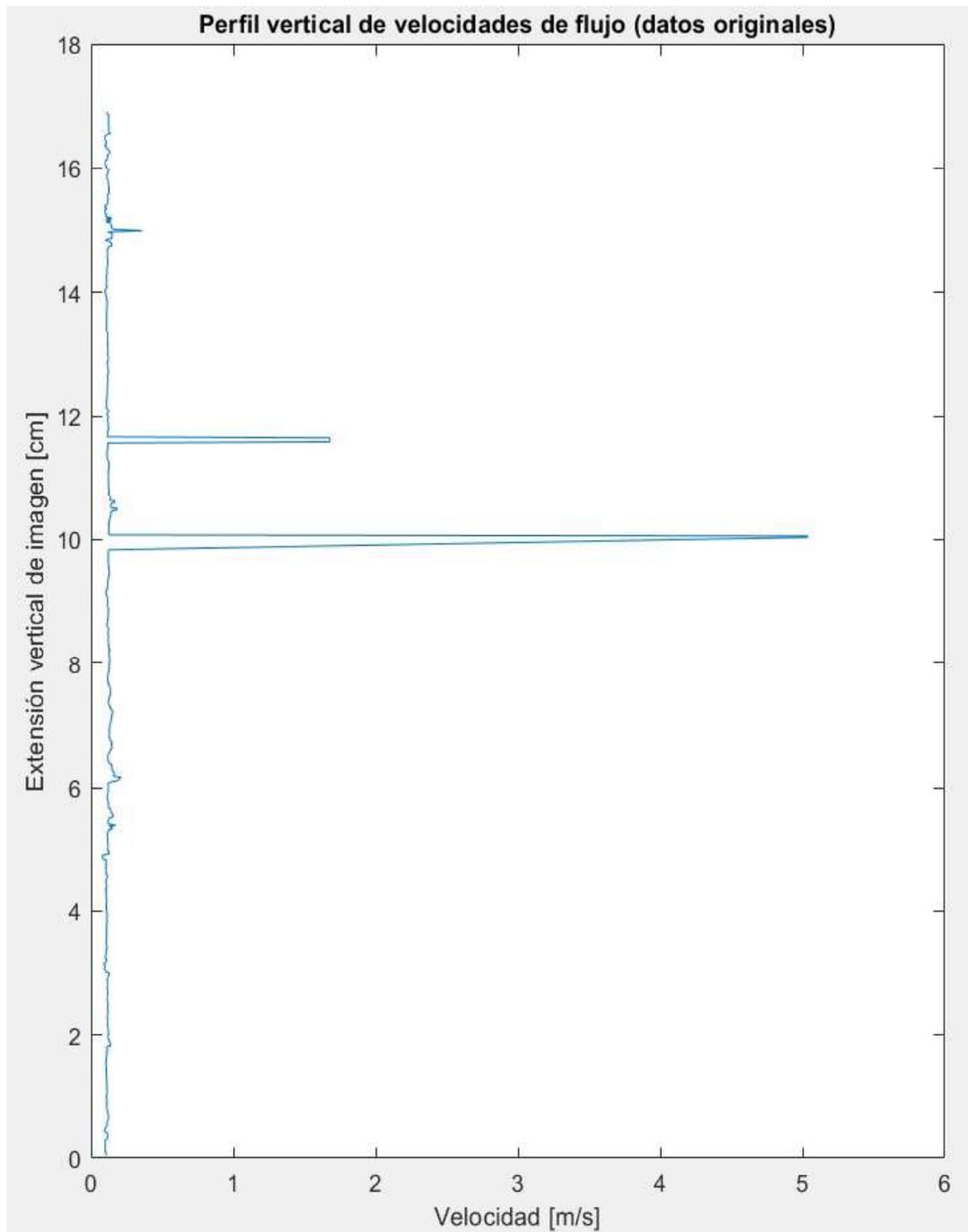
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.28 Sección Temporal 2 del Video 8 de la Prueba P-01



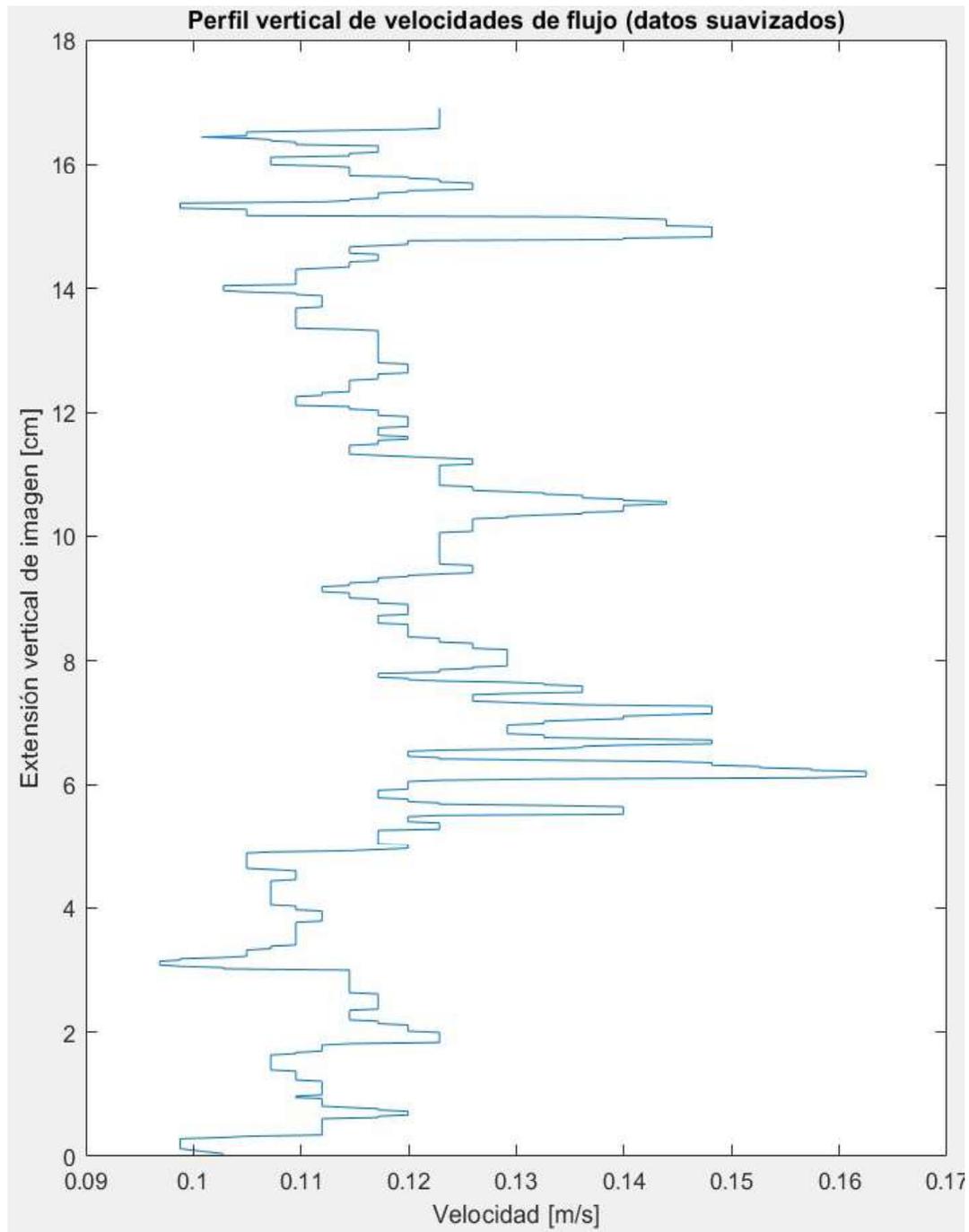
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.29 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 8 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.30 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 8 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.14 Resultados Finales para el Video 8 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1389 | 9 | 0.1186 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

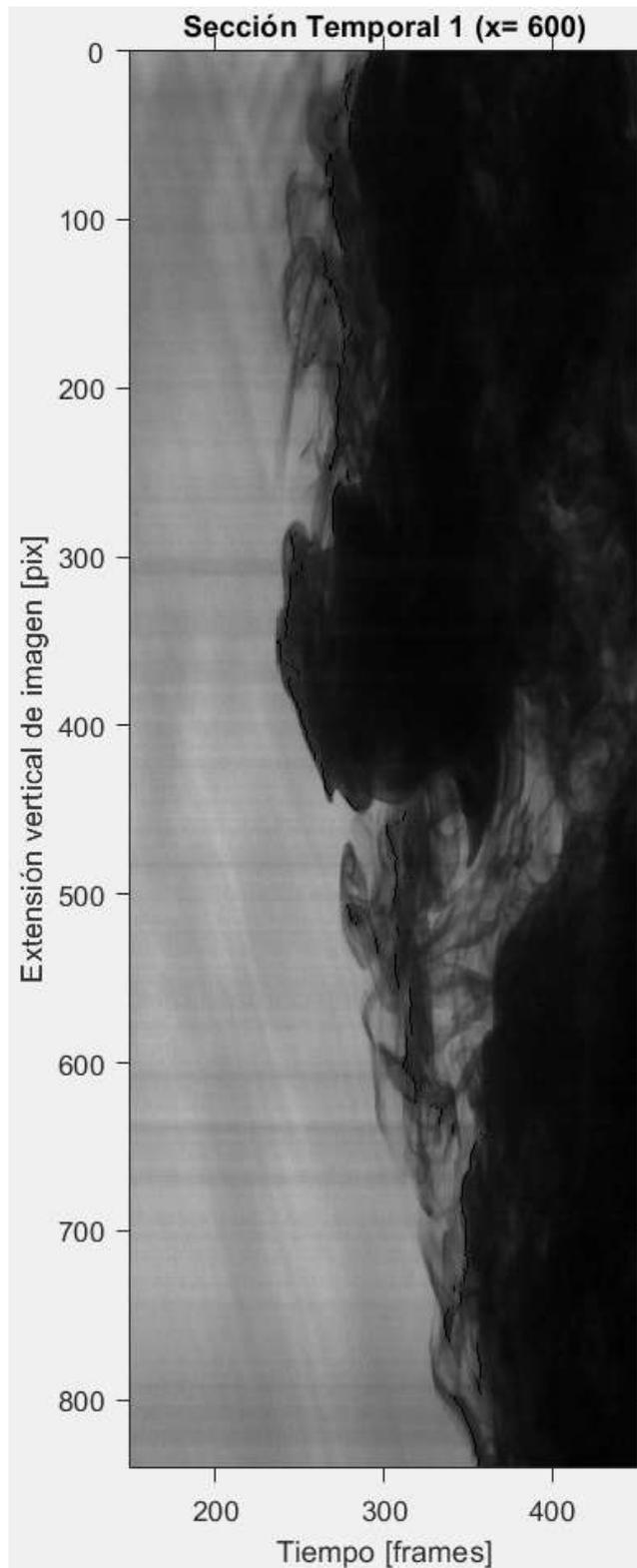
6.5.1.8 Video 9.

Tabla 6.15 Datos de Entrada para el Video 9 de la Prueba P-01

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 150 | 450 | 300 | 1.2 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 48 | 886 | 838 | 168.857 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 600 | 700 | 100 | 20.15 |

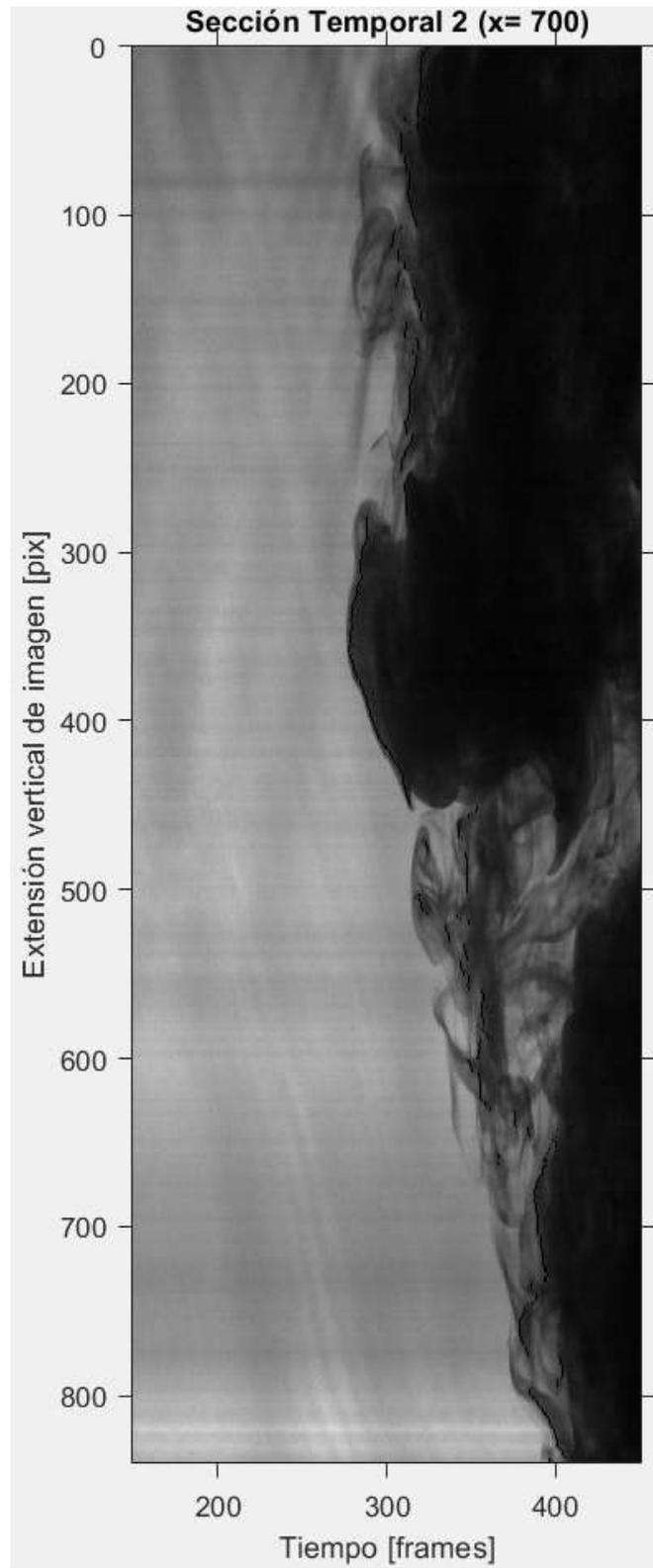
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.31 Sección Temporal 1 del Video 9 de la Prueba P-01



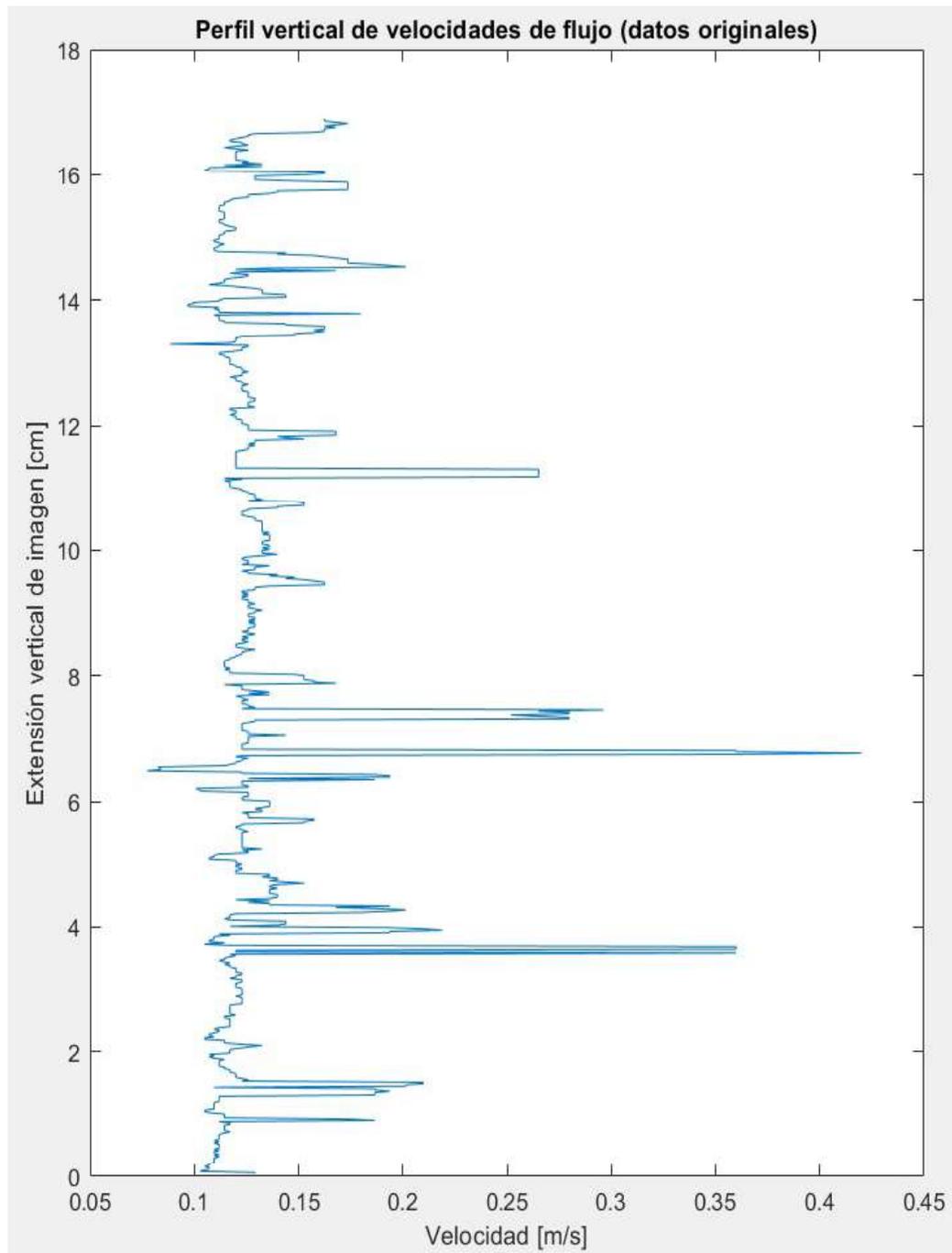
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.32 Sección Temporal 2 del Video 9 de la Prueba P-01



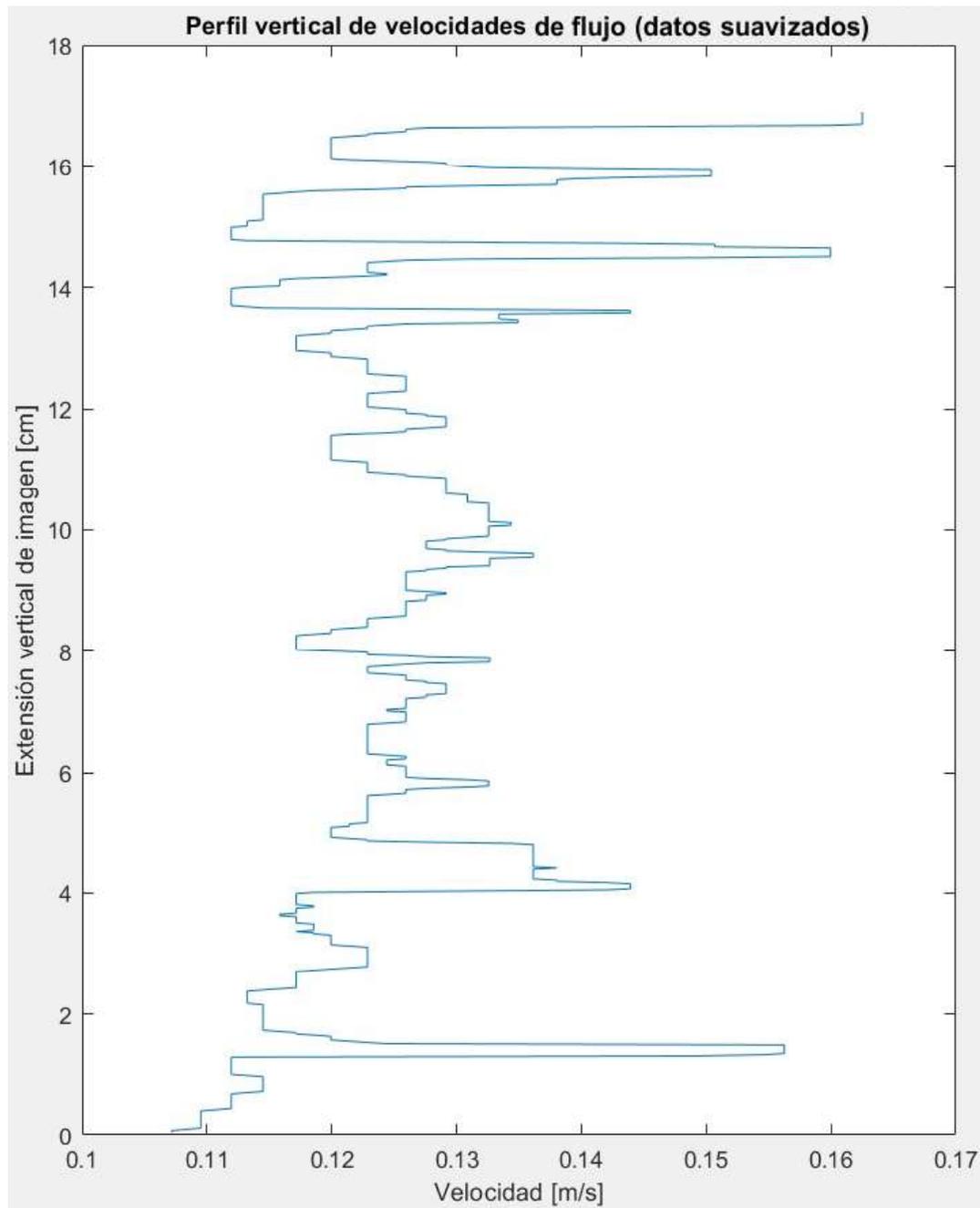
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.33 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 9 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.34 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 9 de la Prueba P-01



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.16 Resultados Finales para el Video 9 de la Prueba P-01

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.1321 | 20 | 0.1244 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

6.5.2 P-02

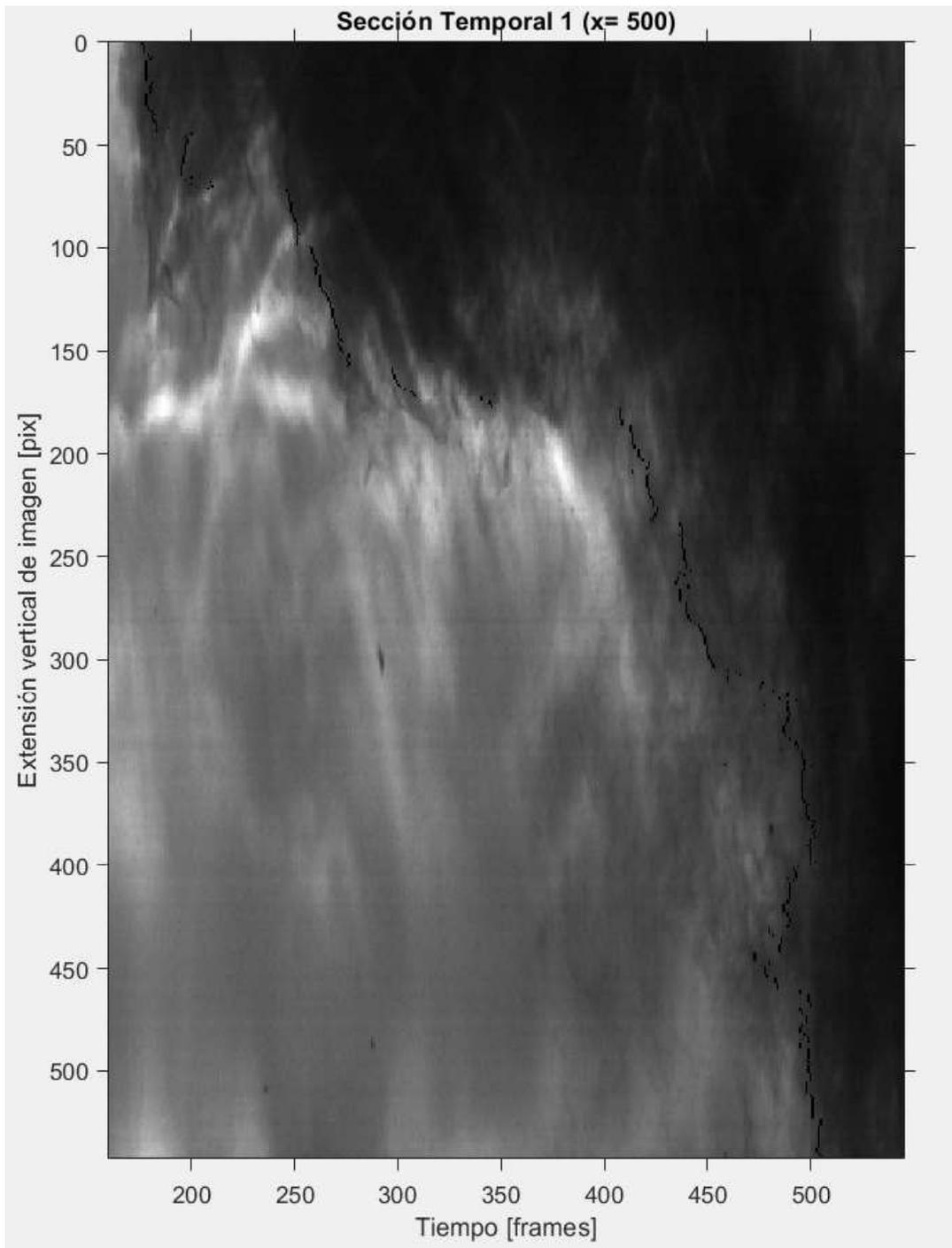
6.5.2.1 Video 1.

Tabla 6.17 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-02

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 160 | 545 | 385 | 0.77 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 230 | 770 | 540 | 124.74 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 500 | 600 | 100 | 23.1 |

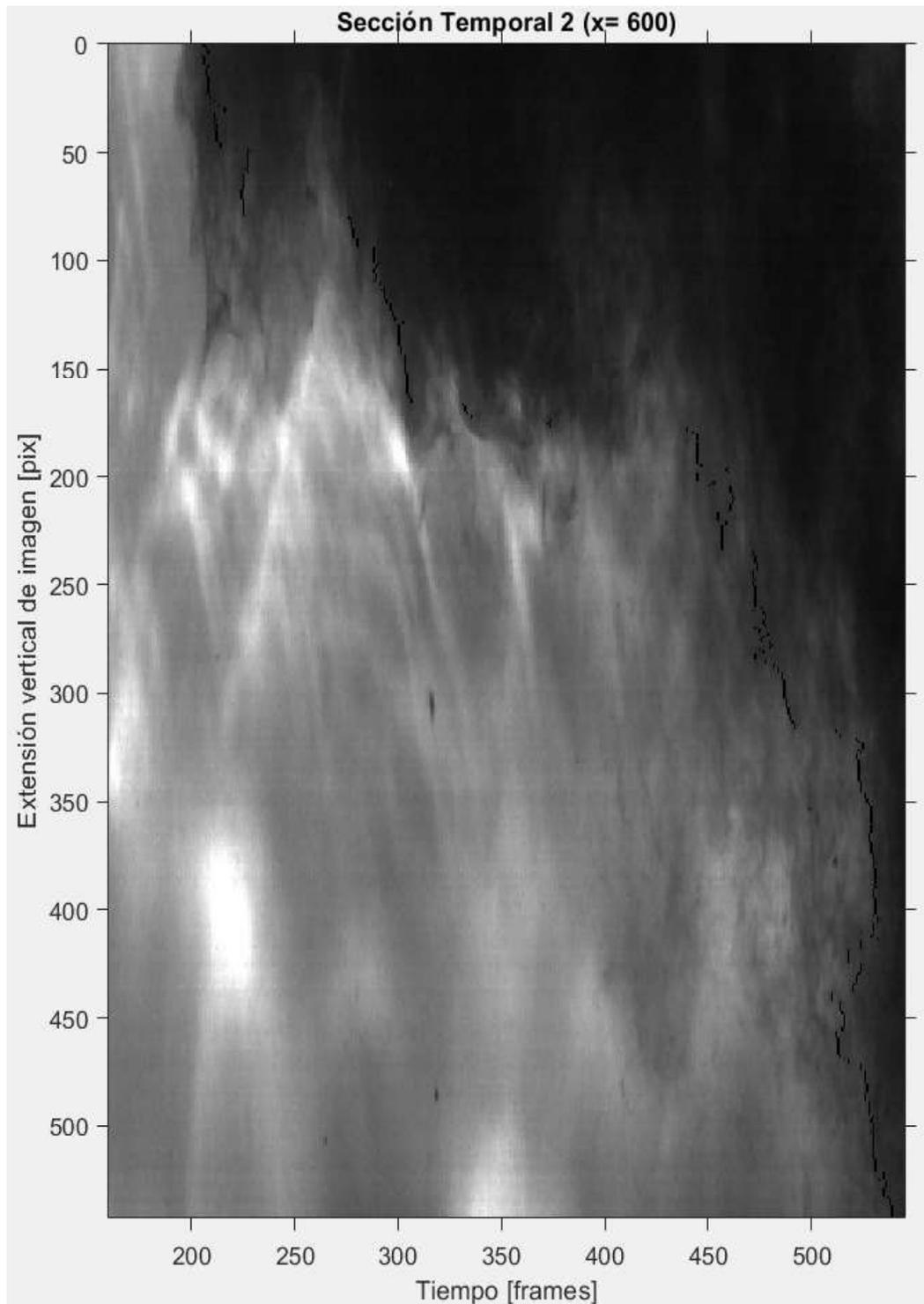
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.35 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-02



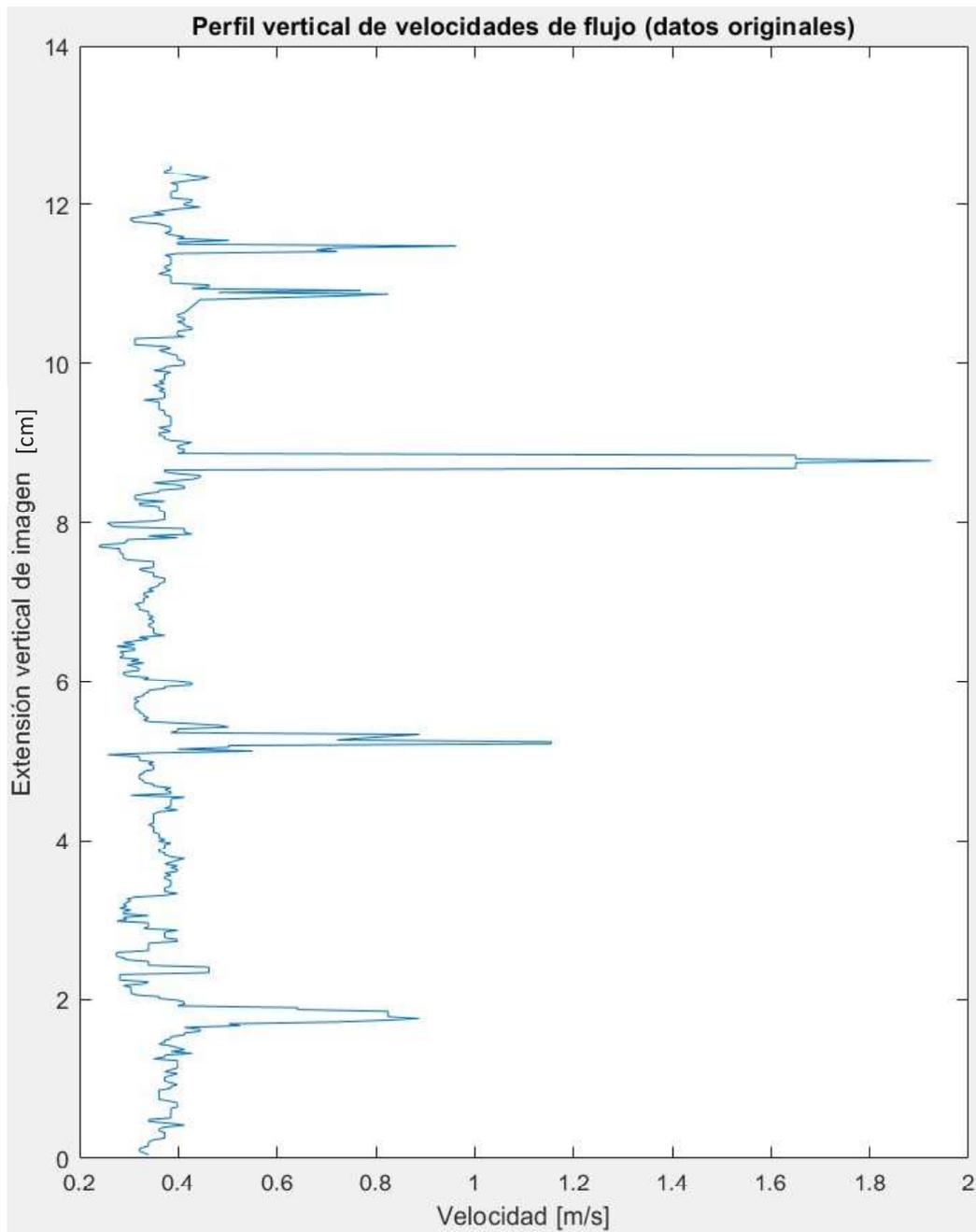
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.36 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-02



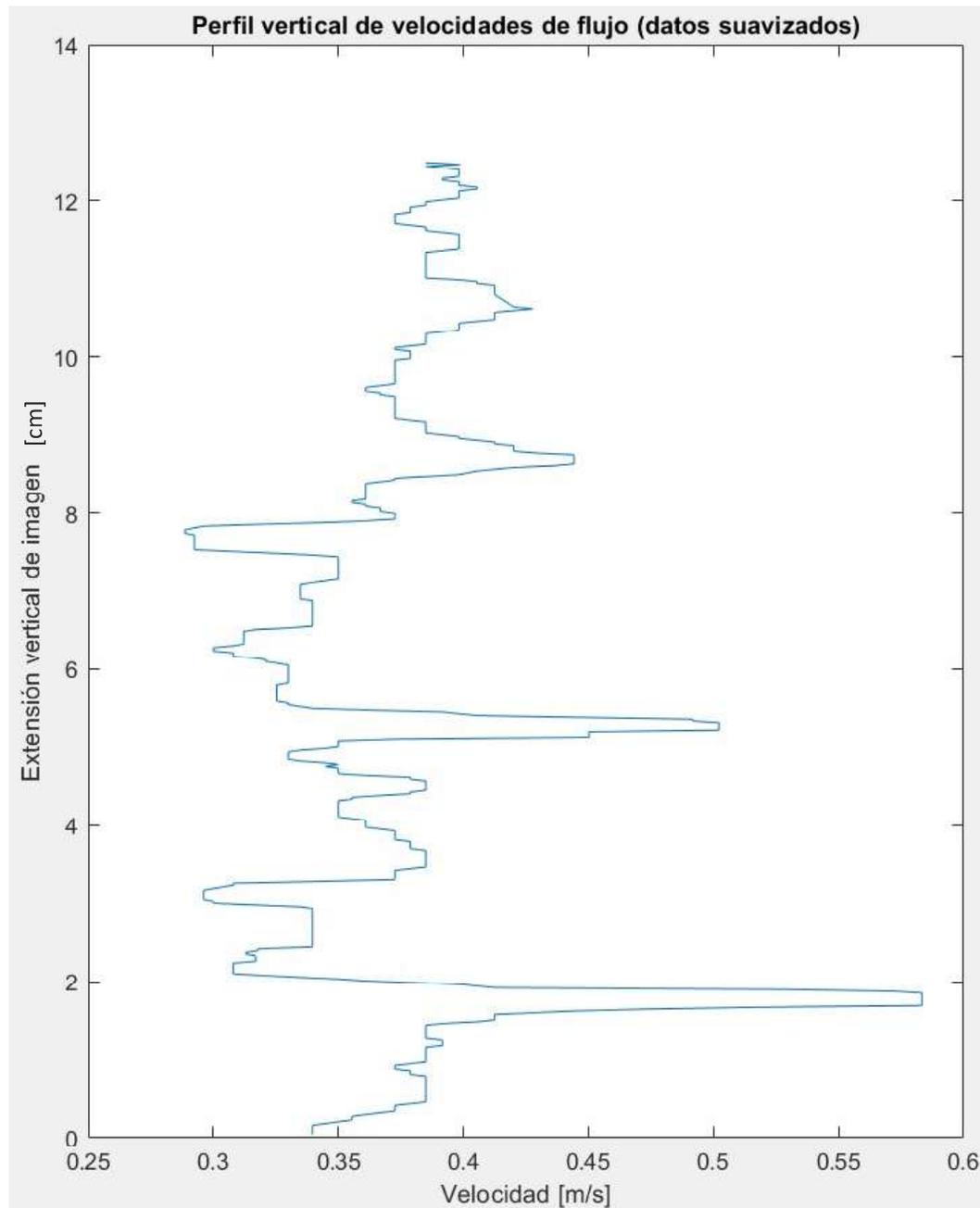
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.37 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.38 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.18 Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-02

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.4023 | 18 | 0.3705 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

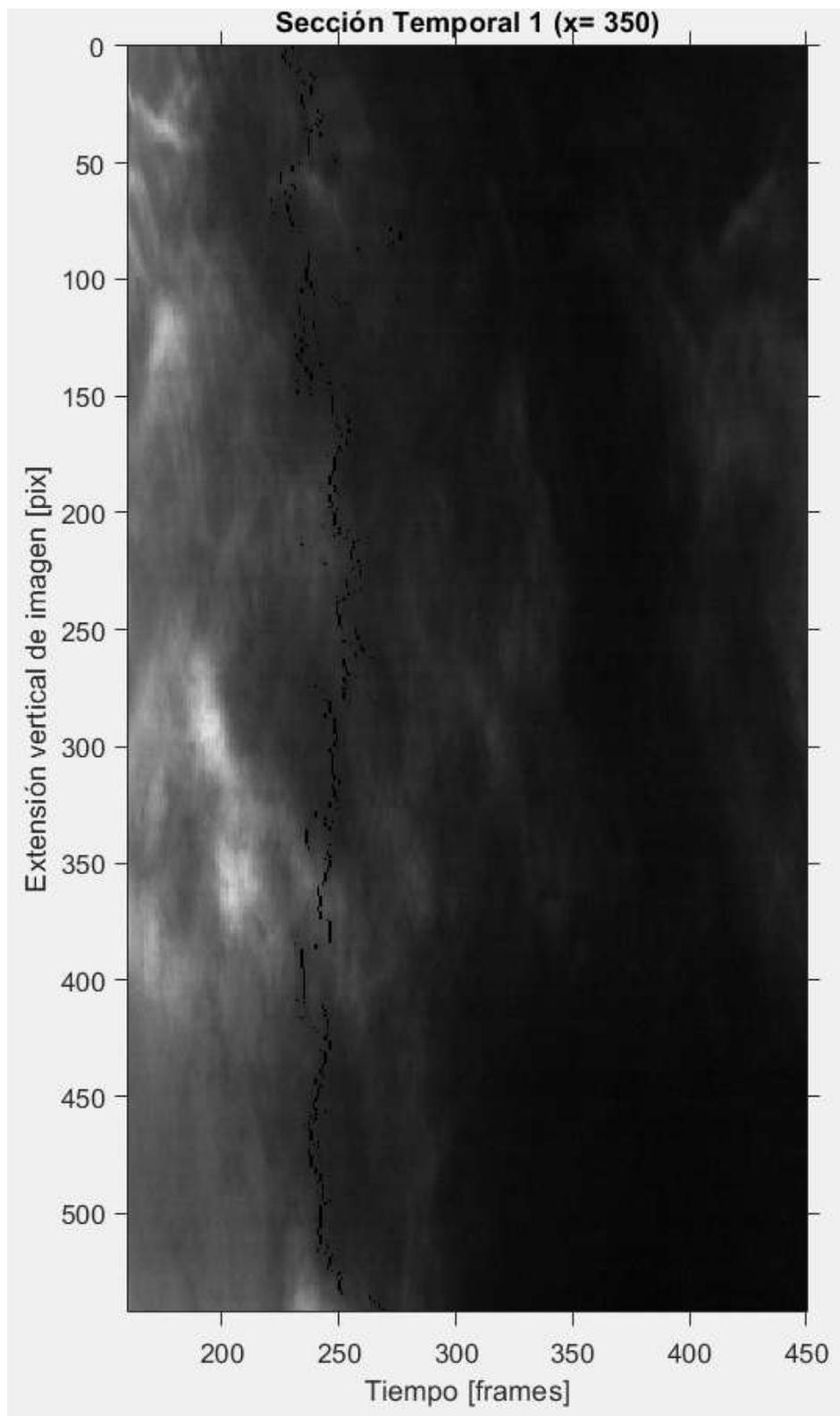
6.5.2.2 Video 2

Tabla 6.19 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-02

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 160 | 450 | 290 | 0.58 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 230 | 770 | 540 | 124.74 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 350 | 650 | 300 | 69.3 |

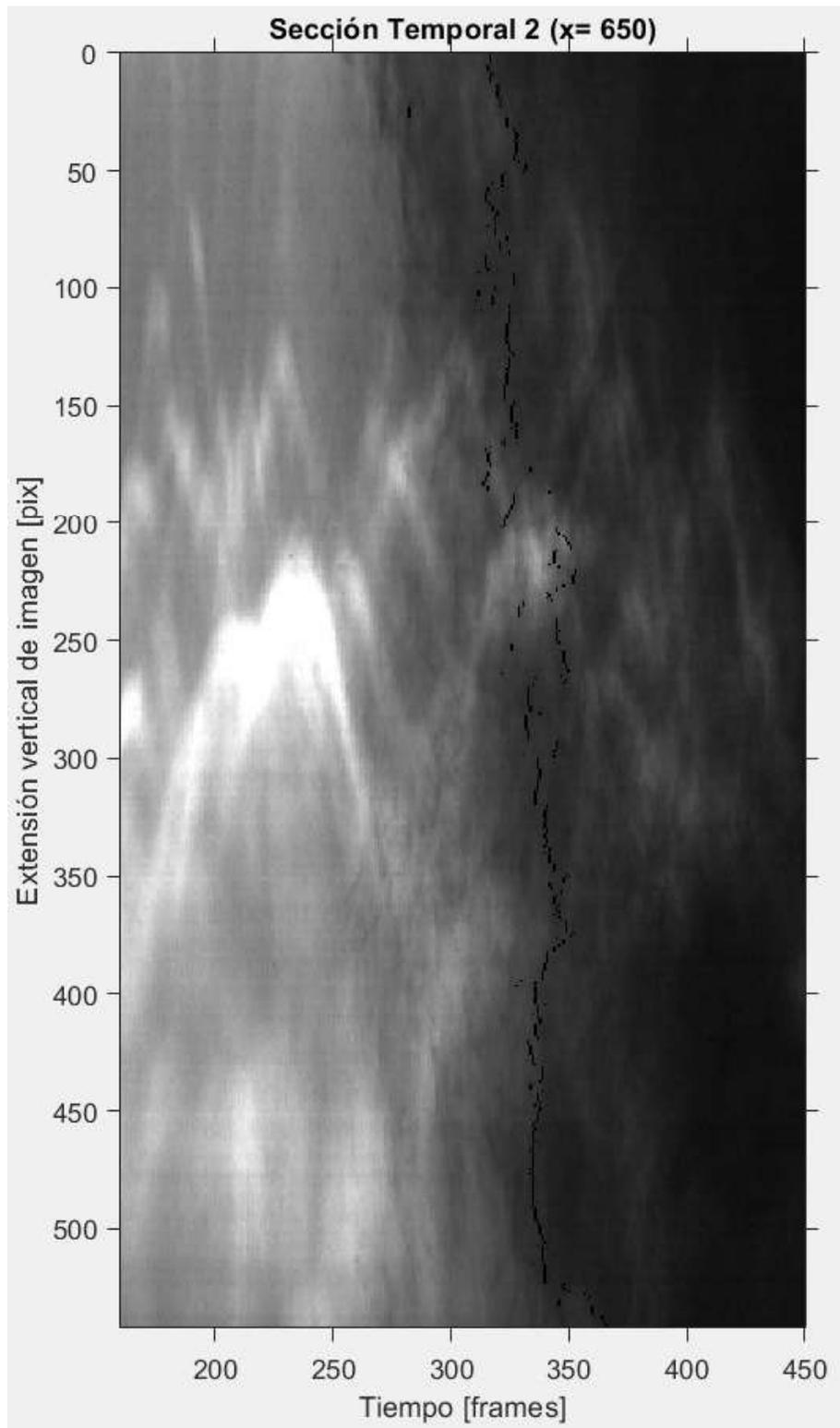
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.39 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-02



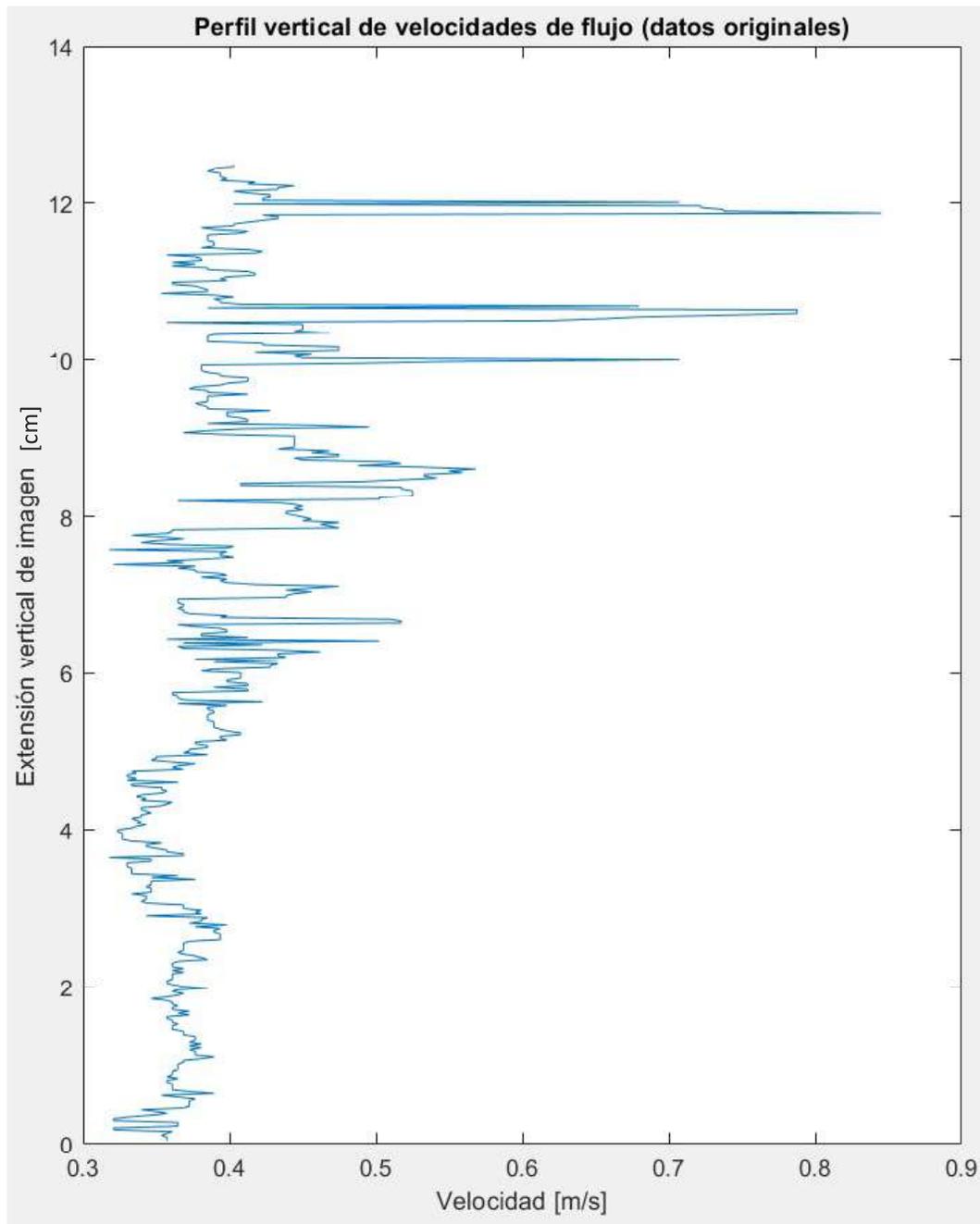
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.40 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-02



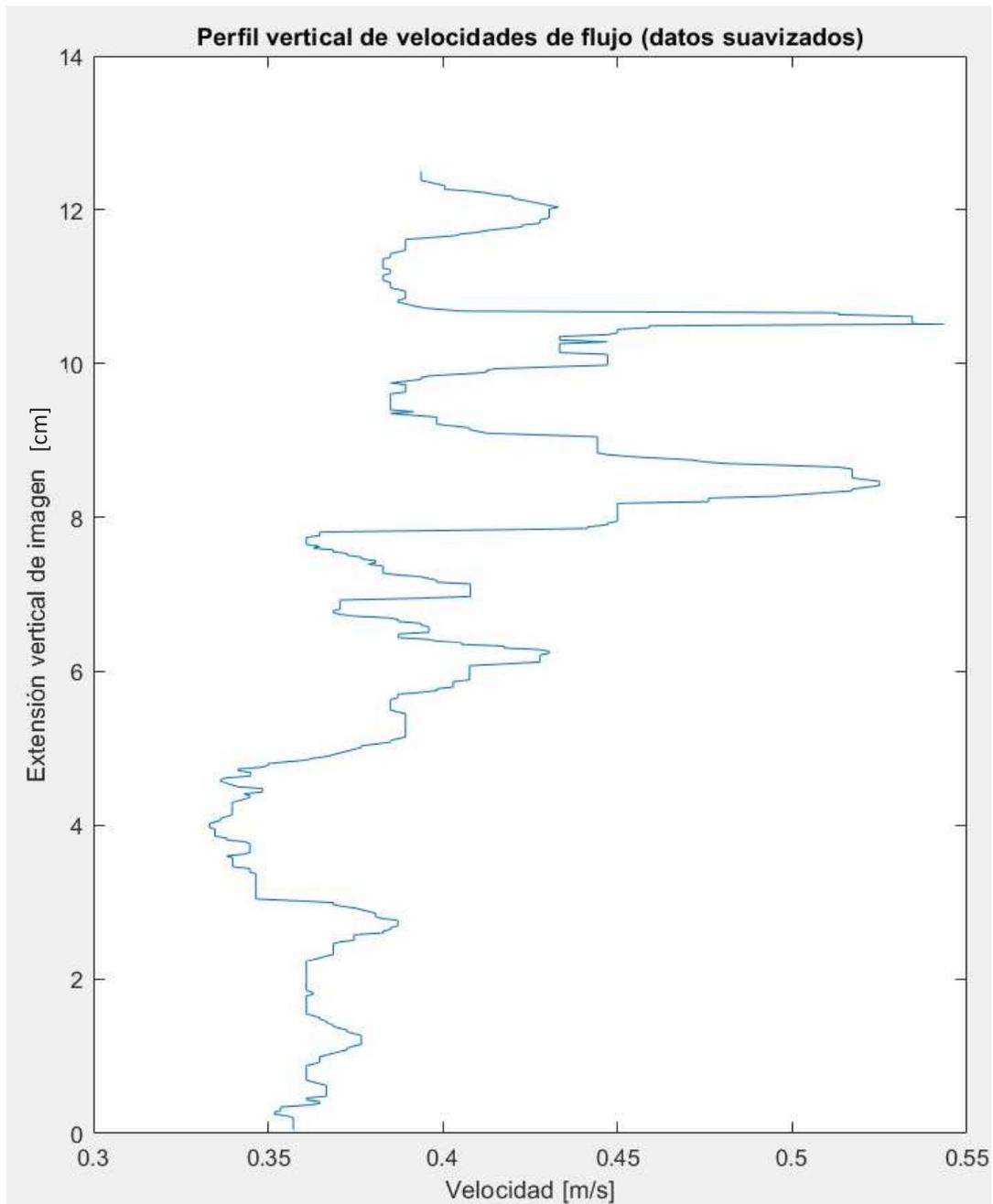
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.41 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.42 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.20 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-02

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.399 | 16 | 0.392 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

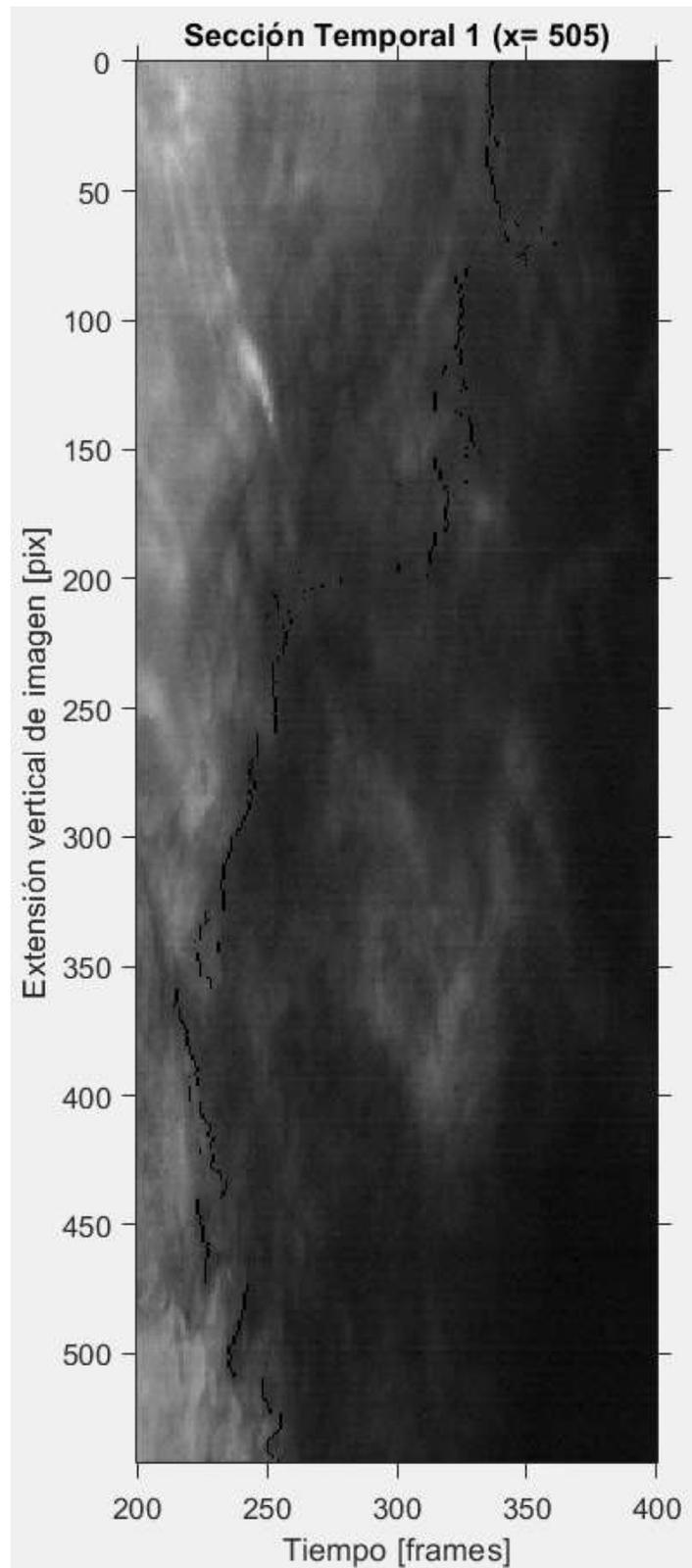
6.5.2.3 Video 3.

Tabla 6.21 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-02

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 200 | 400 | 200 | 0.4 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 230 | 770 | 540 | 124.74 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 505 | 605 | 100 | 23.1 |

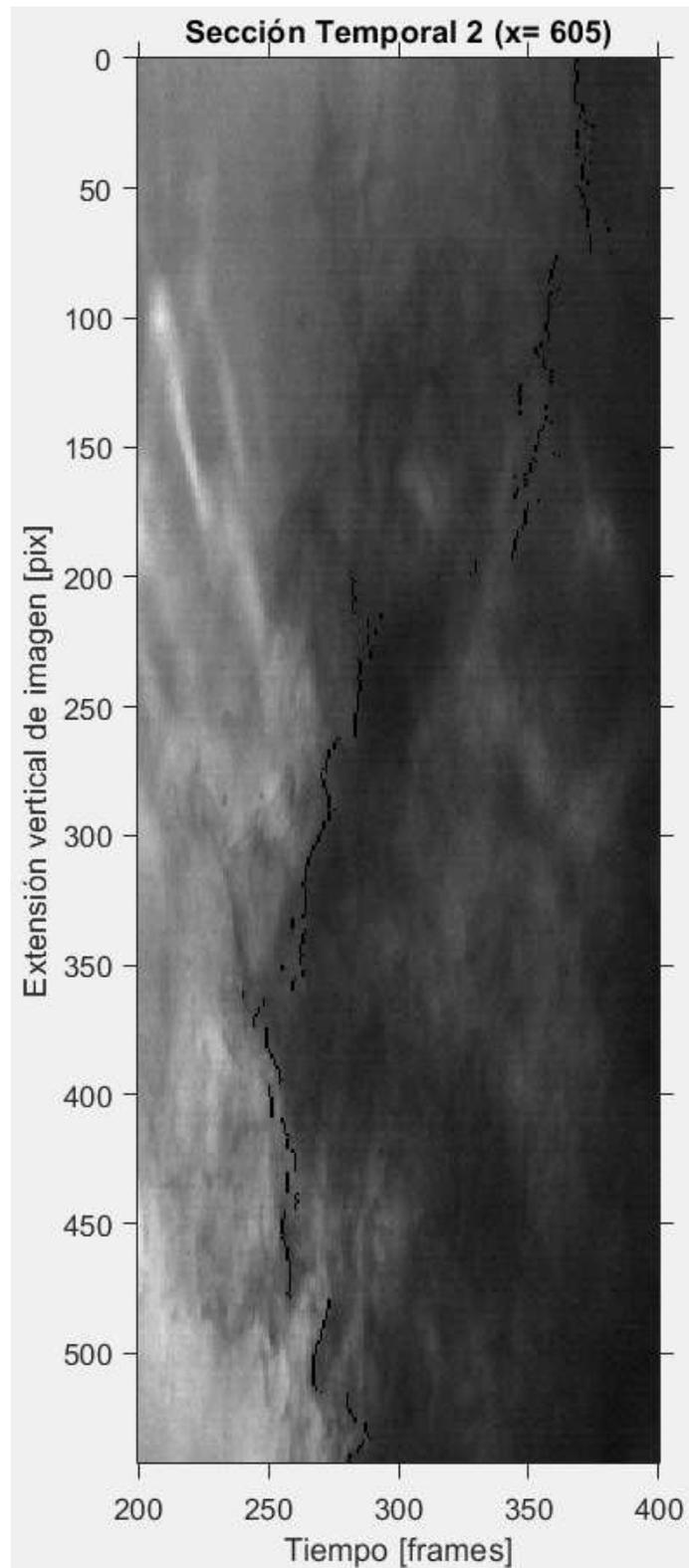
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.43 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-02



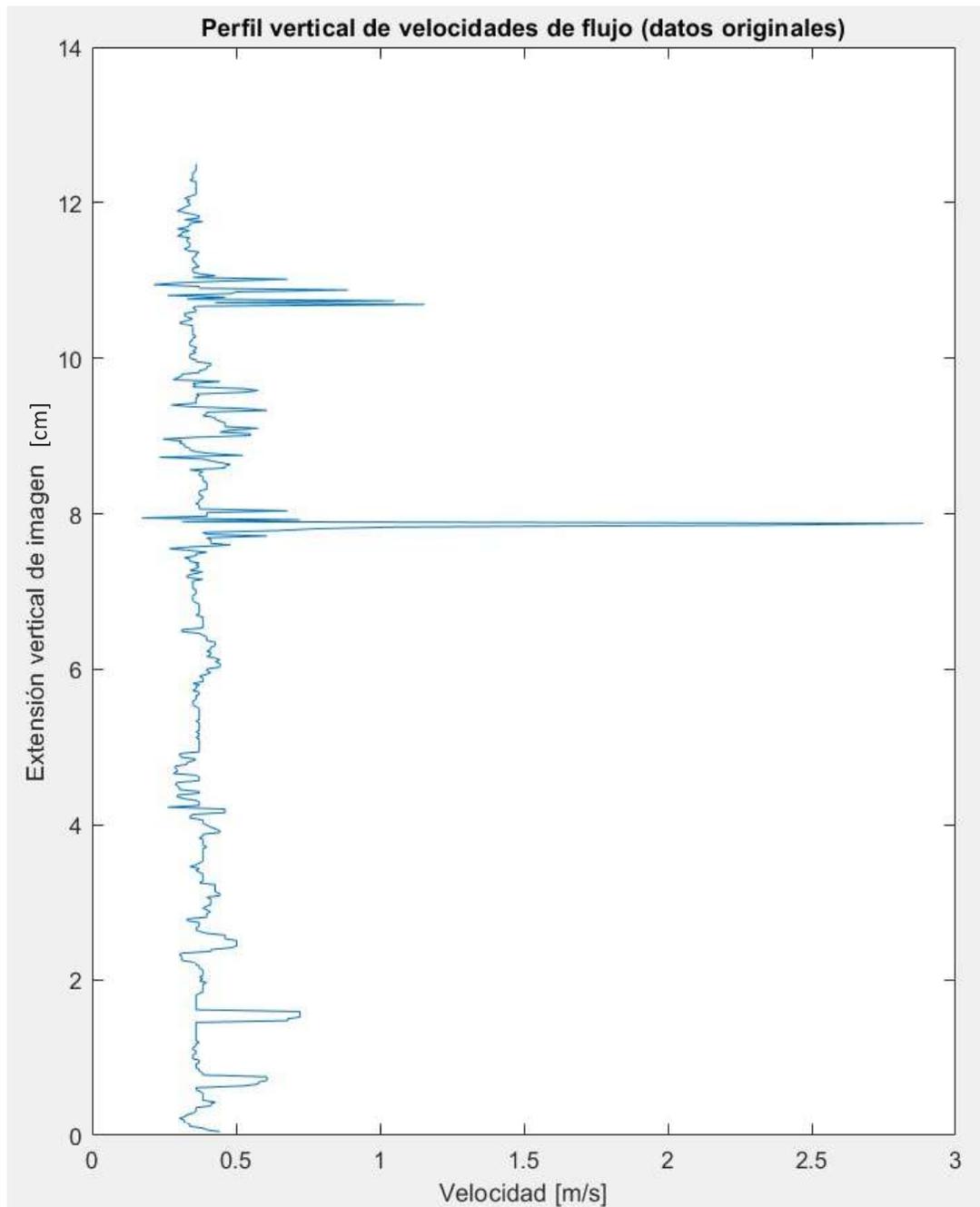
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.44 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-02



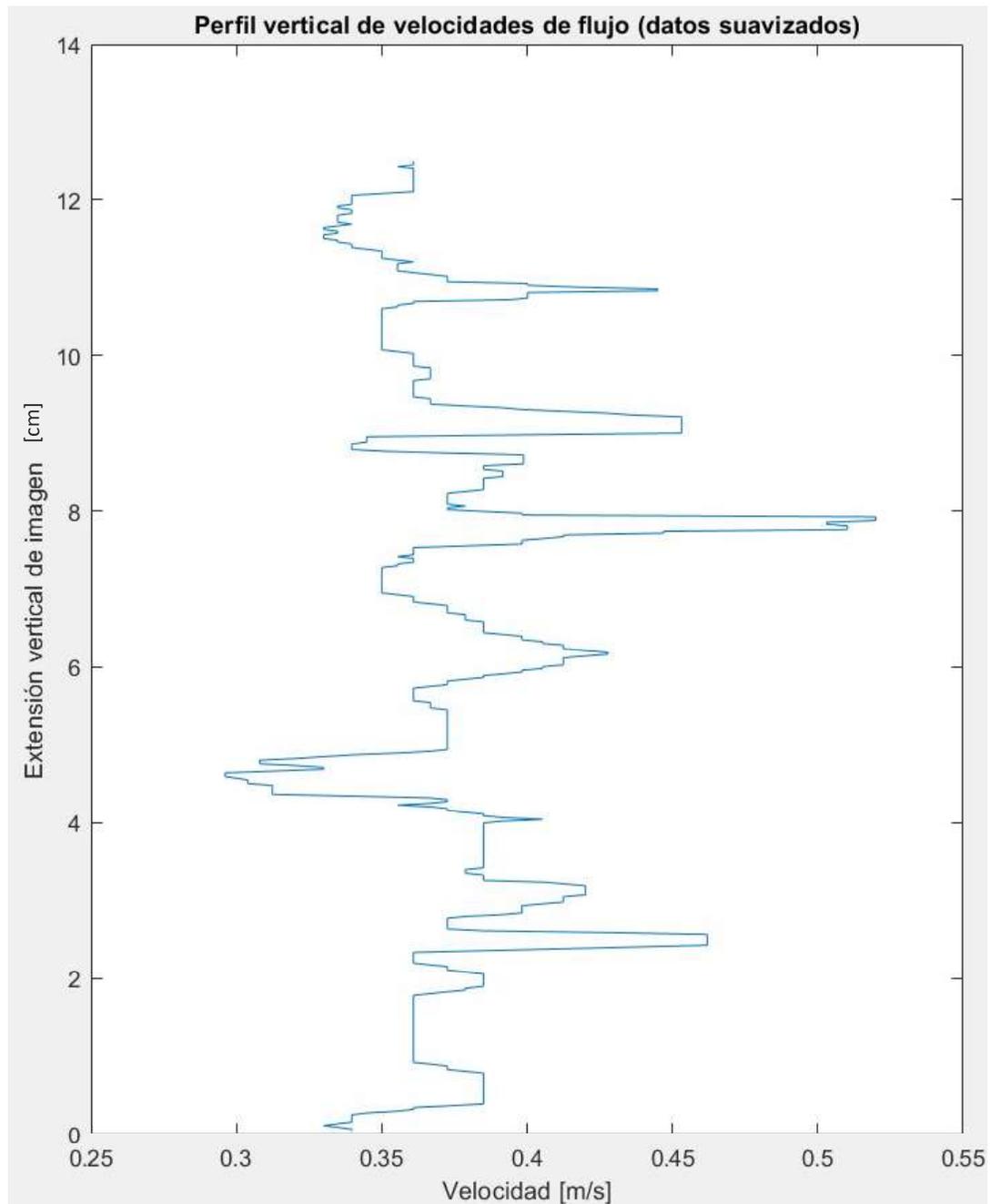
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.45 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.46 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-02



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.22 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-02

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 0.3951 | 14 | 0.374 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

6.5.3 P-03

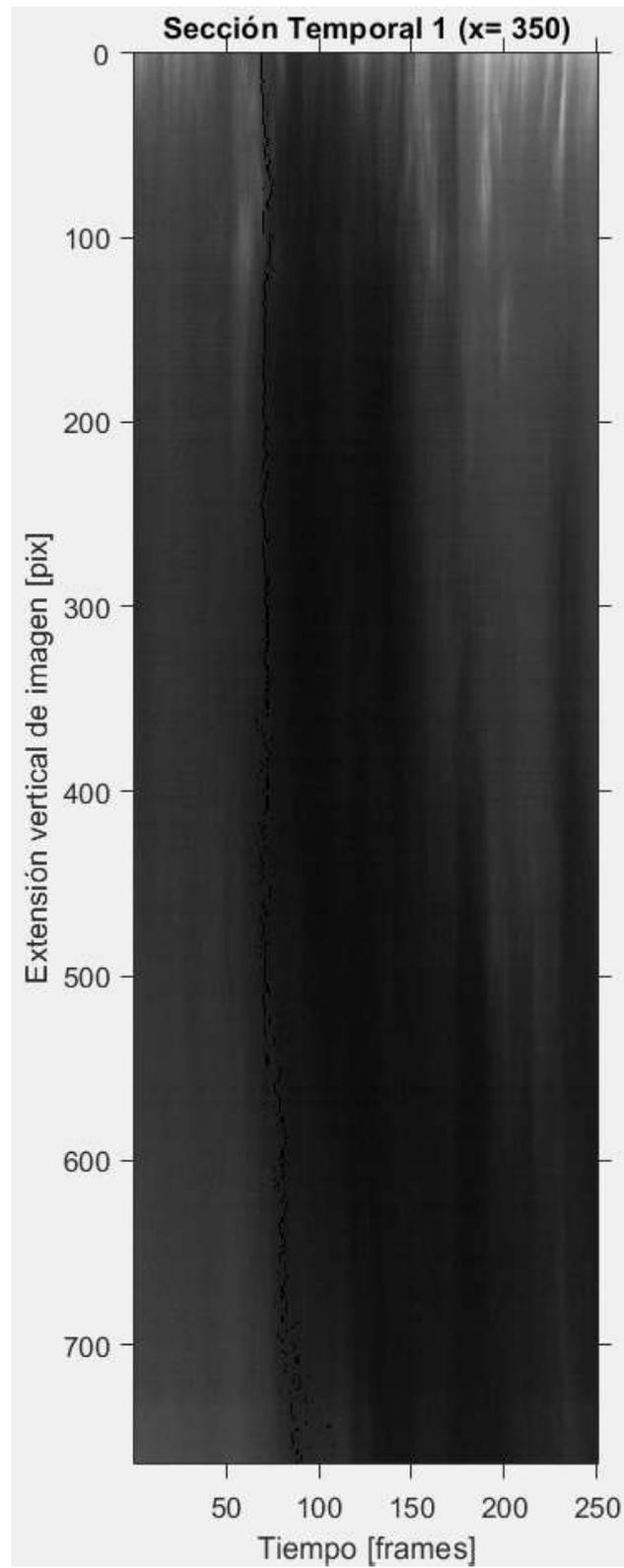
6.5.3.1 Video 1.

Tabla 6.23 Datos de Entrada para el Video 1 de la Prueba P-03

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 1 | 250 | 249 | 0.498 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 110 | 872 | 762 | 89.92 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 350 | 600 | 250 | 29.5 |

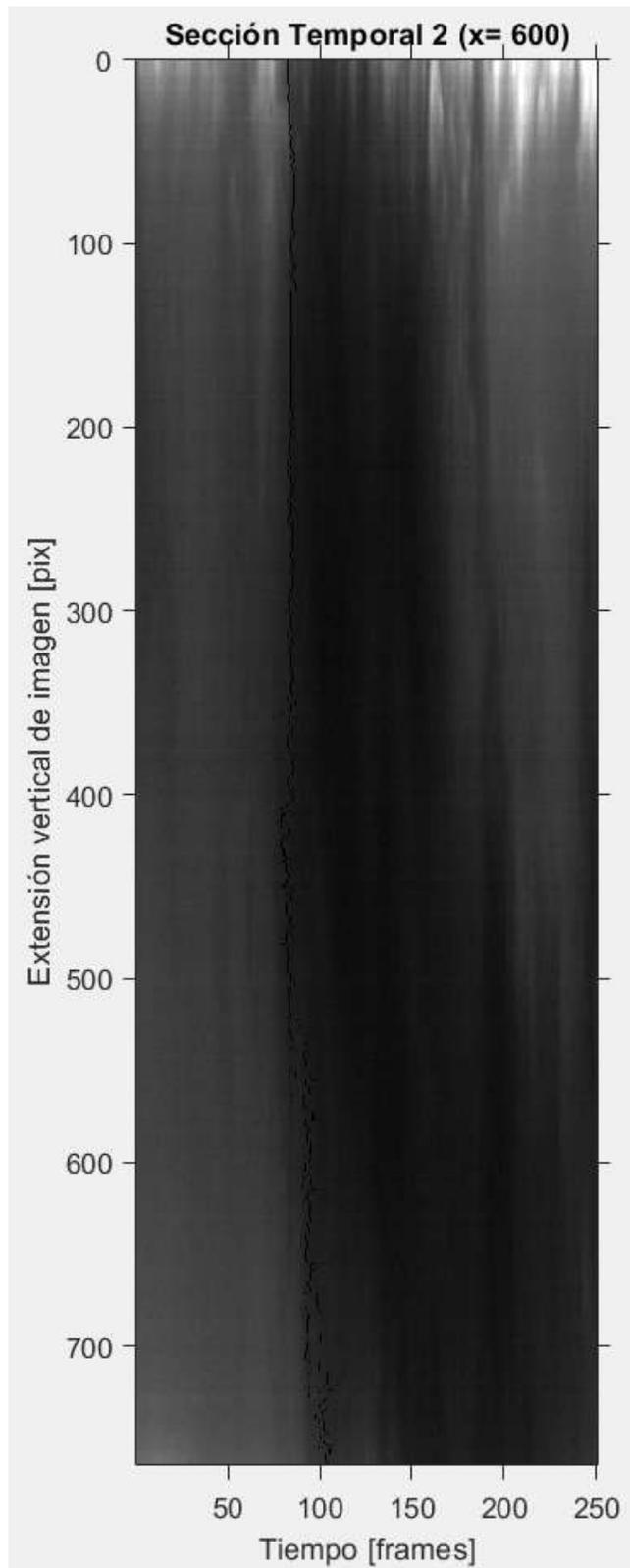
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.47 Sección Temporal 1 del Video 1 de la Prueba P-03



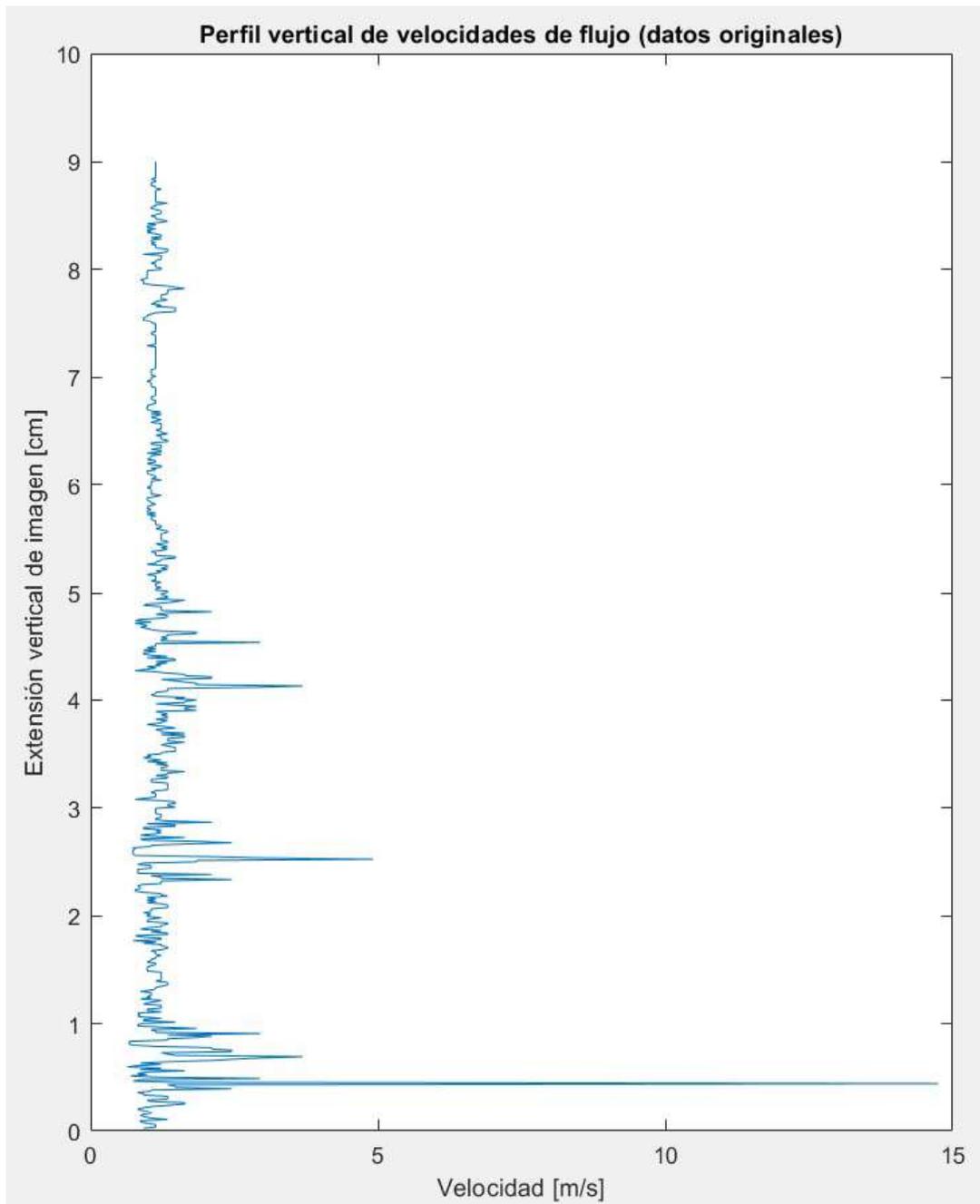
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.48 Sección Temporal 2 del Video 1 de la Prueba P-03



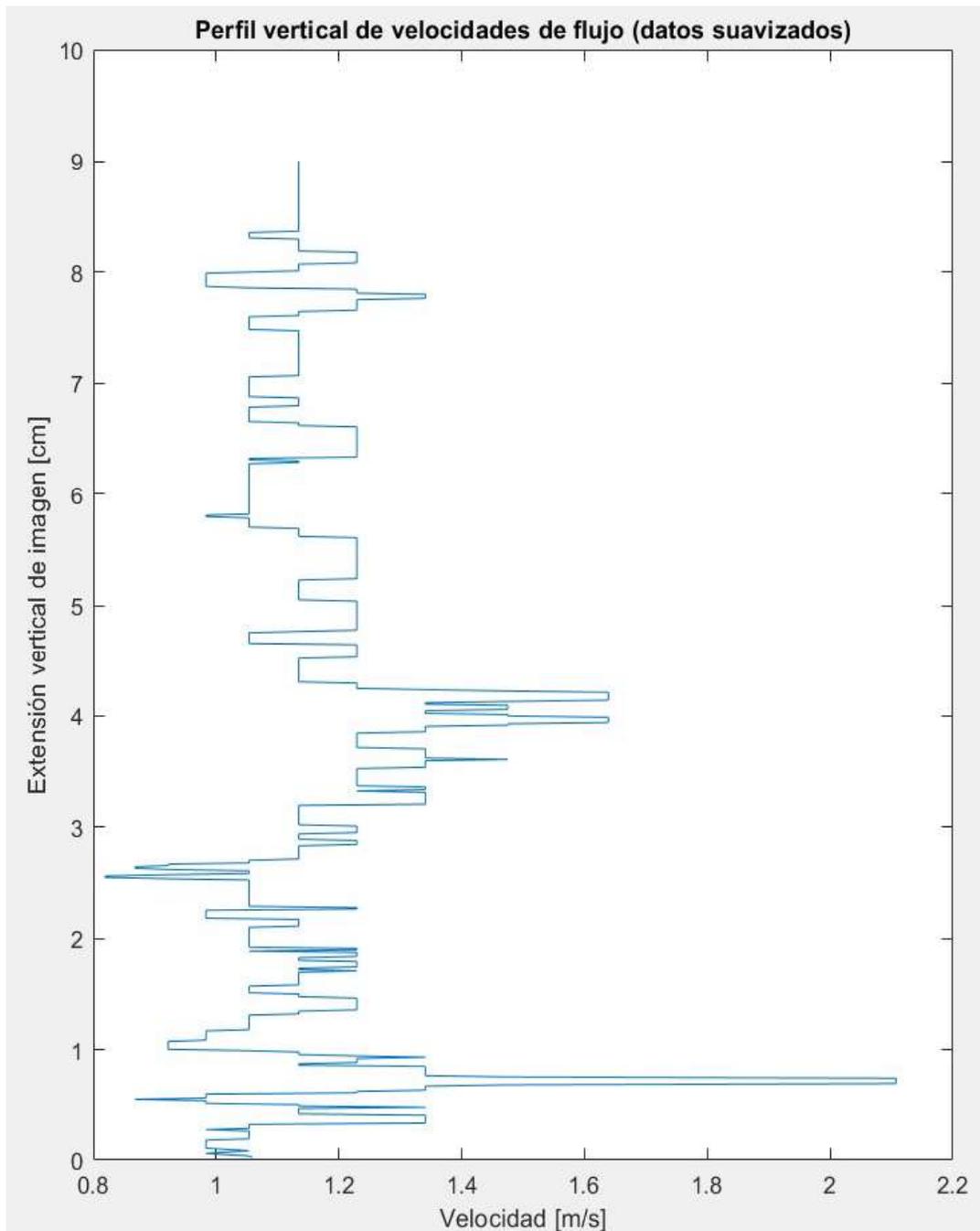
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.49 Gráfica de Velocidades de flujo del Video 1 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.50 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 1 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.24 Resultados Finales para el Video 1 de la Prueba P-03

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.221 | 15 | 1.1613 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

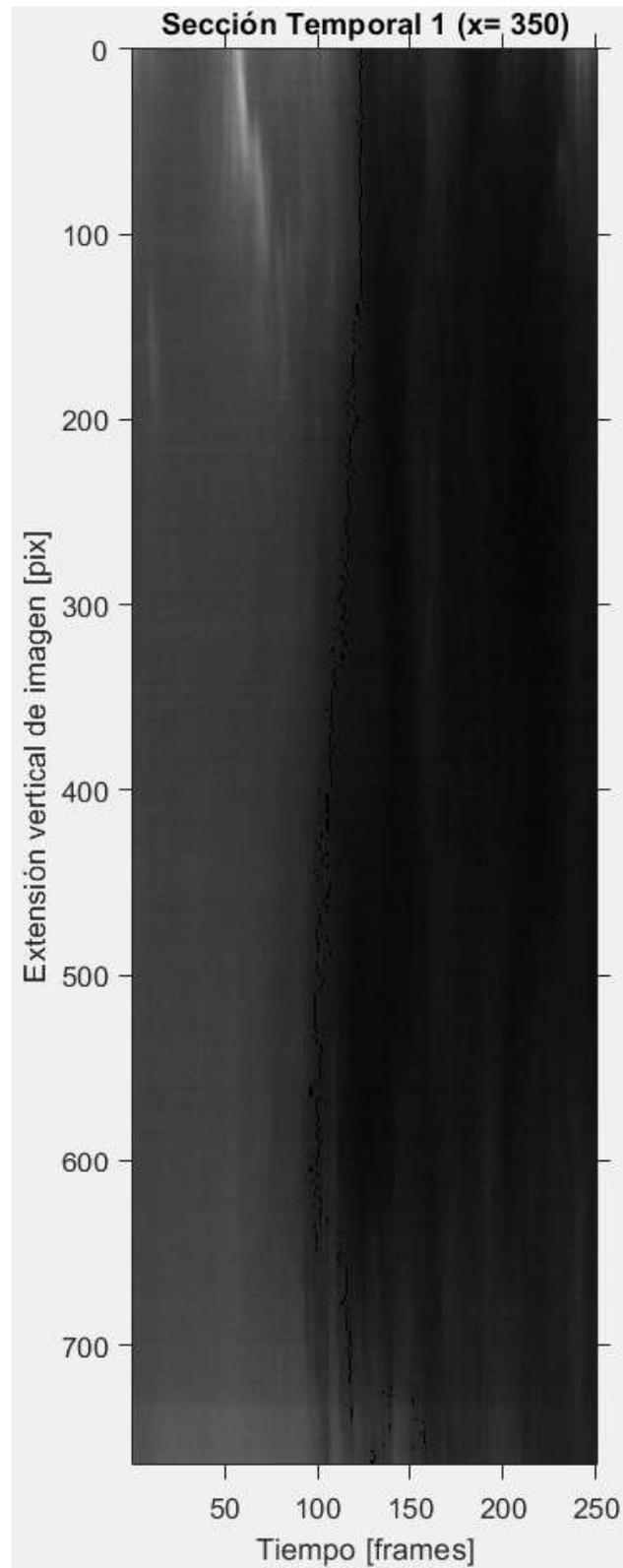
6.5.3.2 Video 2.

Tabla 6.25 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-03

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 250 | 249 | 0.498 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 110 | 872 | 762 | 89.92 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 350 | 600 | 250 | 29.5 |

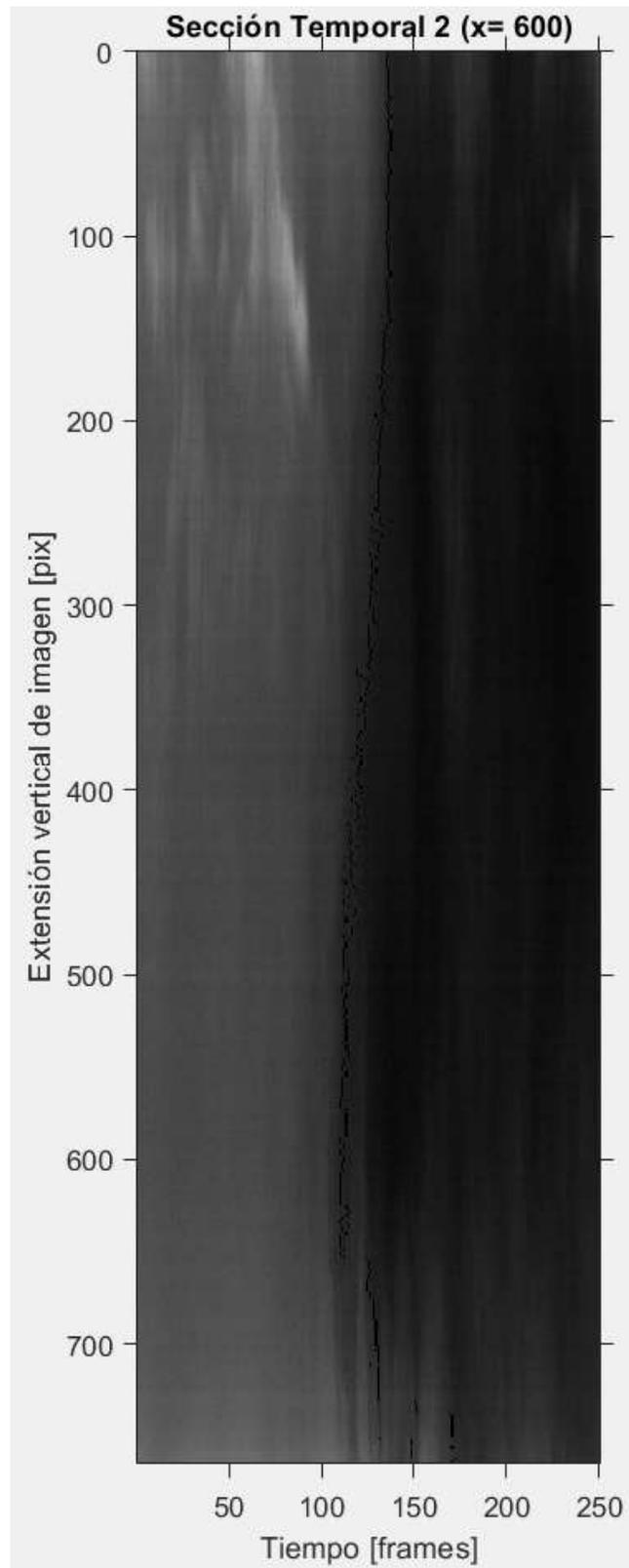
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.51 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-03



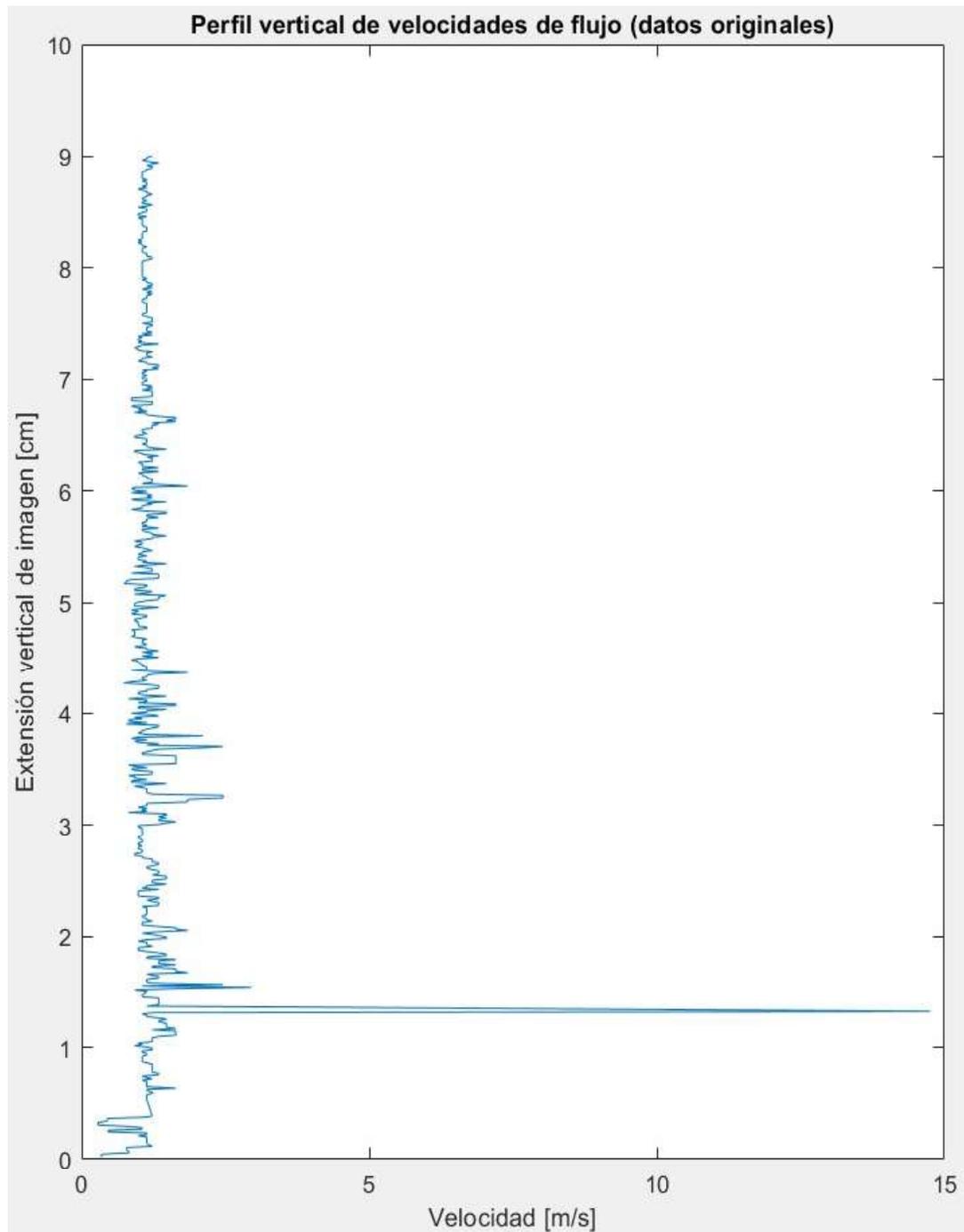
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.52 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-03



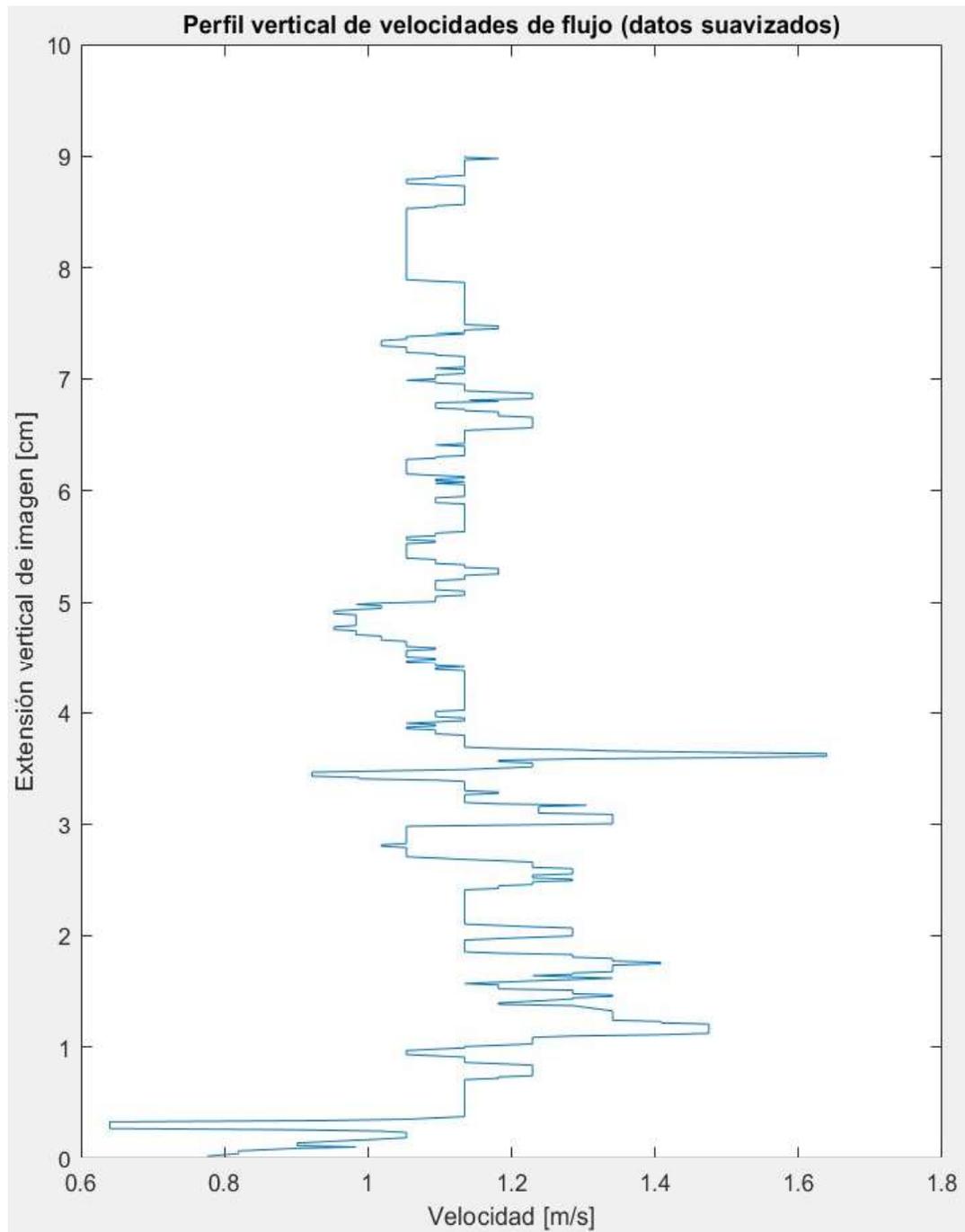
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.53 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.54 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.26 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-03

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.1693 | 16 | 1.1299 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

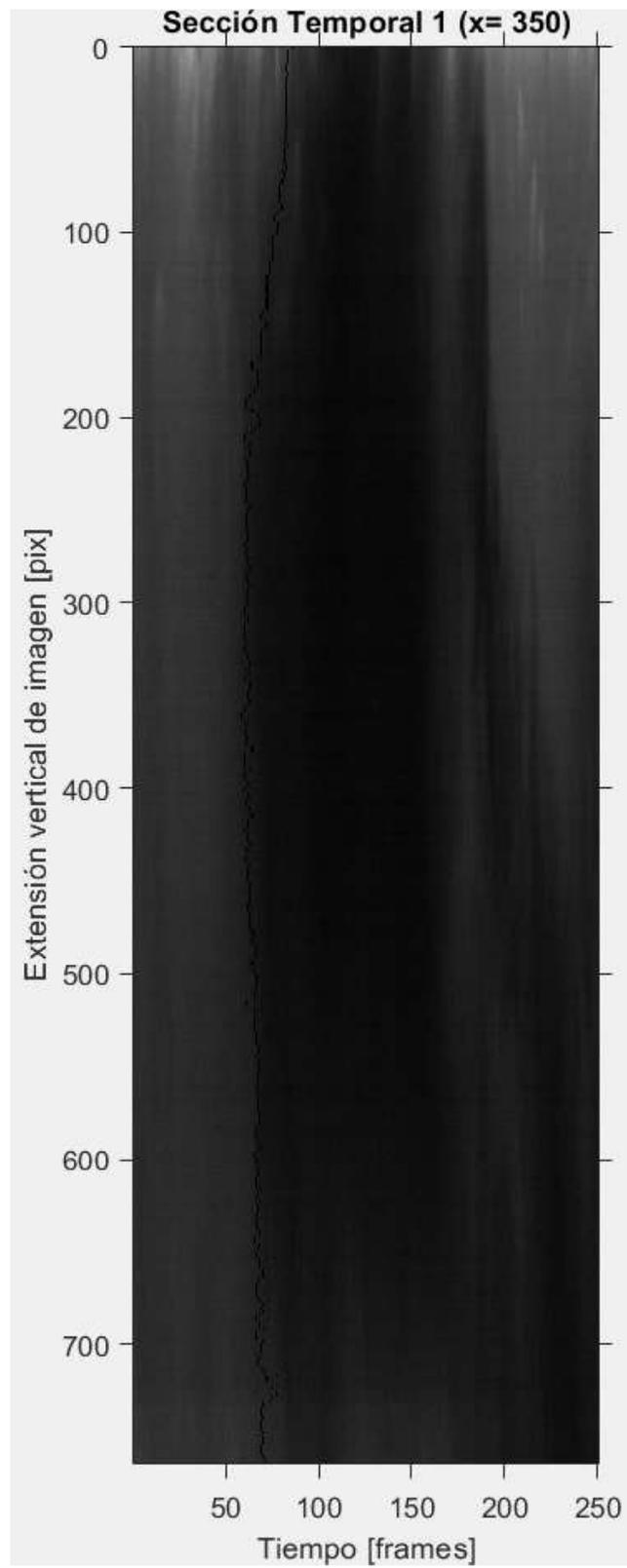
6.5.3.3 Video 3.

Tabla 6.27 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-03

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 250 | 249 | 0.498 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 110 | 872 | 762 | 89.92 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 350 | 600 | 250 | 29.5 |

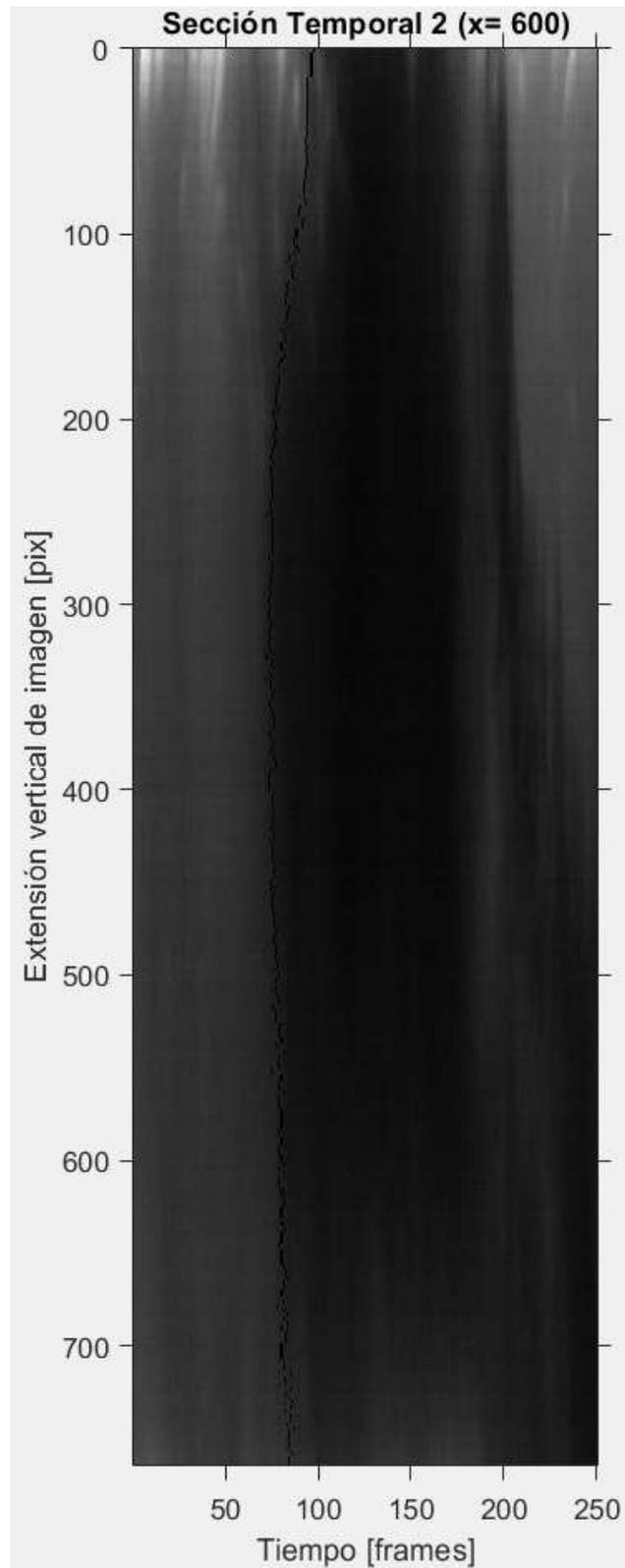
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.55 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-03



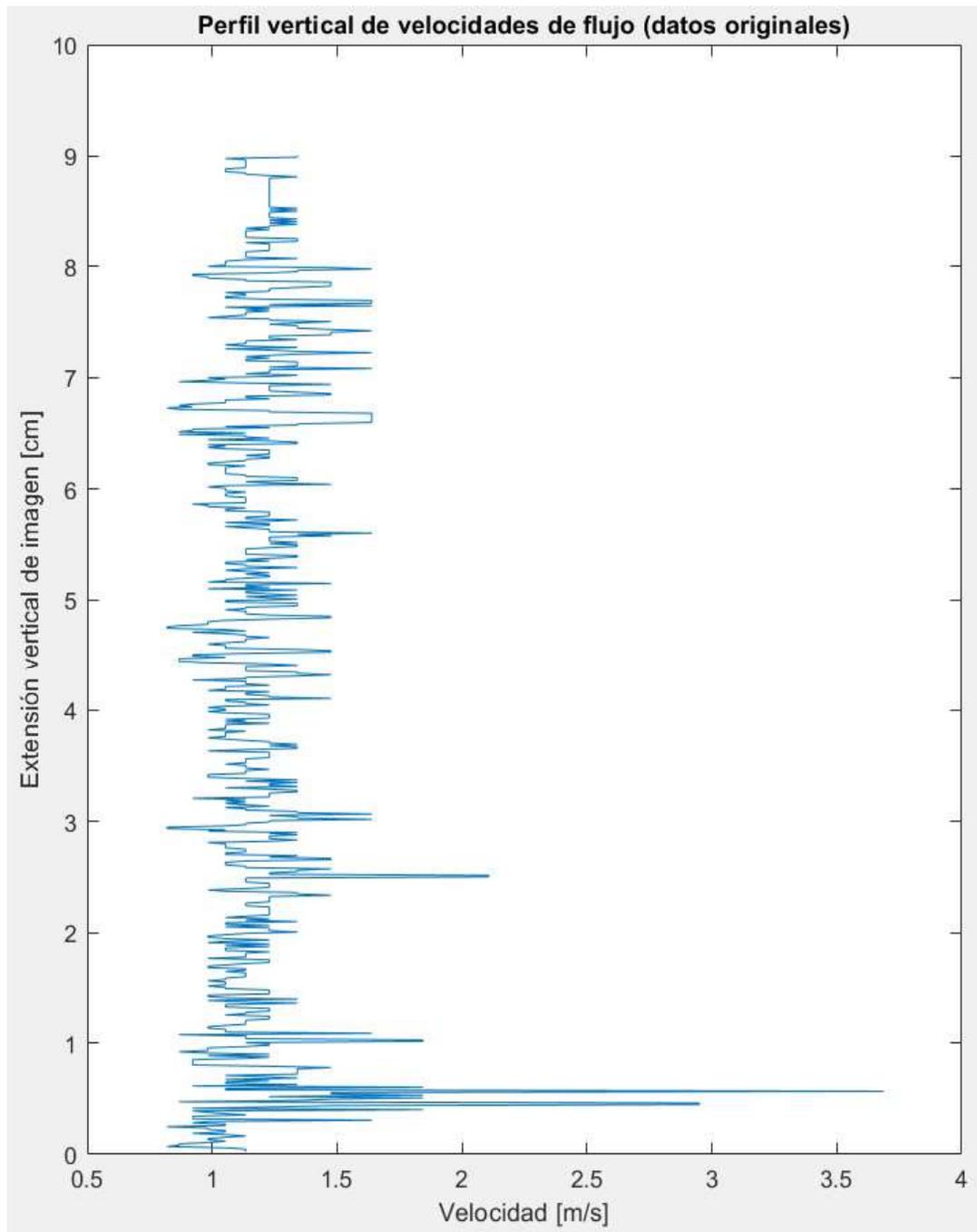
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.56 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-03



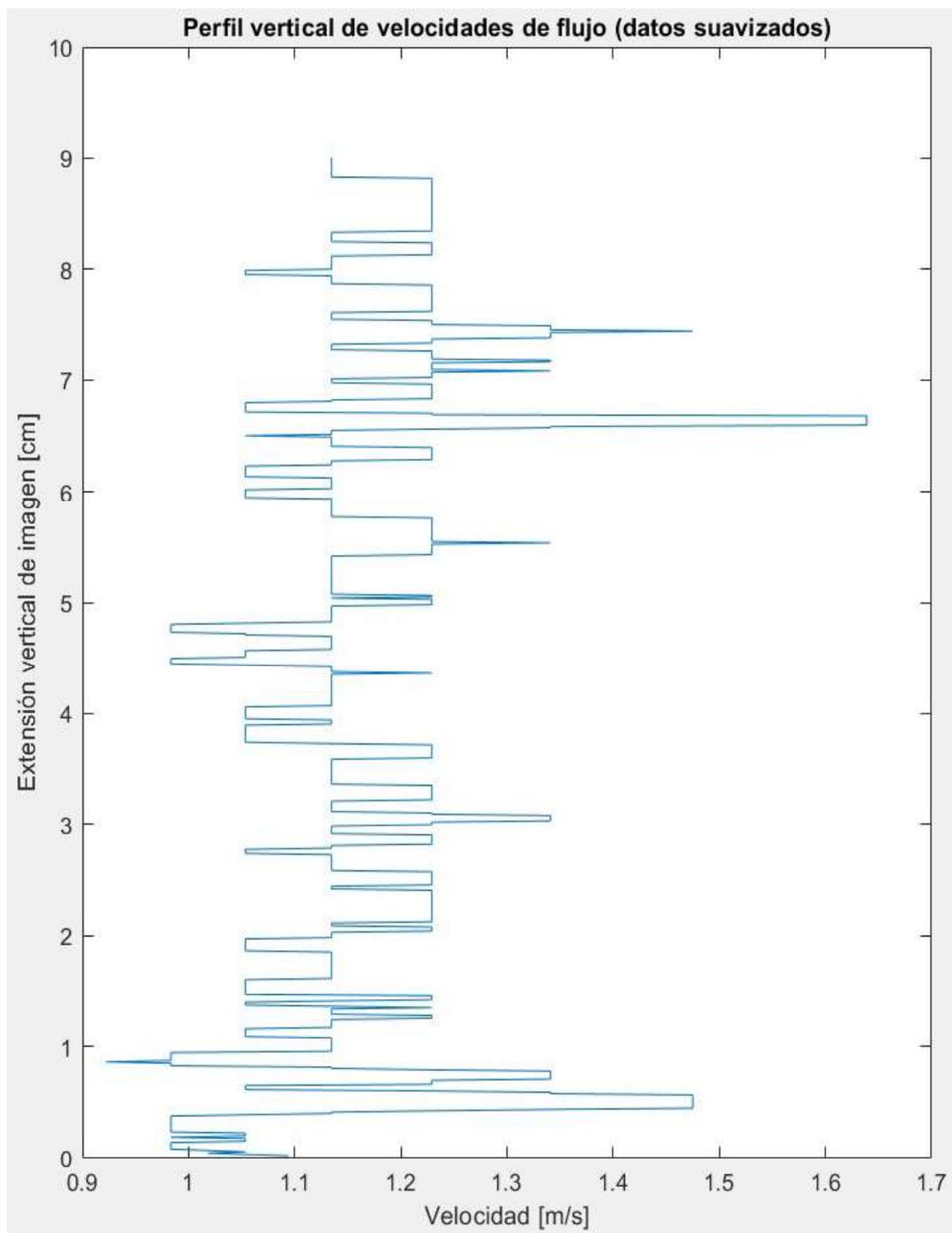
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.57 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.58 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-03



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.28 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-03

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.1855 | 11 | 1.1637 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019

6.5.4 P-04

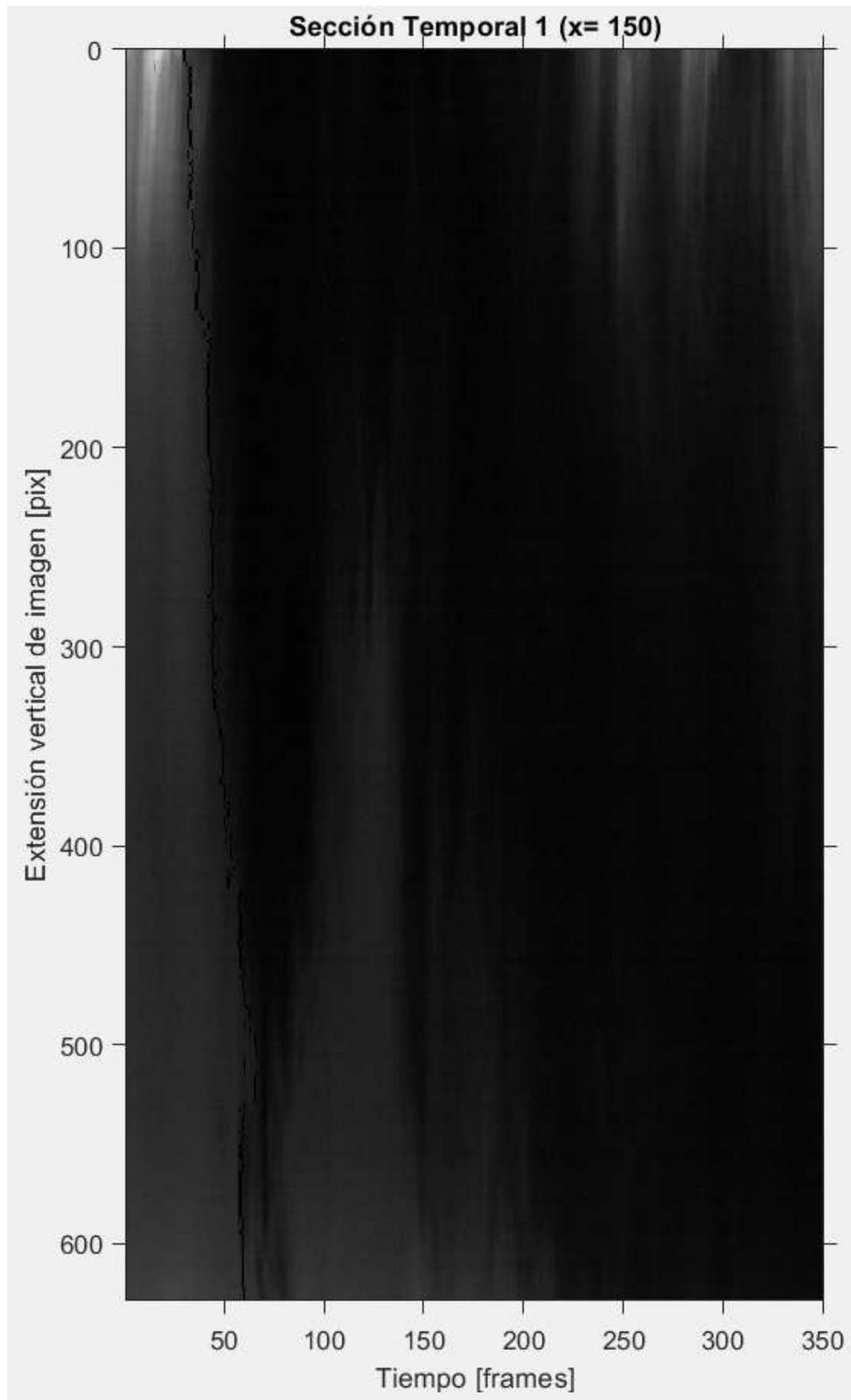
6.5.4.1 Video 2.

Tabla 6.29 Datos de Entrada para el Video 2 de la Prueba P-04

| | | | |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
| 1 | 350 | 349 | 0.349 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 154 | 780 | 626 | 67.921 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 150 | 700 | 550 | 59.675 |

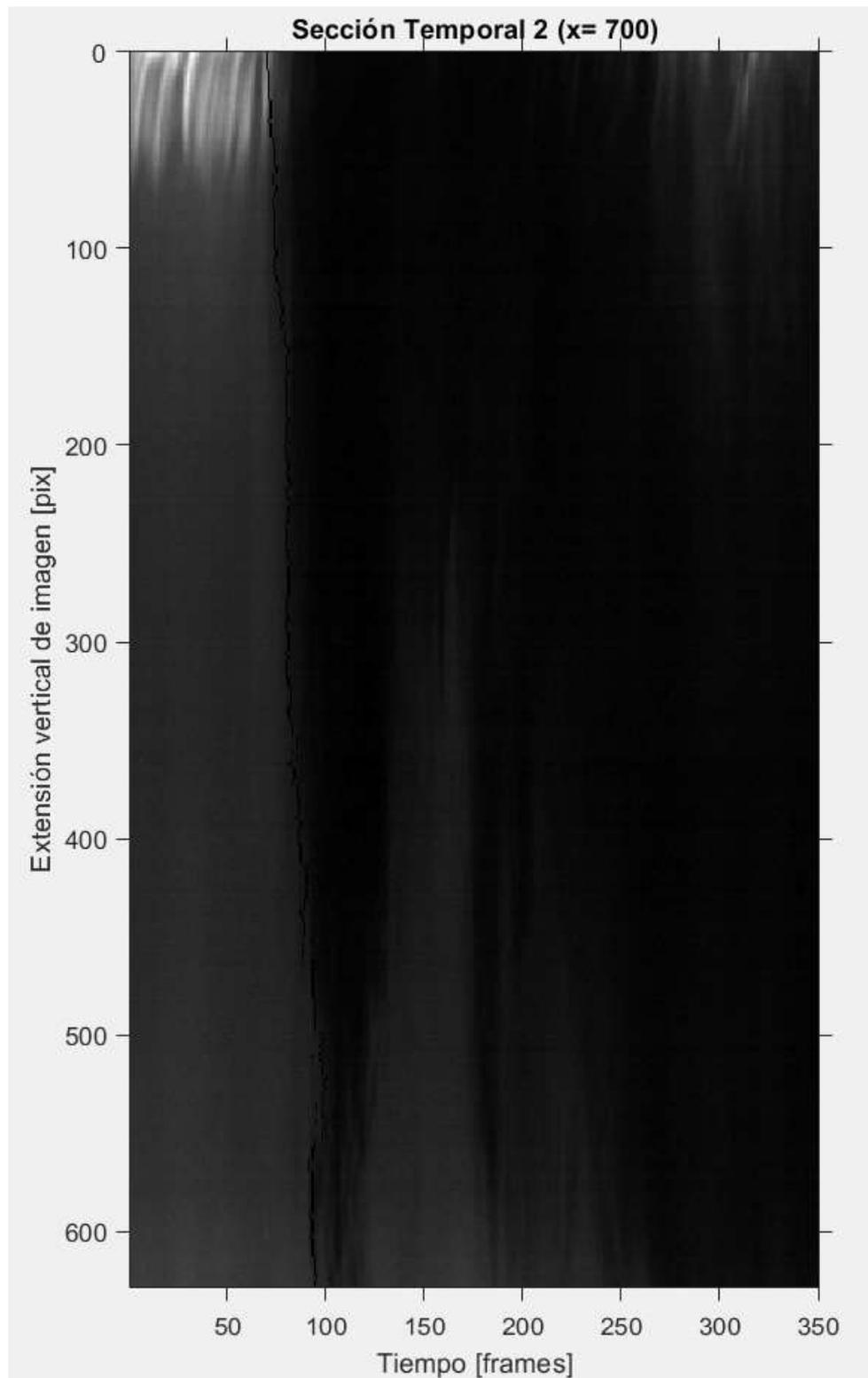
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.59 Sección Temporal 1 del Video 2 de la Prueba P-04



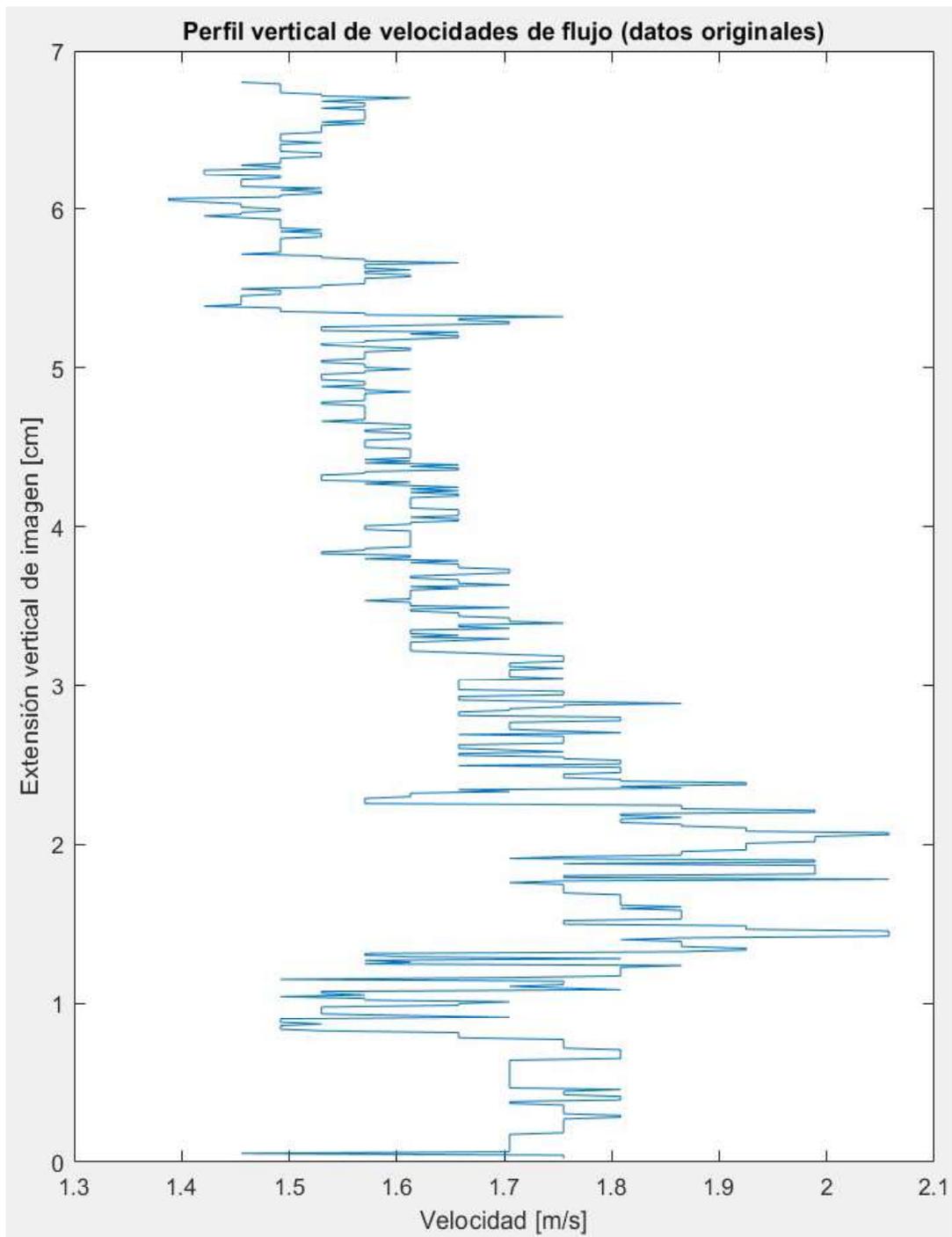
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.60 Sección Temporal 2 del Video 2 de la Prueba P-04



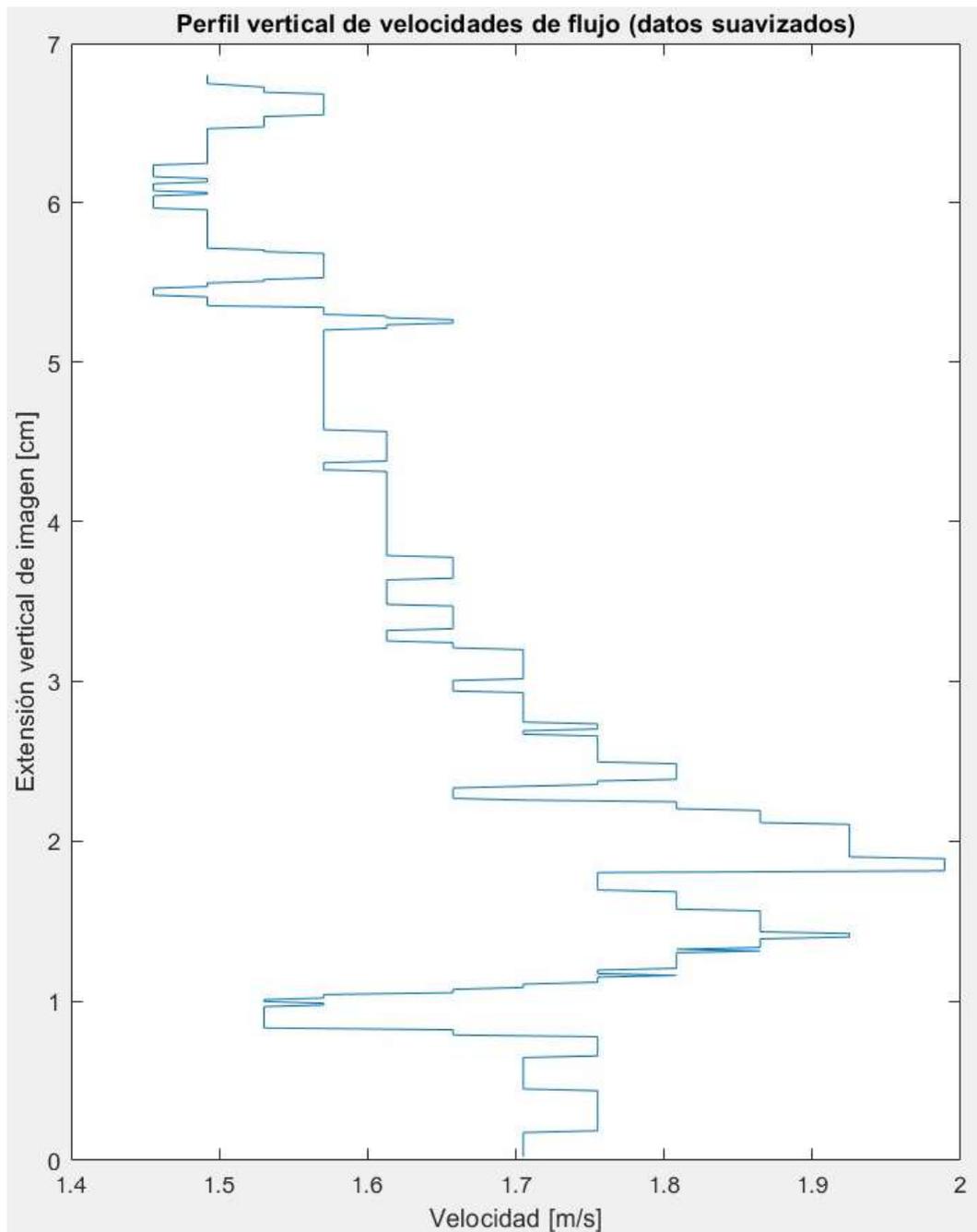
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.61 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.62 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 2 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.30 Resultados Finales para el Video 2 de la Prueba P-04

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.6562 | 15 | 1.6551 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

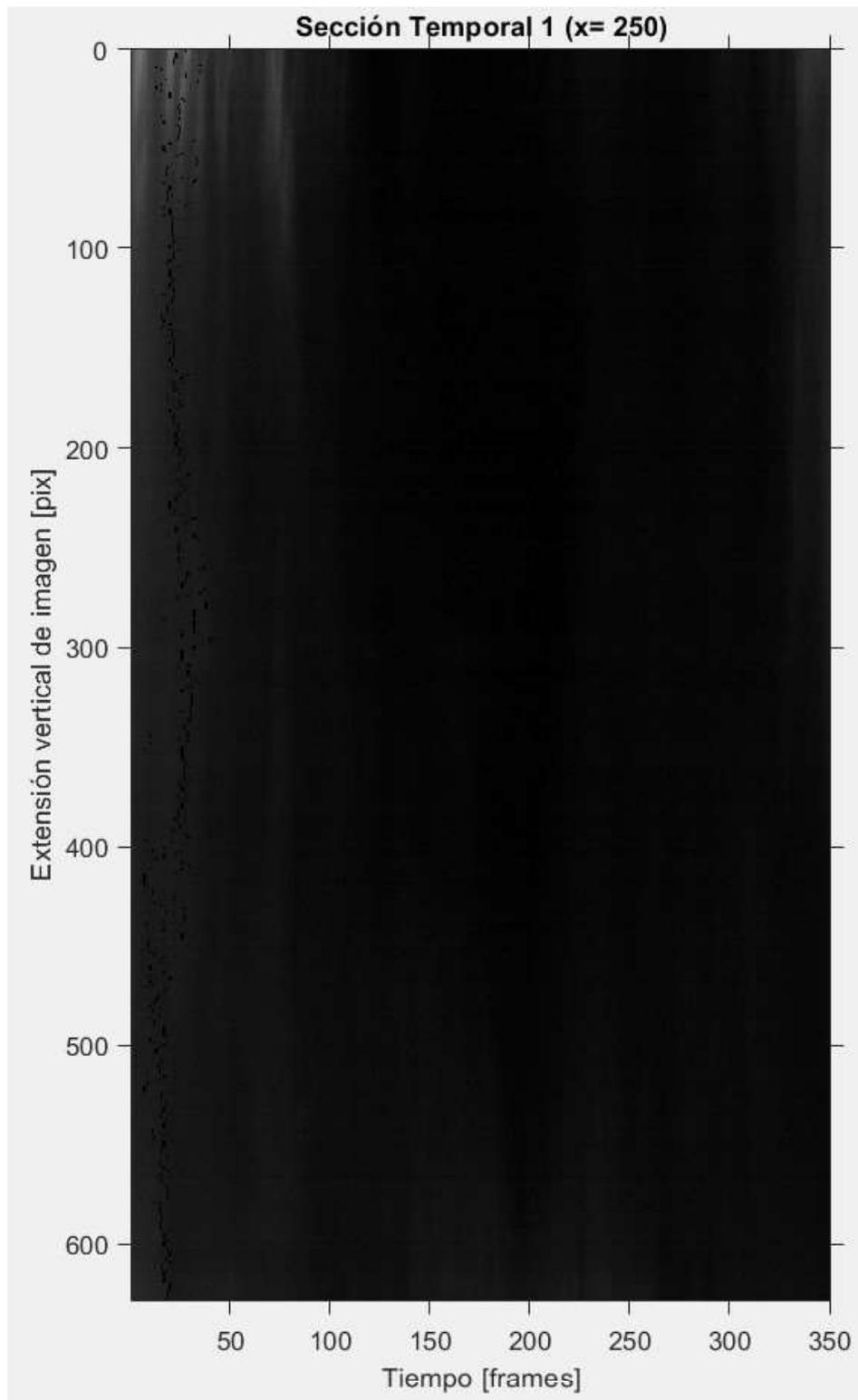
6.5.4.2 Video 3.

Tabla 6.31 Datos de Entrada para el Video 3 de la Prueba P-04

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 350 | 349 | 0.349 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 154 | 780 | 626 | 67.921 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 250 | 750 | 500 | 54.25 |

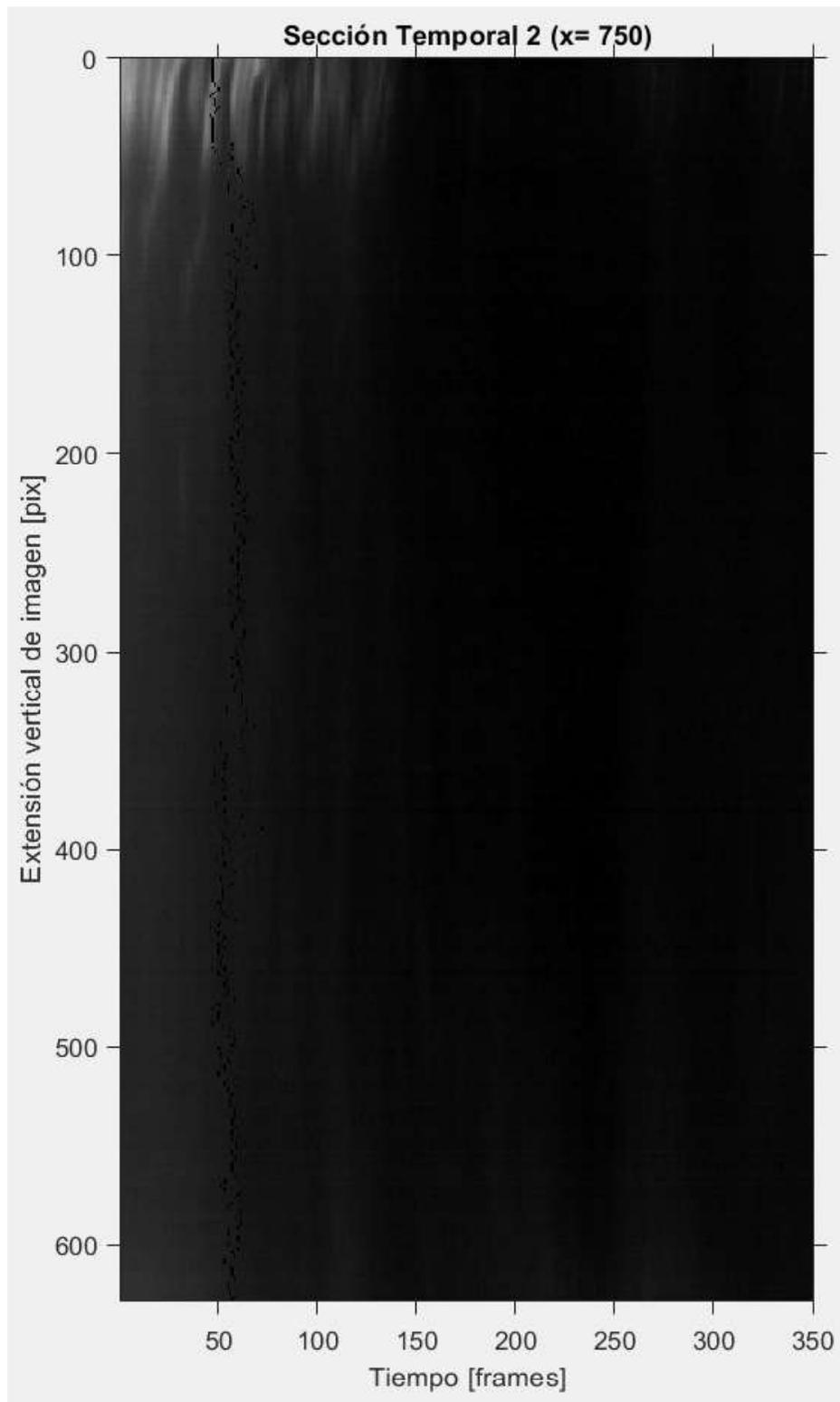
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.63 Sección Temporal 1 del Video 3 de la Prueba P-04



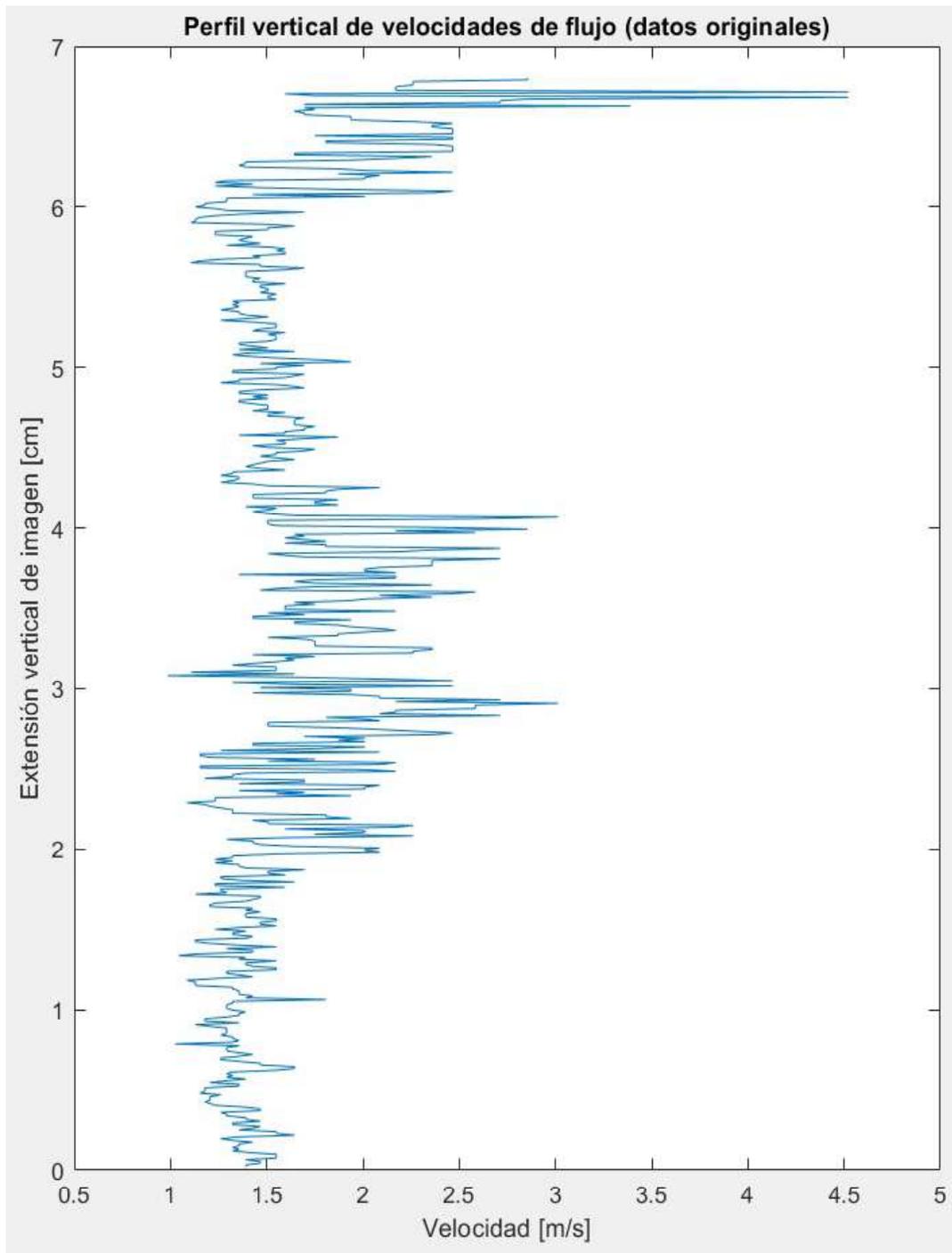
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.64 Sección Temporal 2 del Video 3 de la Prueba P-04



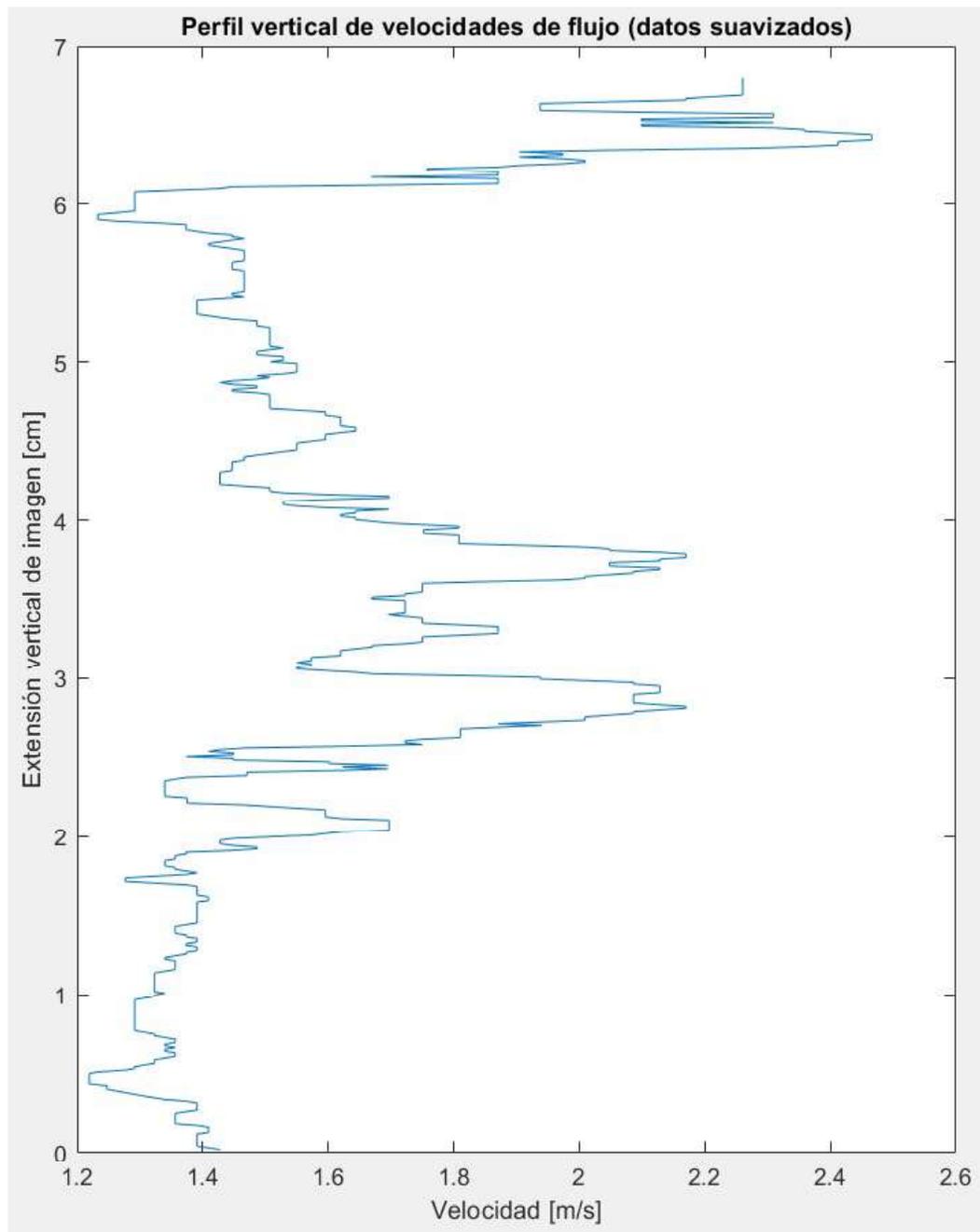
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.65 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.66 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 3 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.32 Resultados Finales para el Video 3 de la Prueba P-04

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.6231 | 20 | 1.5869 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

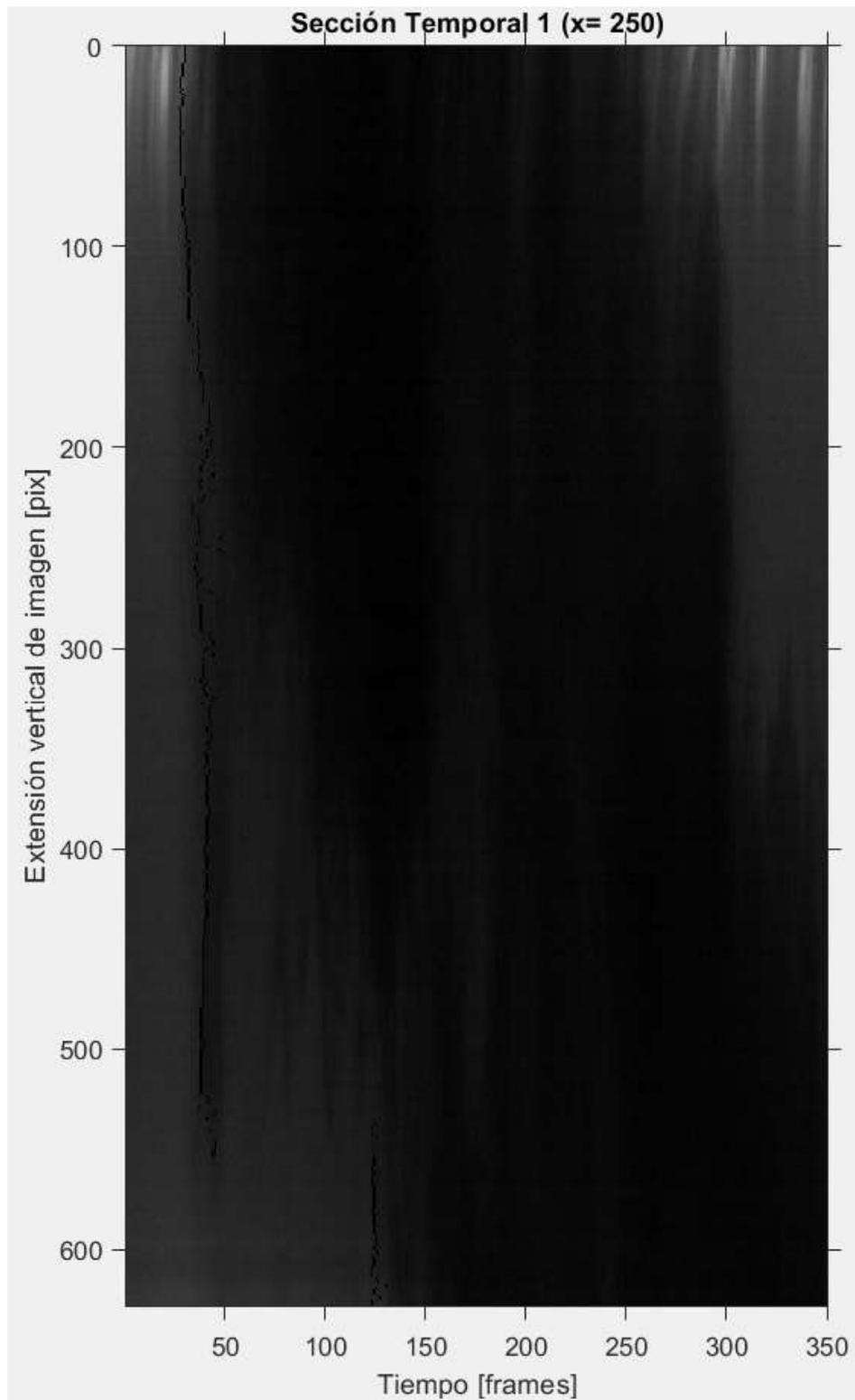
6.5.4.3 Video 4.

Tabla 6.33 Datos de Entrada para el Video 4 de la Prueba P-04

| Ti [frames] | Tf [frames] | Duración de lectura [frames] | Duración de lectura [sec] |
|---------------|---------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | 350 | 349 | 0.349 |
| Ysup [píx] | Yinf [píx] | Δy [píx] | Δy [mm] |
| 154 | 780 | 626 | 67.921 |
| Secc_x1 [píx] | Secc_x2 [píx] | Δx [píx] | Δx [mm] |
| 250 | 750 | 500 | 54.25 |

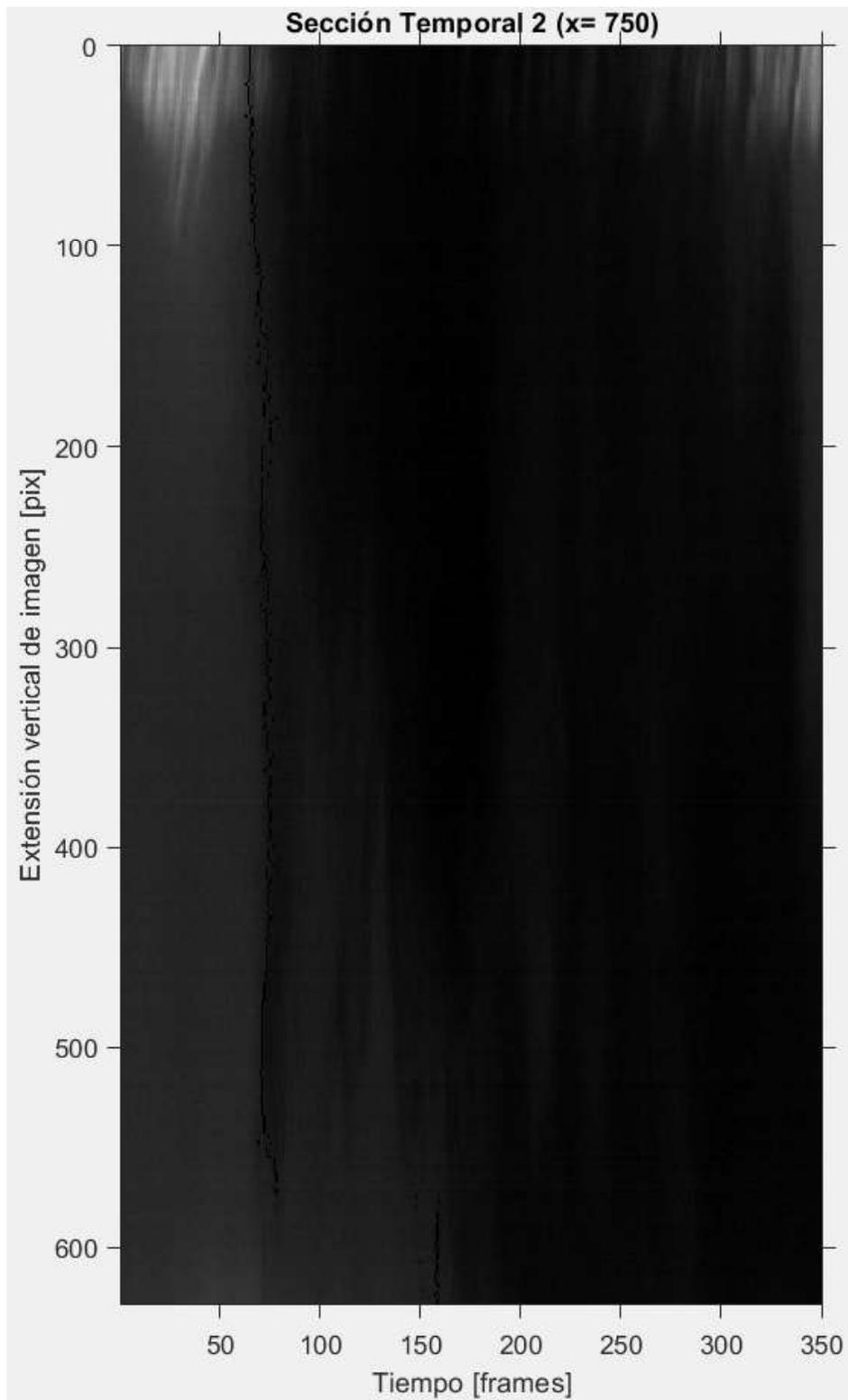
Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.67 Sección Temporal 1 del Video 4 de la Prueba P-04



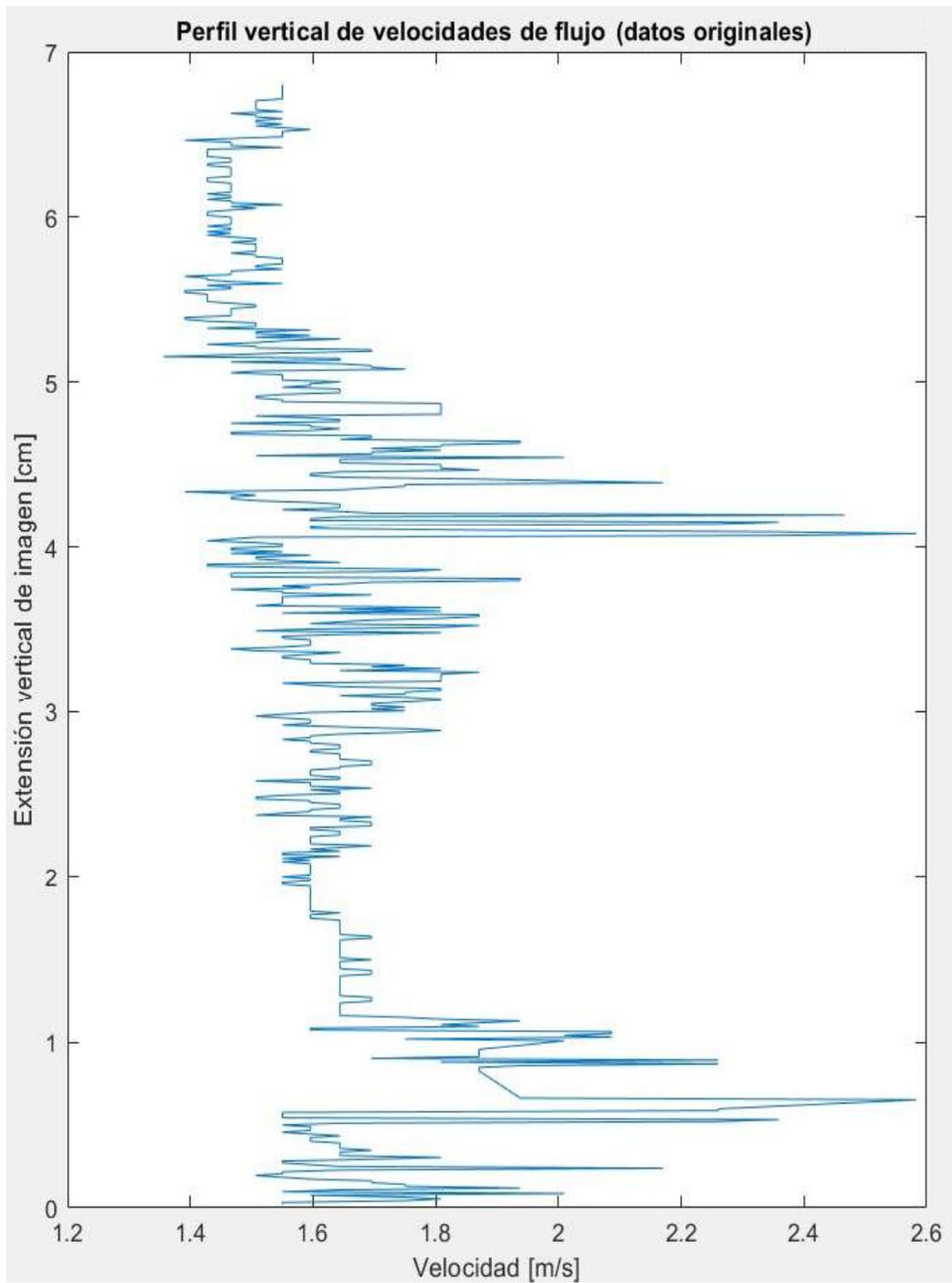
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.68 Sección Temporal 2 del Video 4 de la Prueba P-04



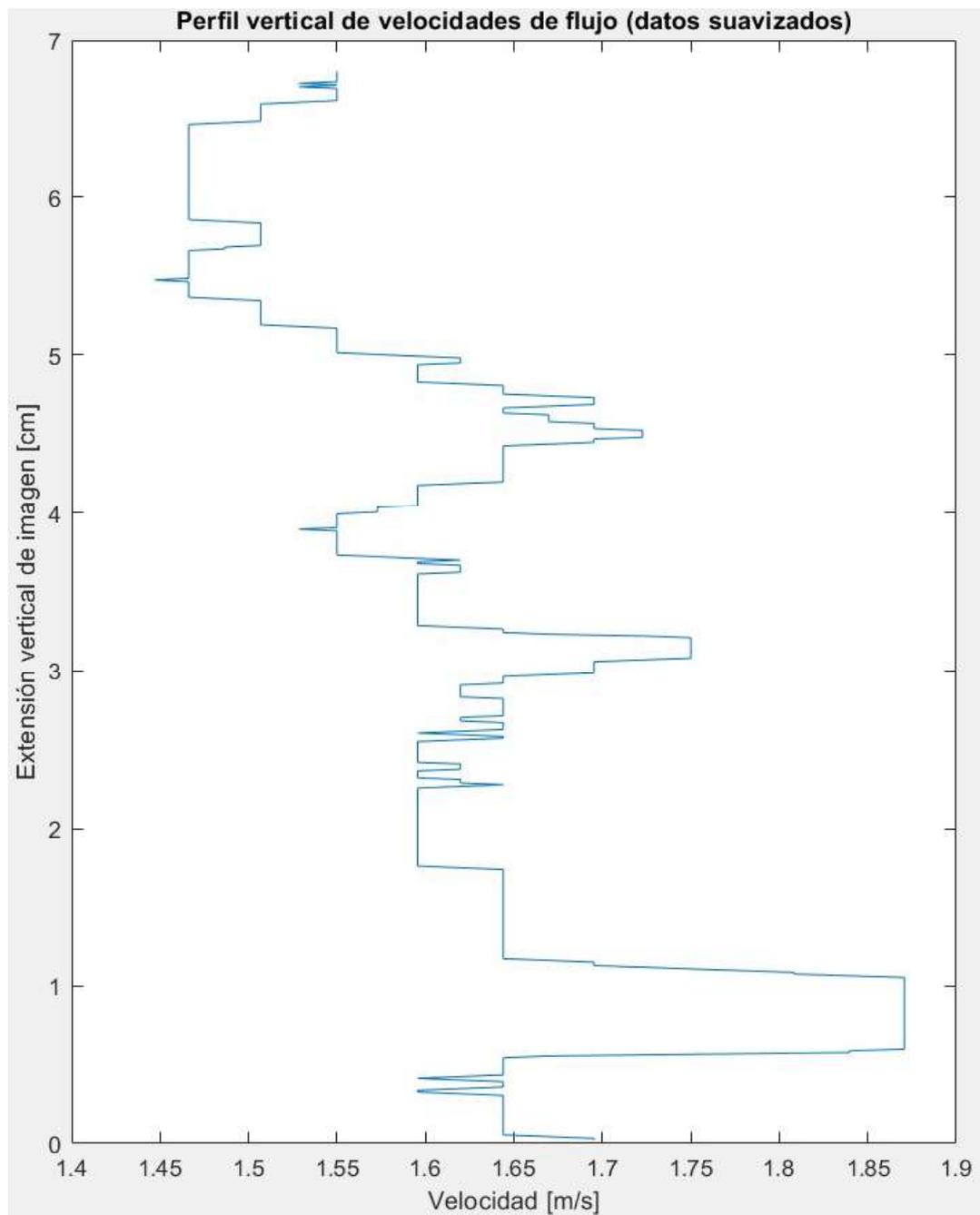
Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.69 Gráfica de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Figura 6.70 Gráfica Suavizada de Velocidades de Flujo del Video 4 de la Prueba P-04



Nota. Captura de pantalla recuperada de Matlab por Terra B. Quito, 2019.

Tabla 6.34 Resultados Finales para el Video 4 de la Prueba P-04

| V media [m/s] | Tamaño ventana (n) | V media filtrada [m/s] |
|---------------|--------------------|------------------------|
| 1.6240 | 30 | 1.6009 |

Nota. Elaborado por Terra B. Quito, 2019.