

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PROTOTIPO PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDAL EN UN CANAL ABIERTO, BASADO EN EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA PRELIMINAR PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS DE ESCOMBROS EN LA CUENCA DEL RÍO PÁEZ



CARLOS ALBERTO OSPINA CAICEDO

Universidad

del Cauca
UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2012

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PROTOTIPO PARA LA
ESTIMACIÓN DE CAUDAL EN UN CANAL ABIERTO, BASADO EN EL
PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES COMO HERRAMIENTA
PRELIMINAR PARA EL ESTUDIO DE FLUJOS DE ESCOMBROS EN LA
CUENCA DEL RÍO PÁEZ

CARLOS ALBERTO OSPINA CAICEDO

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Físico

Director:
Edgar Leonairo Pencue Fierro

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
POPAYÁN
2012

Nota de Aceptación

Director _____
Ing. Edgar Leonairo Pencue Fierro

Co-Director _____
Ing. Nicolás Oliveras Mercado

Evaluador _____
MSc. Bernardo Pulgarín Alzate

Evaluador _____
MSc. Carlos Andrés Andrade

Fecha de sustentación: Popayán, 25 de abril de 2012.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero que todo a Dios quien a través de muchas personas e instituciones, me dio la oportunidad de desarrollar este proyecto y así cumplir con mi intención de ser Ingeniero Físico para el servicio de los demás. Por ello, de la manera más sincera quiero agradecer a las siguientes personas e instituciones que tuvieron influencia en la realización del presente estudio, en los diferentes aspectos, profesional, económico y personal:

Al Servicio Geológico Colombiano, y en particular al personal del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPop): Nicolás Oliveras (mi asesor en el OVSPop), Bernardo Pulgarín, a Luis Eduardo, Andrés Narváez, Oscar Manzo, Adrián Sotelo, Nancy Trujillo, Diana Quintero, Cristian Santacoloma, Carlos Laverde, Carlos Cardona, a mis compañeros monitores y por supuesto a doña Marlene, a Hermilson, Gerardo y Rodrigo. A todos ellos por haberme dado la oportunidad de trabajar como Monitor de sismología durante estos 3 años y medio. La idea nació con ellos y han sido de gran ayuda tanto personal y profesional como en la consecución de algunos elementos para el proyecto.

A la Universidad del Cauca, a todo el personal del Departamento de Física y de Ingeniería Física, por toda su ayuda durante estos años de formación personal y profesional. Ha sido realmente grato haber vivido todo este proceso.

A mis compañeros del Grupo de Óptica y Láser, por haber escuchado y alimentado profesionalmente este proyecto, y en particular a mi director de trabajo de investigación, el Ing. Leonairo Pencue Fierro, por su apoyo e ideas que me permitieron ver la viabilidad del proyecto.

A mis amigos y compañeros de camino en la carrera, Diego Reina, Félix Cardozo, Julio Rodríguez, Luz Adriana, Laura Ordiérez, Laura Vásquez, Javier Osvaldo, Richard Hamilton, Norleth Solarte, David Quiñones, Diego Gallego, Adriana Burbano, Carol Certuche, Yady Solano, William Humberto, el Peke, La Jazz y todos aquellos con quienes compartimos muchos ratos alegres y de dedicación al estudio. Amigos y compañeros que me ayudaron activamente en este proyecto: Andrea Prado, Karen Pérez, Fabio Bahos, Félix Cardozo y Julio Rodríguez.

A los del grupo de danza contemporánea, con quienes viví también muchos ratos divertidos y de esfuerzo, para poder despejar mi mente del trajín diario que este proyecto exigió.

Por último, y más importante, a mi familia, mi abuelita Rosa, mis papás Amalia y Gildardo, mis hermanos, Ana, Juanca y Rafa, a todos mis tíos y tías, primos y primas, son todos ellos el sustento de mi vida. Mil gracias.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABLAS	xi
ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. VOLCÁN NEVADO DEL HUILA (VNH) Y FLUJOS DE ESCOMBROS	2
1.1. VOLCÁN NEVADO DEL HUILA.....	2
1.2 FLUJOS DE ESCOMBROS.....	2
1.3 ALGUNOS ESTUDIOS HECHOS EN EL VNH	3
1.3.1 Mapa de amenaza volcánica	3
1.3.2 Simulaciones de flujos de escombros mediante el método <i>Lahar Z</i>	4
1.3.3 Estudios de velocidad en Flujos de escombros.	4
1.4 ESTADO DEL ARTE SOBRE DETECCIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS	7
2. CÁLCULO DE CAUDAL EN CANALES ABIERTOS	10
2.1 MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN CURVAS.....	10
2.2 ÁREA TRANSVERSAL DE INUNDACIÓN	13
2.3 CANAL ABIERTO Y CAUDAL DE REFERENCIA.....	14
2.4 ERRORES EN LA MEDIDAS	17
3. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.	19
3.1 CALIBRACIÓN DE CÁMARA	19
3.2 DETECCIÓN DE MOVIMIENTO.....	20
4. METODOLOGÍA.....	22
4.1 SISTEMA PARA OBTENER CAUDAL DE REFERENCIA	22
4.2 MÉTODO DE CALIBRACIÓN ESPACIO-CÁMARA.....	27
4.3 CÁLCULO DE CAUDAL A PARTIR DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.	29

4.4 MEDICIÓN DE INTENSIDAD DE LUZ.....	32
4.5 DESARROLLO DE PRUEBAS	33
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
5.1 SOBRE EL MÉTODO DE OBTENCIÓN DEL CAUDAL DE REFERENCIA.....	37
5.2 RESULTADOS DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN ESPACIO-CÁMARA .	36
5.3 CAUDAL ESTIMADO A PARTIR DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES Y CAUDAL DE REFERENCIA.	37
5.4 DETECCIÓN DE LAS MÁRGENES LATERALES DEL FLUJO (PUNTOS A' Y A).	41
5.5 ANÁLISIS DE ERRORES EN EL CÁLCULO DE CAUDAL.	44
5.6 RESULTADOS DE OTRAS PRUEBAS	46
6. EVALUACIÓN DEL PROYECTO Y REQUISITOS MÍNIMOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA REAL.....	50
7. CONCLUSIONES.....	56
8. TRABAJOS FUTUROS	57
9. BIBLIOGRAFÍA	58
ANEXO.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Amenaza VNH, versión 1996 (Tomado de http://intranet.ingeminas.gov.co/popayan/Imagen:Mapa_Amenaza_VNH_3D.jpg).	3
Figura 2. Escenarios ante flujos de escombros para la sección transversal Minas-Seminario (Tomado de NASAKIWE & INGEOMINAS, 2009).	5
Figura 3. Gráfica de Velocidades vs Distancia (km) de los datos la Tabla 1.	7
Figura 4. Sección transversal de un río en curva y parámetros usados para el cálculo de velocidad: márgenes izquierdo y derecho del flujo en la sección transversal A' y A, Δz , r y B. Fuente: Basado en libro: Ingeniería Fluvial (Vide, 2003).	11
Figura 5. Punto de mayor depresión d , o punto del máximo Δz .	12
Figura 6. Errores en la obtención de los parámetros B , Δz y área de inundación. (A) Área ideal. (B) Área sobrestimada. (C) Área subestimada.	13
Figura 7. Mapa de lecho fluvial o sección transversal (izq.). Datos necesarios para medir el área mojada (der.).	14
Figura 8. Tanque de 500 L y válvula de bola de 3", instalado al inicio del canal, desde donde se suministrará el fluido.	15
Figura 9. Canal construido y sus secciones transversales (todas las dimensiones en cm): Consta de 3 zonas. Zona inicial 1, en la que se recibe la descarga del fluido desde el tanque a través de la válvula de 3". Zona de curva 2, en la que se observaría la súper elevación usando la Webcam. Zona 3, de desagüe o descarga de la curva.	16
Figura 10. Diagrama de modelo de movimiento: (A) Un objeto detectado en movimiento (blanco); (B) al siguiente <i>frame</i> , el objeto se mueve y es marcado con el tiempo actual (blanco), dejando la vieja silueta a un lado (gris); (C) al siguiente <i>frame</i> , el objeto se mueve más, dejando las viejas segmentaciones como rectángulos sucesivamente más oscuros, cuya secuencia de movimientos crea el historial de movimiento (Tomado de Bradski & Kaehler, 2008).	21
Figura 11. Montaje del tanque con el sensor GP2Y0A21YK y flotador para obtención del nivel h .	23
Figura 12. Calibración hallada experimentalmente para el dispositivo electrónico GP2Y0A21YK.	24
Figura 13. Diagrama de bloques de la adquisición usada para los datos de h .	24

Figura 14. Calibración de la válvula de bola de 3' usando imágenes. Imagen original (izq.), área (centro), perímetro (der.).....	26
Figura 15. Elementos del método de calibración, mostrados en el canal y en la imagen de la webcam.	28
Figura 16. Aplicación de calibración, 14 puntos de calibración. Mapa de la sección transversal (esta girado por efectos de visualización, izq.), puntos de calibración en la imagen (der.).	28
Figura 17. Identificación de las posiciones A' y A en la imagen (A) y sus posiciones correspondientes en el mapa de la sección transversal (B). .	30
Figura 18. Proceso de detección de las posiciones A' y A en las imágenes	30
Figura 19. Imagen Original (A). Imagen segmentada por <i>motion templates</i> (B)....	30
Figura 20. Línea que define la posición del <i>thalweg</i> en la imagen (A), para la eliminación de inconsistencias y ruido (B).....	31
Figura 21. Identificación de bordes (A) e identificación de los puntos A' y A (B). ..	31
Figura 22. Diagrama de bloques de la adquisición de datos desde LX-102.	33
Figura 23. Esquema de funcionamiento de aplicación para el desarrollo de las pruebas del sistema prototipo.	34
Figura 24. Interfaz de la aplicación para desarrollo de pruebas.	35
Figura 25. Porcentaje de error relativo CaudalRef. Prueba 1.....	38
Figura 26. Corte transversal que muestra los cambios en el lecho debidos a la ejecución de las diferentes pruebas. El punto amarillo representa el punto en el mapa que coincide con el centro de la imagen en la cámara.....	37
Figura 27. Caudales estimados y caudal de referencia. Prueba 1.	39
Figura 28. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 1.....	39
Figura 29. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 1. Obtenida desde luxómetro LX-102.	39
Figura 30. <i>Frames</i> en diferentes instantes, obtenidos del video de Prueba 1, con los puntos A'(azul) y A(fucsia) detectados usando PDI.	40
Figura 31. Ubicación de los puntos reales A' y A respecto de sus posiciones detectadas.	41
Figura 32. Sobreestimación (A) y subestimación (B) del área mojada y por tanto del caudal CaudalSimple y CaudalWoodward, debidas a la detección errada de A' y A en las imágenes.....	41
Figura 33. Detección de los puntos A' (A) y A (B) con PDI y sus posiciones reales en las imágenes del video. Prueba 1.....	43
Figura 34. Diferencias entre $(A_{Detectado} - A_{Real})$ y $(A'_{Detectado} - A'_{Real})$. Prueba 1.	43

Figura 35. %Error relativo CaudalSmple. Prueba 1.....	45
Figura 36. Valores más recurrentes del %Error relativo CaudalSmple. Prueba 1.	45
Figura 37. Sección transversal del canal de pruebas y campo de visión de la cámara ubicada en este proyecto.	53
Figura 38. Sección transversal de la sección transversal Minas-Seminario y campo de visión que podría tener la cámara de vigilancia. Imagen basada en la Figura 2.....	53
Figura 39. Vista en planta de la sección transversal Minas-Seminario y posible ubicación de la cámara de vigilancia. Imagen basada en la Figura 2	54
Figura 40. Vista en planta de la curva del canal usando el método implementado en este proyecto y ubicación de la cámara.....	54
Figura 41. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 2.	62
Figura 42. Relación entre el caudal estimado (Caudal Simple) con Caudal Ref. Prueba 2.	62
Figura 43. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 2.	62
Figura 44. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 3.	63
Figura 45. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 3.	63
Figura 46. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 3.	63
Figura 47. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 5.	64
Figura 48. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 5.	64
Figura 49. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 5.	64
Figura 50. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 6.	65
Figura 51. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 6.	65
Figura 52. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 6.	65
Figura 53. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 7.	66
Figura 54. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 7.	66
Figura 55. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 7.	66
Figura 56. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 8.	67
Figura 57. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 8.	67
Figura 58. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 8.	67
Figura 59. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 9.	68

Figura 60. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 9.	68
Figura 61. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 9.	68
Figura 62. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 10.	69
Figura 63. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 10.	69
Figura 64. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 10.	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos de campo: medidas del <i>lahar</i> del 20 de Nov. 2008, Nevado de Huila (partes alta y media del valle del río Páez) (Tomado de Pulgarin y otros, 2008).	6
Tabla 2. Velocidades estimadas. Flujo de escombros de la erupción del 20 de noviembre de 2008 (Tomado de Oliveras, 2008).	7
Tabla 3. Principales sensores de sistemas de alerta usados en Italia ante eventos de flujos de escombros (Tomado de Massimo & Marchi, 2008).	8
Tabla 4. Comparación de velocidades medidas a través de sensores ultrasónicos y el procesamiento digital de imágenes en video. (Tomado de Arattano & Marchi, 1999).	9
Tabla 5. Ubicación del punto de depresión máxima de la superficie o punto <i>d</i> .	12
Tabla 6. Calibración de válvula de bola de 3”.	25
Tabla 7. Ejemplo de ubicación de coordenadas de los puntos A' y A, en imagen y en mapa de sección la transversal.	32
Tabla 8. Comprobación del caudal calculado por el sistema, a partir de pruebas de aforo. Caudales en (L/min)	37
Tabla 9. Puntos de calibración medidos.	38
Tabla 10. Diferencias entre los puntos interpolados consecutivos, para los 13 intervalos de puntos de calibración.	38
Tabla 11. Resumen de resultados de pruebas.	49

ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

En este documento se presenta un estudio, el desarrollo y los resultados de un sistema prototipo para la estimación de caudal en un canal abierto, basado en procesamiento digital de imágenes (PDI). Trabajo desarrollado con la intención de ser proyectado a mayor escala para el estudio de flujos de escombros en la cuenca del Río Páez en departamento del Cauca.

En la primera sección se presenta en contexto la situación del Volcán Nevado del Huila (VNH), los flujos de escombros ocurridos en el Río Páez, algunos de los cuales se han debido a erupciones del VNH y por último cómo se han estudiado este tipo de flujos en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPop) y en otras partes del mundo.

En la segunda sección se definen conceptos relacionados con el cálculo de caudal volumétrico en canales abiertos, además se presenta el canal abierto usado para el desarrollo de este proyecto y por último se definen algunos métodos del cálculo de errores que fueron usados para el análisis de datos.

En la tercera sección se describen algunos conceptos del PDI usados para el algoritmo de PDI del sistema prototipo de este proyecto.

En la cuarta sección se describe la metodología diseñada y usada para experimentar en el canal abierto. Primero se presenta el sistema diseñado e implementado para estimar un caudal de referencia, luego se define la metodología con la que se realizó la calibración espacio-cámara, en tercera instancia se describe el algoritmo de PDI que usa el prototipo para estimar caudal. Además se hace referencia a la medición de la intensidad lumínica en la escena que el sistema prototipo observa y por último se muestra el procedimiento con el que se desarrollaron las pruebas o experimentos.

En la quinta sección se presentan los resultados y el análisis de resultados de una de las pruebas realizadas y se presenta un resumen de los resultados logrados de 8 pruebas más.

En la sexta sección se hace una evaluación del proyecto como una herramienta preliminar para el estudio de flujos de escombros en la cuenca del Río Páez y se dan a conocer los requisitos mínimos para la implementación del sistema real.

Por último se dan a conocer las conclusiones y los trabajos futuros que se pueden desarrollar a partir de los resultados logrados con este proyecto.

$A_t = 0,006 V^{2/3}$	Ecuación 1.....	4
$v = \sqrt{2gh}$	Ecuación 2.....	4
$Q = A_m \cdot v$	Ecuación 3.....	10
$Q = \frac{dV}{dt}$	Ecuación 4.....	10
$V_{(T_2-T_1)} = \int_{T_1}^{T_2} Q \cdot dt = Q \cdot (T_2 - T_1)$	Ecuación 5.....	10
$V_{(T_n-T_0)} = \sum_{T_0}^{T_n} Q_i \cdot \Delta T_i$	Ecuación 6.....	10
Ecuación 7.....		11
$\Delta z = 2.30 \frac{v^2}{g} \log \frac{r_o}{r_i}$	Ecuación 8.....	11
$\Delta z = \frac{v_{\max}^2}{g} \left[20 \frac{r}{3B} - 16 \frac{r^3}{B^3} + \left(\frac{4r^2}{B^2} - 1 \right)^2 \ln \left(\frac{2r+B}{2r-B} \right) \right]$	Ecuación 9.....	12
$A_m = B \cdot y_2 - \frac{B \cdot \Delta z}{2} - \int_{x_1}^{x_2} y(x) dx$	Ecuación 10.....	14
$v = C \sqrt{R \cdot S}$	Ecuación 11.....	17
$Q = C_d A \sqrt{2gh}$	Ecuación 12.....	17
$\delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \left \frac{\partial f}{\partial x_i} \right \delta x_i$	Ecuación 13.....	17
$\delta Q = A_m \delta v + v \delta A_m$	Ecuación 14.....	17
$\delta \text{Caudal Re } f = \left \frac{AC_d}{2\sqrt{2gh}} \right \delta h + C_d \sqrt{2gh} \delta A + A \sqrt{2gh} \delta C_d$	Ecuación 15.....	18
$\delta v = \left \frac{1}{2} \sqrt{\frac{gr}{B\Delta z}} \right \delta \Delta z + \left \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g\Delta z}{Br}} \right \delta r + \left \frac{1}{2} \sqrt{\frac{gr\Delta z}{B^3}} \right \delta B$	Ecuación 16.....	18
$\% \text{Err Rel} = \left(\frac{Q_{\text{calculado}} - Q_{\text{real}}}{Q_{\text{real}}} \right) 100\%$	Ecuación 17.....	18
$\text{Profundidad} = -23,33 \text{ Voltaje}^2 + 105,02 \text{ Voltaje} - 61,57$	Ecuación 18.....	23
$y = \left[\frac{(Y_{i+1} - Y_i)}{(X_{i+1} - X_i)} \right] \cdot x - \left[\frac{(Y_{i+1} - Y_i)}{(X_{i+1} - X_i)} \right] \cdot X_i + Y_i$	Ecuación 19.....	27

INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo existe una gran cantidad de poblaciones que se encuentran en situación de amenaza, debido a la generación de flujos de escombros, flujos que pueden o no estar acompañados de una erupción volcánica. Estos fenómenos pueden ser altamente catastróficos y por ello ha tenido gran auge el estudio de los mismos.

En este documento se presenta el desarrollo y los resultados del proyecto de investigación: Diseño e implementación de un Sistema Prototipo para la estimación de caudal en un canal abierto, basado en el procesamiento digital de imágenes como herramienta preliminar para el estudio de flujos de escombros en la cuenca del Río Páez. Este sistema pretende contribuir con el objetivo del Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPop, entidad encargada actualmente del seguimiento y vigilancia de la actividad en el Volcán Nevado del Huila (VNH) y de apoyar las estrategias de prevención para las posibles consecuencias que esta actividad genere) en el mejoramiento de la gestión del riesgo para las comunidades que por un evento, como un flujo de escombros volcánico (*lahar*), se puedan ver afectadas.

Las poblaciones asentadas en las riveras de la cuenca del río Páez, han sido afectadas negativamente en el pasado por varios flujos de escombros, originados por diferentes razones: en 1994 por un sismo tectónico, de magnitud 6.4 en la escala de Richter, en la cercanías al VNH que produjo la desestabilización de material tanto en el Complejo Volcánico como en las laderas que forman la cuenca, durante una época muy lluviosa; y como consecuencia de las erupciones del 19 de febrero 2007, 18 de abril 2007 y 20 de noviembre 2008 (Pulgarín y otros, 2009). Estos sucesos produjeron hechos lamentables, como la muerte de 1000 personas, en 1994, y se han reportado múltiples daños en infraestructura (Worni y otros, 2008).

El desarrollo de este proyecto permitió estimar el caudal de un flujo turbio en un canal abierto usando una técnica que no requiere del contacto con el fluido, y presenta un avance en el estudio de la metodología requerida para que este prototipo funcione, dando la posibilidad futura de dar apoyo al estudio de flujos de escombros reales, por medio de un sistema de visión artificial, para lo que se elaboró un análisis que permite proyectar este sistema prototipo a un escenario más grande, como la cuenca del río Páez.

1. VOLCÁN NEVADO DEL HUILA (VNH) Y FLUJOS DE ESCOMBROS

1.1. VOLCÁN NEVADO DEL HUILA

“El Volcán Nevado del Huila ubicado entre los departamentos del Cauca, Huila y Tolima, posee su altura máxima en el pico central a 5364 m.s.n.m.”¹ Este volcán ha presentado una reactivación con las erupciones de 2007 y 2008, en las que ha tenido lugar emisiones de ceniza, flujos de escombros entre otros efectos, perjudicando de diferentes formas a las poblaciones asentadas en los alrededores del volcán.

Respecto a los flujos de escombros producidos en estas erupciones se han hecho varios estudios con el objetivo de entender mejor el comportamiento de los mismos en las cuencas de los ríos Páez y Símbola y en esa medida poder desarrollar métodos de prevención ante los riesgos que éstos representan.

1.2 FLUJOS DE ESCOMBROS.

“Los flujos de escombros son flujos controlados por gravedad (Leeder, 1991), en los cuales partículas desde el tamaño pde limo a bloques están ligadas en una matriz de sedimentos arcillosos y agua”². Éstos se pueden generar por diferentes razones como: precipitaciones pluviales intensas que se infiltran en el terreno y remueven materiales sueltos en la superficie; por sacudidas sísmicas, que pueden licuar los suelos ubicados en las pendientes altas; por erupciones volcánicas, ya sea asociados a lagos cratéricos o coberturas de nieve o hielo sobre los volcanes (Pulgarín & Cardona, 2008); por rompimiento de presas naturales o por transformaciones de avalanchas de escombros³ en flujos de escombros (Vallance & Scott, 1997).

¹ Tomado de www.ingeminas.gov.co/Popayan/Volcanes/Nevado-del-huila/Generalidades.aspx

² Pulgarín, Depósitos Masivos del Pleistoceno tardío asociados al colapso del flanco sur del volcán Nevado del Huila. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Sismología y Vulcanología), 2000.

³ Las avalanchas de escombros son flujos enormes y muy rápidos generados a partir del colapso gravitacional de sectores de edificios volcánicos o no volcánicos y pueden o no estar acompañados de erupciones volcánicas (Pulgarín, 2000)

1.3 ALGUNOS ESTUDIOS HECHOS EN EL VNH

1.3.1 Mapa de amenaza volcánica

En 1986, el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS) elaboró una primera versión del mapa de amenaza volcánica del VNH (Cepeda y otros, 1986). En 1996 en el marco del convenio INGEOMINAS - NASA KIWE (INGEOMINAS, 1996), luego de coleccionar, evaluar, analizar e interpretar la información disponible sobre el VNH, se publica la segunda versión del mapa de amenaza volcánica del VNH, considerando tres zonas de amenaza: alta, media y baja (rojo, naranja y amarillo respectivamente en la Figura 1).

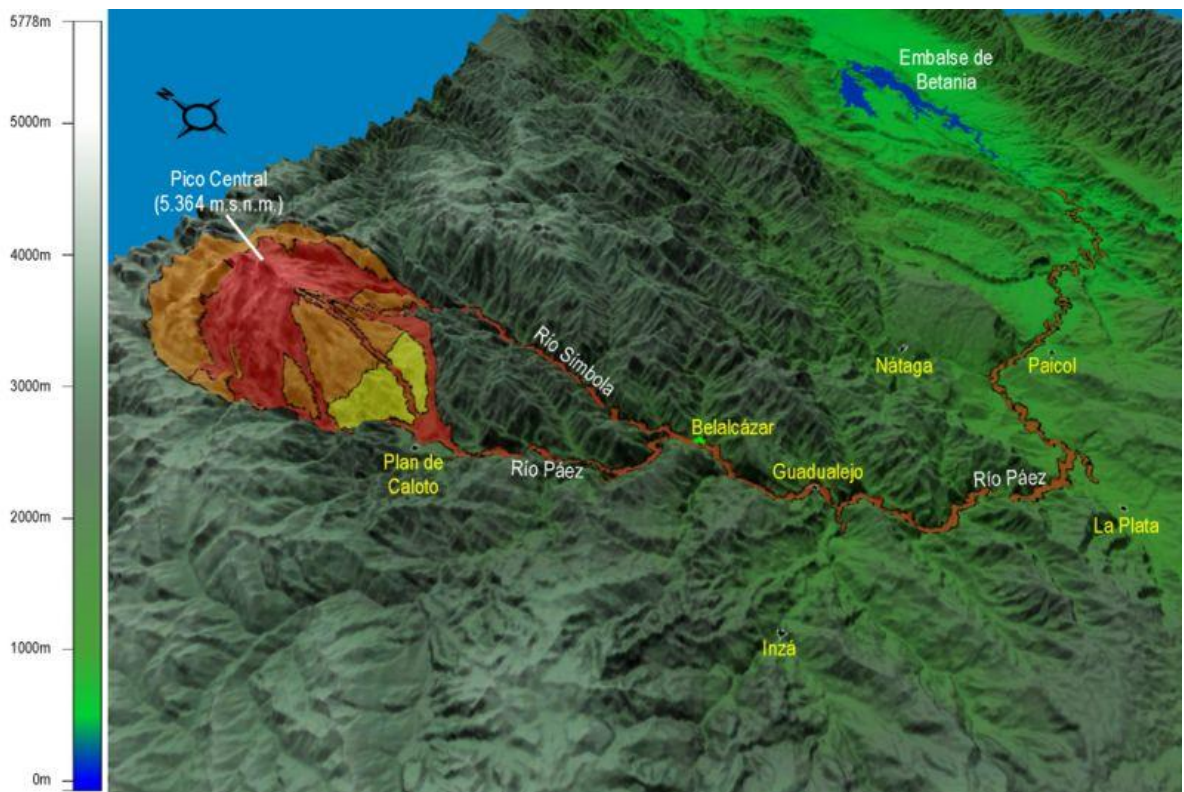


Figura 1. Mapa de Amenaza VNH, versión 1996 (Tomado de http://intranet.ingeoimas.gov.co/popayan/Imagen:Mapa_Amenaza_VNH_3_D.jpg).

1.3.2 Simulaciones de flujos de escombros mediante el método *Lahar Z*

Luego de las erupciones de 2007 se hicieron estudios de simulaciones de flujos de escombros usando el Método *Lahar-Z*, implementado por Iverson y otros (1998) en Estados Unidos, el cual asume que el volumen total del flujo es vaciado de forma uniforme en toda la cuenca o canal, de modo que el área mojada en una sección transversal A_t demuestra una relación con el volumen total V sin importar su ubicación a lo largo del canal o de la cuenca (Schilling, 2002).

Haciendo una corrección de este método para su escalamiento en la cuenca del Río Páez, se logró el modelo que se describe en la ecuación 1 (Cardona y otros, 2008).

$$A_t = 0,006 V^{2/3} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

A_t es el área inundada de la sección transversal.

V el volumen total del flujo.

Logrando predecir con este modelo posibles escenarios ante flujos de escombros, semejantes a los ocurridos en 1994 y 2007 en esta cuenca. Estos escenarios son representados en imágenes como la que se presenta en la Figura 2 (NASAKIWE & INGEOMINAS, 2009).

1.3.3 Estudios de velocidad en Flujos de escombros.

Considerando que a lo largo de la cuenca del río Páez se pueden encontrar secciones de trazado lineal y secciones de trazado no lineal (curvas), en los flujos de 1994, 2007 y 2008 se han dejado al descubierto curvas sobre las que los flujos de escombros han generado súper elevaciones significativas. De las súper elevaciones del evento de 2008 se tomaron algunas medidas de modo que al usar el modelo de la ecuación 2, se lograron estimaciones de la velocidad media del flujo de escombros a lo largo de la cuenca del río Páez, obteniendo estimaciones de velocidad como los que se muestran en la Tabla 1 y en la Figura 3.

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta z} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

v es la velocidad media.

g es la gravedad.

Δz es la súper-elevación. Diferencia entre márgenes izquierdo y derecho del flujo.

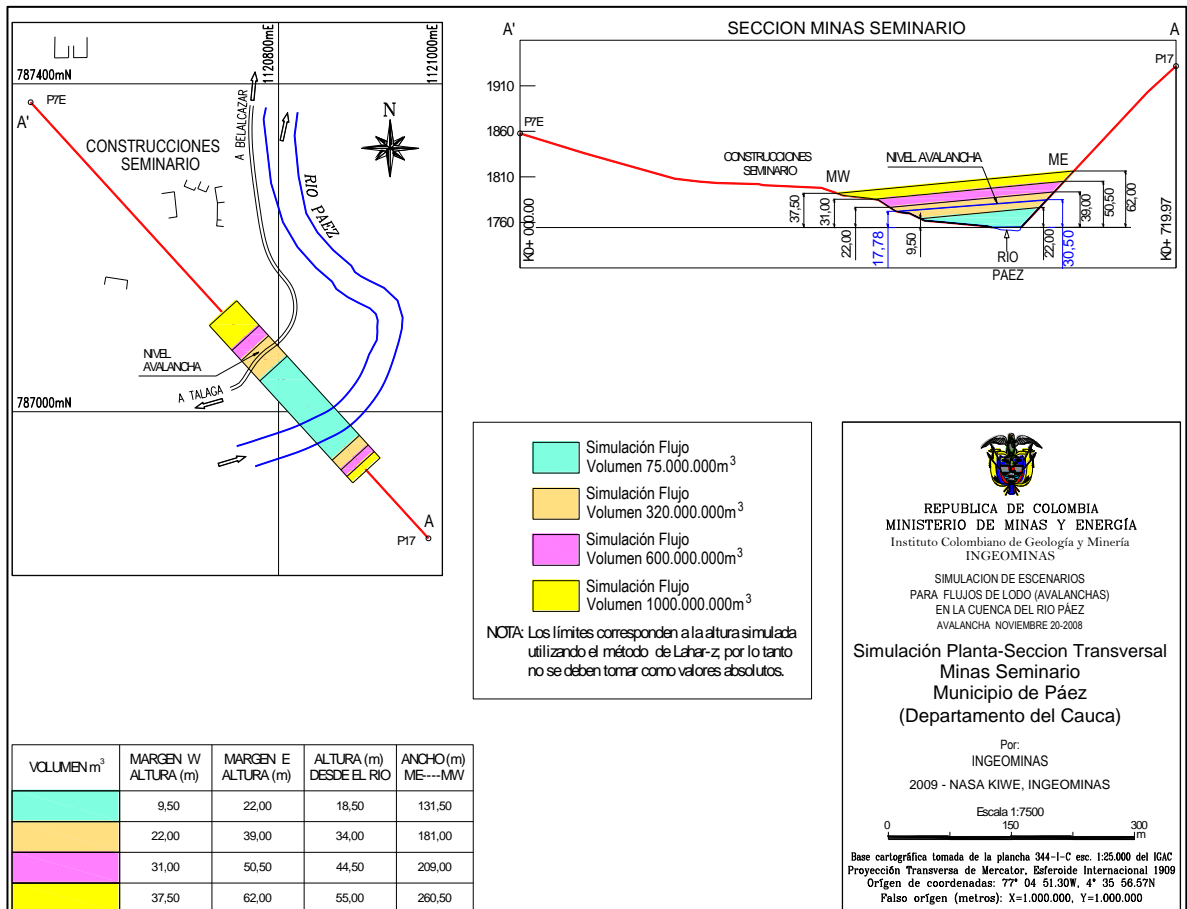


Figura 2. Escenarios ante flujos de escombros para la sección transversal Minas-Seminario (Tomado de NASAKIWE & INGEOMINAS, 2009).

En la Tabla 1 se pueden observar valores menores a 45 km/h hallados a partir del km 50 y según los registros de los sensores de *lahar* ubicados en el valle del río Páez la velocidad del *lahar* fue de 35 km/h al pasar por Belalcázar, ubicado aproximadamente a 50 km desde el volcán por el valle del Río Páez (Oliveras, 2008). Las velocidades estimadas a partir de los tiempos de arribo a tres estaciones de flujos de lodo y a una estación sismométrica ubicados en los costados de la cuenca del río Páez, así como el arribo del flujo a la población de Belalcázar se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1. Datos de campo: medidas del *lahar* del 20 de Nov. 2008, Nevado de Huila (partes alta y media del valle del río Páez) (Tomado de Pulgarin y otros, 2008).

Altura (m.s.n.m)	Distancia al Volcán (km)	Altura de inundación(m)		Súper- Elevación (m)	Ancho total de inundación(m)	Velocidad (km/h)
		hizq	hder**			
2002	21.16	45	65	-20	200	71.3
1901	24.49	60	28	32	250	90.2
1912	25.11	25	60	-35	140	94.3
1794	28.18	30	50	-20	320	71.3
2260	32.06	60	15	45	120	106.9
1853	34.23	38	76	-38	140	98.2
1270	53.55	14	6	8	160	45.1
1276	55.48	15	10	5	140	35.6
1232	57.35	6	11	-5	150	35.6
1240	58	5	9	-4	120	31.9
1206	58.45	7	12	-5	130	35.6
1189	58.88	8	4	4	110	31.9
1103	69.61	28	20	8	95	45.1
1127	70.85	17	20	-3	85	27.6
1097	71.96	25	20	5	50	35.6
1069	73.43	28	25	3	60	27.6
1068	74.12	30	28	2	60	22.5
1058	75.19	25	28	-3	40	27.6
1057	76.21	20	25	-5	85	35.6
1031	77.84	10	15	-5	160	35.6
1024	77.94	10	12	-2	100	22.5
998	78.1	15	12	3	55	27.6
1010	78.32	10	12	-2	100	22.5
1018	78.41	12	10	2	55	22.5
1021	78.54	12	15	-3	75	27.6
1031	79.62	10	9	1	73	15.9
1041	80.49	12	8	4	135	31.9
1020	82.17	15	10	5	170	35.6
866	99.66	28	20	8	80	45.1
840	102.69	28	20	8	75	45.1
897	104.11	15	12	3	75	27.6
866	105.54	20	15	5	90	35.6
808	107.63	14	12	2	125	22.5

* hizq. es el altura de la inundación en el flanco izquierdo de la sección.

** hder. es el altura de la inundación en el flanco derecho de la sección.

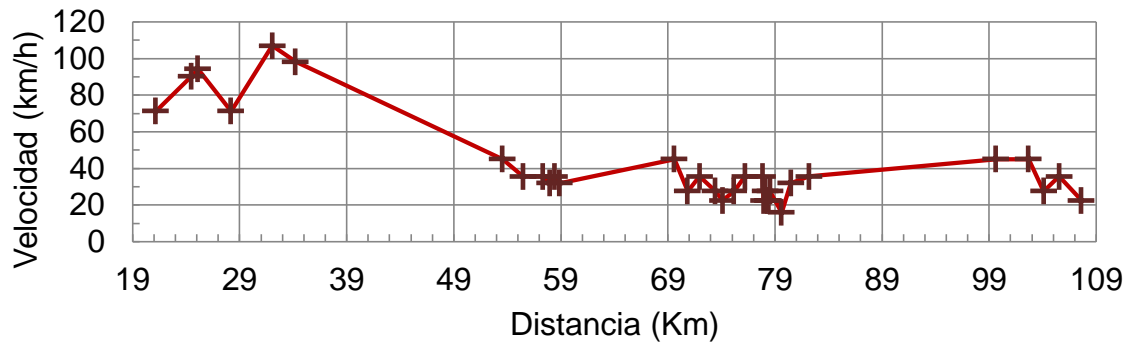


Figura 3. Gráfica de Velocidades vs Distancia (km) de los datos la Tabla 1.

Tabla 2. Velocidades estimadas. Flujo de escombros de la erupción del 20 de noviembre de 2008 (Tomado de Oliveras, 2008).

Lugar o sensor	Tiempo de arribo (hora local)	Tiempo de arribo (s)	Distancias entre estaciones* (Km)	Velocidad estimada Mínima (Km/h)	Velocidad estimada Máxima (Km/h)	Velocidad estimada Promedio (Km/h)
Erupción Pico Central VNH	09:44:25 p.m.					
Buco, Banda Ancha	09:44:25 p.m.	526	17	116.35	116.35	116.35
Buco Flujos de Lodo	10:00:21 p.m.	1319	3	13.62	55.96	
Tóez, Flujos de Lodo	10:06:46 p.m.	1541	3.12	21.71	53.09	37.40
Cuetandiyó, Flujos de Lodo	10:16:01 a.m.	1933	5.88	30.70	53.53	42.12
Belalcázar**	10:38:00 p.m.	3304	15.2	35.25	36.03	35.64

* Distancias medidas sobre el cauce del Río Páez.

** Reporte de hora de llegada del flujo de escombros, según operador de la Cruz Roja Belalcázar.

1.4 ESTADO DEL ARTE SOBRE DETECCIÓN DE FLUJOS DE ESCOMBROS

Existen diferentes sensores que pueden ser usados en la detección y el estudio de flujos de escombros, tal como muestra la Tabla 3 en la que se exponen los principales sensores usados en estudios en Italia.

Tabla 3. Principales sensores de sistemas de alerta usados en Italia ante eventos de flujos de escombros (Tomado de Massimo & Marchi, 2008).

Sensores	Operación	Ventajas	Limitaciones
Ultrasónicos, radar y sensores láser.	Medición de escenarios de flujos.	Fácil configuración de umbrales de alerta.	Los sensores ultrasónicos deben ser colgados sobre el canal: la instalación puede resultar difícil si las orillas del canal son inestables.
Geófonos y sismógrafos.	Medición de las vibraciones de la tierra causada por flujos de escombros.	Fácil y segura instalación (el sensor es enterrado en lugares seguros en las orillas de los ríos).	Configurar umbrales de alerta puede ser complicado. El riesgo de falsas alarmas debido a otras fuentes de vibración de la tierra. La necesidad de instalar filtros de señales puede aumentar la complejidad del sistema.
Péndulos.	Detección de flujos por la inclinación del péndulo.	Dispositivo simple y robusto.	El péndulo debe ser colgado sobre el canal: la instalación puede resultar difícil si las orillas del canal son inestables.
Sensores de cuerdas.	Detección de flujos de escombros por el rompimiento de los hilos.	Dispositivo simple y robusto.	Se requiere de la restauración luego de la activación. Hay riesgo de falsas alarmas debido a circunstancias extrañas (paso de animales, caída de árboles, etc.).
Fotoceldas (<i>infrared photobeams</i> , etc).	Detección del paso del flujo.	No necesita restauración después de la activación.	Una cuidadosa instalación es necesaria para evitar que los sensores entren en contacto con el flujo.
Cámaras CCD para máquinas de detección.	Reconocimiento de flujos de escombros.	Instalación segura (la cámara puede ser ubicada al lado del canal).	La presencia de niebla o la ocurrencia nocturna de los flujos puede complicar el uso del sistema.

Respecto al uso de cámaras de vigilancia en estos sistemas, se han realizado trabajos en los que a partir de procesamiento digital de imágenes (PDI) se estudian estos flujos, con el objetivo de mejorar las técnicas de prevención de desastres. Dos artículos que así lo demuestran son los siguientes:

- *Surface Velocity Computation of debris Flows by Vector Field Measurements*, (Inaba & Itakura, 1999) (Cálculo de la velocidad superficial de Flujos de Escombros por mediciones en campos vectoriales)

En este trabajo se presentan los resultados de mediciones de campo vectorial de velocidades de flujos de escombros a partir de los métodos *spatio temporal derivative space method* (“método del espacio derivativo - espacio temporal” STDSM) y el método propuesto *multi-resolution spatio temporal derivative space* (Inaba y otros, 1999), los cuales aplicaron a imágenes de video de flujos de escombros reales: Uno es un video de dos flujos de escombros ocurridos en mayo 1, 1995 y junio 3, 1995 en el río Nojiri, desde el Volcán Sakurajima, en la Prefectura de Kagoshima, en el sur de Japón. El segundo, es un video de un flujo de escombros ocurrido en julio 8, 1996, en el Moscardo Torrent en Italia.

- *Video-Derived Velocity Distribution Along a Debris Flow Surge*. Distribución de velocidades video-derivado de flujos de escombros (Arattano & Marchi, 1999).

En el trabajo citado se presenta el estudio de videos de dos flujos de escombros ocurridos en un canal instrumentado en los Alpes Italianos, y el posterior uso de técnicas de procesamiento de imágenes (STDSM) en la medición de velocidad superficial. Las velocidades medias de los flujos fueron corroboradas a partir de las velocidades medias logradas de sensores ultrasónicos, resultados que se muestran en la Tabla 4 (Arattano & Marchi, 1999).

Tabla 4. Comparación de velocidades medidas a través de sensores ultrasónicos y el procesamiento digital de imágenes en video. (Tomado de Arattano & Marchi, 1999).

	Ultrasonic measurements ($m \cdot s^{-1}$)	Image Processing ($m \cdot s^{-1}$)	Difference (%)
A	4.7	4.3	-8.5
B	7.4	7.0	-5.4
C	7.5	7.2	-4.0
D	7.9	7.5	-5.1
E	5.1	4.8	-5.9

En el presente trabajo se elaboran experimentos con una infraestructura por medio de la cual se pretende realizar un prototipo para la determinación de parámetros (tales como la súper-elevación del fluido en una curva, velocidad, área de inundación y caudal) de un fluido (agua turbia) en un canal abierto, a través de procesamiento digital de imágenes logradas desde una webcam instalada estratégicamente de forma lateral al flujo.

2. CÁLCULO DE CAUDAL EN CANALES ABIERTOS

Tomando en cuenta que se tiene como objetivo la estimación de caudal volumétrico, los fundamentos teóricos que nos ocuparán en este capítulo serán los relacionados con el caudal volumétrico, como se define y como puede ser deducido en el caso particular de un flujo en un canal abierto.

El caudal Q está definido como el producto entre el área transversal (A_m) y la velocidad (v) normal del fluido a esa área transversal (ecuación 3), lo que es igual a la cantidad de volumen (dV) que pasa en un tiempo (dt) determinado por el canal (ecuación 4).

$$Q = A_m \cdot v \quad \text{Ecuación 3}$$

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad \text{Ecuación 4}$$

Si el caudal es constante en un intervalo de tiempo T_1 a T_2 , el volumen total V que ha pasado será:

$$V_{(T_2-T_1)} = \int_{T_1}^{T_2} Q \cdot dt = Q \cdot (T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 5}$$

De modo que si se conocen los valores de caudal Q_i en intervalos de tiempo consecutivos, se puede calcular el volumen total en un intervalo de tiempo T_0 a T_n de la siguiente manera (Mott, 2006):

$$V_{(T_n-T_0)} = \sum_{T_0}^{T_n} Q_i \cdot \Delta T_i \quad \text{Ecuación 6}$$

A continuación se describen los métodos a usar, a través de los cuales se pueden obtener los valores de velocidad media del flujo (v) en canales abiertos y el área transversal de inundación (A_m).

2.1 MEDICIÓN DE VELOCIDAD EN CURVAS

Cuando se trata de medir caudal en canales abiertos, uno de los métodos se basa en la elevación que alcanza un flujo sobre uno de los costados del canal, cuando éste encuentra una curva en su trayectoria. Entre la parte exterior e interior de la curva se desarrolla una súper-elevación del nivel de fluido por causa de la fuerza centrífuga⁴, cuyo valor será proporcional tanto al cuadrado de la velocidad media

⁴ La fuerza centrífuga es una fuerza ficticia que aparece cuando se describe el movimiento de un cuerpo en un sistema de referencia en rotación.

en la sección transversal como al ancho del cauce e inversamente proporcional al radio de curvatura tal como lo muestra la ecuación 7 (Vide, 2003; Dingman, 2009)

$$\Delta z = \frac{v^2 \cdot B}{g \cdot r} \xrightarrow{\text{despejando } v} v = \sqrt{\frac{g \cdot r \cdot \Delta z}{B}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$\Delta z = (z_A) - (z_{A'})$: es la súper-elevación generada entre los márgenes izquierdo y derecho o puntos A' y A.

v : es la velocidad media en la sección

B : ancho del cauce (en superficie libre)

g : la gravedad en el lugar

r : el radio de curvatura de la curva del cauce.

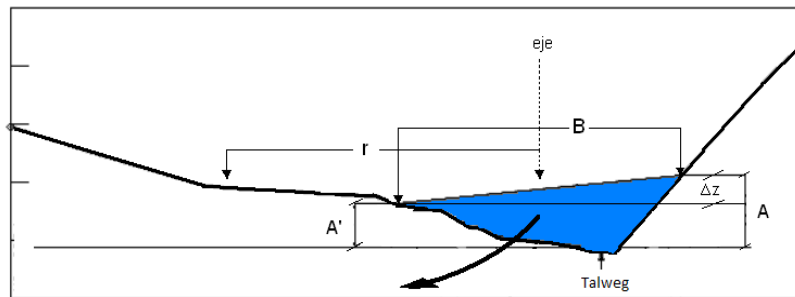


Figura 4. Sección transversal de un río en curva y parámetros usados para el cálculo de velocidad: márgenes izquierdo y derecho del flujo en la sección transversal A' y A, Δz , r y B . Fuente: Basado en libro: Ingeniería Fluvial (Vide, 2003).

El Modelo se obtiene suponiendo que todas las velocidades filamentosas en la curva son iguales a la velocidad media v y que todas las líneas de corriente tienen un mismo radio de curvatura r , por lo tanto la superficie libre del agua como se puede ver es una línea recta, condición para la que se hace válida la ecuación 7 (Chow, 2004).

Aplicando la segunda ley de Newton a cada línea de corriente y luego integrando la sección completa del canal, Grashof logró demostrar que el perfil transversal de la superficie es una curva logarítmica y que la súper elevación depende del radio más interno (r_i) del fluido y del radio más externo (r_o) del fluido en la sección transversal (en Chow, 2004), de modo que la súper-elevación es:

$$\Delta z = 2.30 \frac{v^2}{g} \log \frac{r_o}{r_i} \quad \text{Ecuación 8}$$

Woodwards supuso que la velocidad es cero en los bancos y tiene un valor máximo de $v_{máx}$ en el centro, variando en el intervalo, de acuerdo a una curva parabólica (en Chow, 2004). Usando la segunda ley de Newton, Woodward obtuvo la fórmula siguiente para la súper-elevación:

$$\Delta z = \frac{v_{max}^2}{g} \left[20 \frac{r}{3B} - 16 \frac{r^3}{B^3} + \left(\frac{4r^2}{B^2} - 1 \right)^2 \ln \left(\frac{2r+B}{2r-B} \right) \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

Cabe aclarar que a lo largo de la curva, el valor de Δz varía, pues hay una distancia que el fluido recorre sobre la curva antes de alcanzar su máxima altura desde donde cae de nuevo. Según resultados logrados por Shukry, es posible encontrar este punto (llamado "d") en la curva en términos de la relación entre los ángulos θ_d (ángulo al punto d) con θ (ángulo total de la curva) medidos desde el inicio de la curva como muestra la Figura 5 y la Tabla 5, resultados que han sido usados en canales pequeños (Chow, 2004).

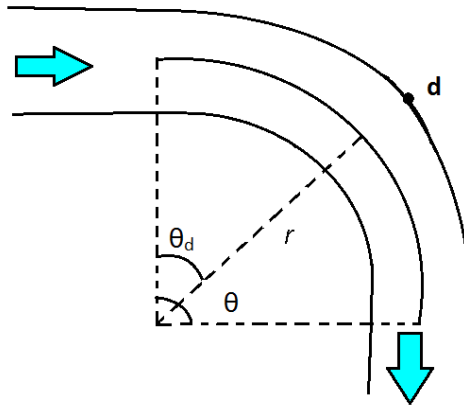


Figura 5. Punto de mayor depresión d, o punto del máximo Δz .

Tabla 5. Ubicación del punto de depresión máxima de la superficie o punto d.

	R=10500	R=21000	R=31500	R=52500	R=73500
	θ_d/θ	θ_d/θ	θ_d/θ	θ_d/θ	θ_d/θ
θ	$r/B=1.00$, una constante				
45	0.111	0.333	0.333	0.400	0.556
90	0.111	0.189	0.250	0.306	0.667
135	0.148	0.185	0.296	0.371	0.445
180	0.056	0.111	0.167	0.278	0.333

R: Número de Reynolds, característico del fluido.

B: ancho del cauce (en superficie libre).

r: el radio de curvatura de la curva del cauce.

θ : Ángulo total de la curva.

θ_d : Ángulo al punto d.

2.2 ÁREA TRANSVERSAL DE INUNDACIÓN

El área transversal de inundación A_m es el área que ocupa el flujo en un momento dado en la sección transversal y se mide sobre el lecho fluvial hasta la superficie libre del flujo. En la Figura 6 se representa el área de inundación de color azul y a ubicación de la webcam y el campo de visión de la misma respecto del fluido.

El cálculo del área mojada se puede sobreestimar si llegan a ocurrir casos como el de la Figura 6 (B) en la que la superficie libre real no tiene una forma lineal y por tanto el cálculo del área inundada detectada será mayor; o se puede subestimar como en caso de la Figura 6 (C), en la que el campo de visión de la cámara no permitiría identificar toda el área de inundación.

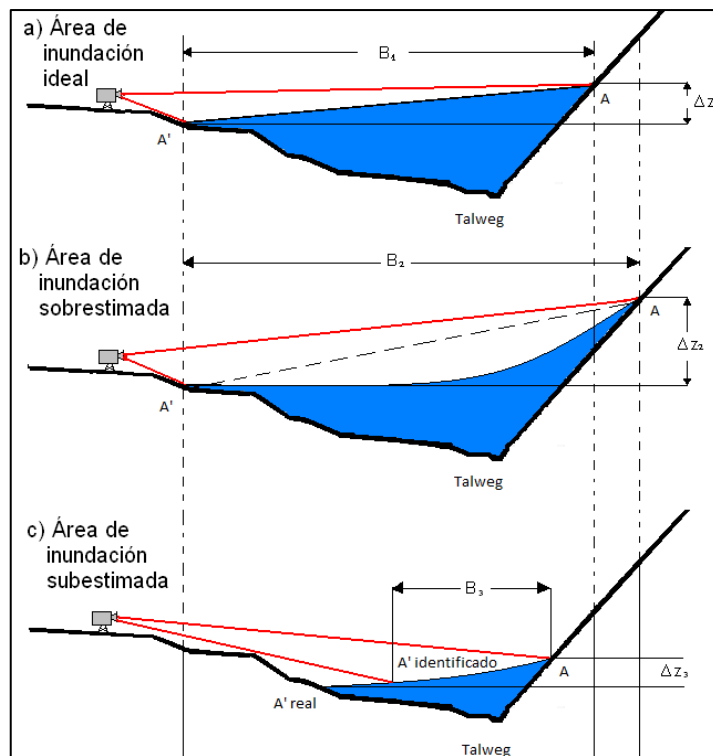


Figura 6. Errores en la obtención de los parámetros B , Δz y área de inundación. (A) Área ideal. (B) Área sobrestimada. (C) Área subestimada.

Toda sección transversal en una curva, se caracteriza por que corresponde al corte vertical del canal en uno de sus radios.

Para calcular el área mojada o de inundación, se puede partir de un mapa de la sección transversal a estudiar (ver Figura 7) y de la ubicación de los puntos hasta donde el fluido alcanza a mojar la sección transversal (A' y A).

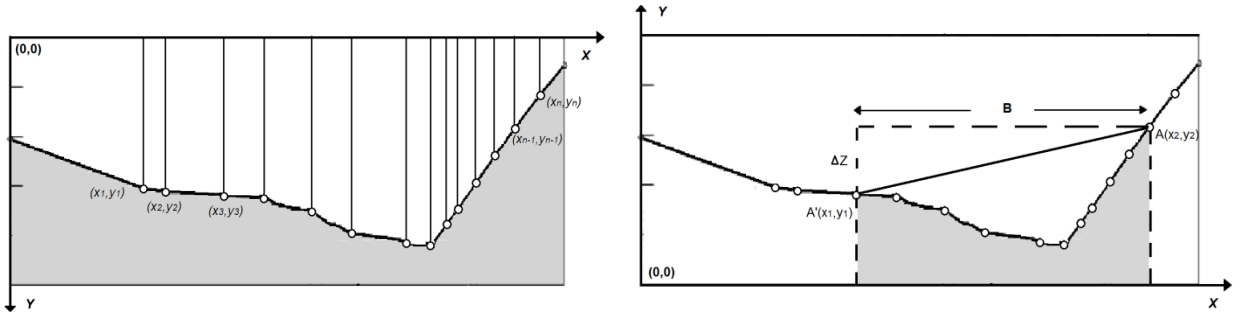


Figura 7. Mapa de lecho fluvial o sección transversal (izq.). Datos necesarios para medir el área mojada (der.).

Una vez identificados estos puntos con sus coordenadas correspondientes en el mapa de la sección transversal, si se asume que la superficie libre del fluido genera una línea recta en la sección, entonces el área mojada sería el área del rectángulo punteado en la Figura 7 menos el área del triángulo de base Δz menos el área de color gris en la Figura 7:

$$A_m = B \cdot y_2 - \frac{B \cdot \Delta z}{2} - \int_{x_1}^{x_2} y(x) dx \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

A_m : Área transversal de inundación calculada.

B : ancho del cauce (en superficie libre)

$\Delta z = y_2 - y_1$: es la súper-elevación generada entre los márgenes izquierdo y derecho o puntos A' y A (ver 'y₂' y 'y₁' Figura 7).

y_2 : Altura del punto A (ver Figura 7)

$y(x)$: Alturas del mapa del lecho fluvial respecto de los puntos en planta.

2.3 CANAL ABIERTO Y CAUDAL DE REFERENCIA.

El caudal de referencia se refiere al caudal que podría ser usado para certificar las medidas de caudal hechas por cualquier otro sistema, como el propuesto en este proyecto; la obtención de dicho caudal de referencia dependerá del canal sobre el que se esté trabajando. Por tal razón a continuación se describe el canal que fue construido para los propósitos de este proyecto.

El canal está formado por una depresión moldeada en un suelo de tierra arcillo arenosa, un tipo de tierra poco permeable por el agua, debido a su baja porosidad.

Este canal cuenta con una curva de 90° sobre la que es posible ubicar una cámara de video. Para el control del fluido se cuenta con un tanque de 500 L y una válvula de bola de 3" como se observa en la Figura 8.



Figura 8. Tanque de 500 L y válvula de bola de 3", instalado al inicio del canal, desde donde se suministrará el fluido.

Algunas de las características del canal, como la forma de las secciones transversales y la pendiente media de los tres tramos más importantes del canal, se muestran en la Figura 9.

A continuación se describe un instrumento y dos metodologías que permiten medir velocidad en un canal abierto y que pueden ser usadas para estimar caudal y servir de referencia:

1. Para obtener mediciones de velocidad es posible hacer uso de instrumentos denominados correntómetros o molinetes, los cuales registran el número de vueltas de una hélice que puede girar libremente, y que es impulsada a girar por el fluido. Para ello la hélice debe ser sumergida en el fluido (Vélez, 2000).
2. Por otro lado existen fórmulas empíricas para calcular la velocidad del agua que se desliza en un canal abierto. Éstas están determinadas por varios factores (Vélez, 2000):
 - *El gradiente o la pendiente(S)*. Si todos los demás factores son iguales, la velocidad de la corriente aumenta cuando la pendiente es más pronunciada.
 - *La rugosidad*. El contacto entre el agua y los márgenes de la corriente causa una resistencia (fricción) que depende de la suavidad o rugosidad del canal. En

las corrientes naturales la cantidad de vegetación influye en la rugosidad al igual que cualquier irregularidad que cause turbulencias.

- **Forma.** Los canales pueden tener idénticas áreas de sección transversal, pendientes y rugosidad, pero puede haber diferencias de velocidad de la corriente en función de su forma. La razón es que el agua que está cerca de los lados y del fondo de una corriente se desliza más lentamente a causa de la fricción; un canal con una menor superficie de contacto con el agua tendrá menor resistencia a la fricción y por lo tanto el agua tendrá una mayor velocidad. El parámetro utilizado para medir el efecto de la forma del canal se denomina radio hidráulico (R) y se define como el área mojada de la sección transversal dividida por el perímetro mojado, o sea la longitud del lecho y los lados del canal que están en contacto con el agua. El radio hidráulico tiene, por consiguiente, una cierta longitud. Si todos los demás factores son constantes, cuanto menor es el valor de R menor será la velocidad.

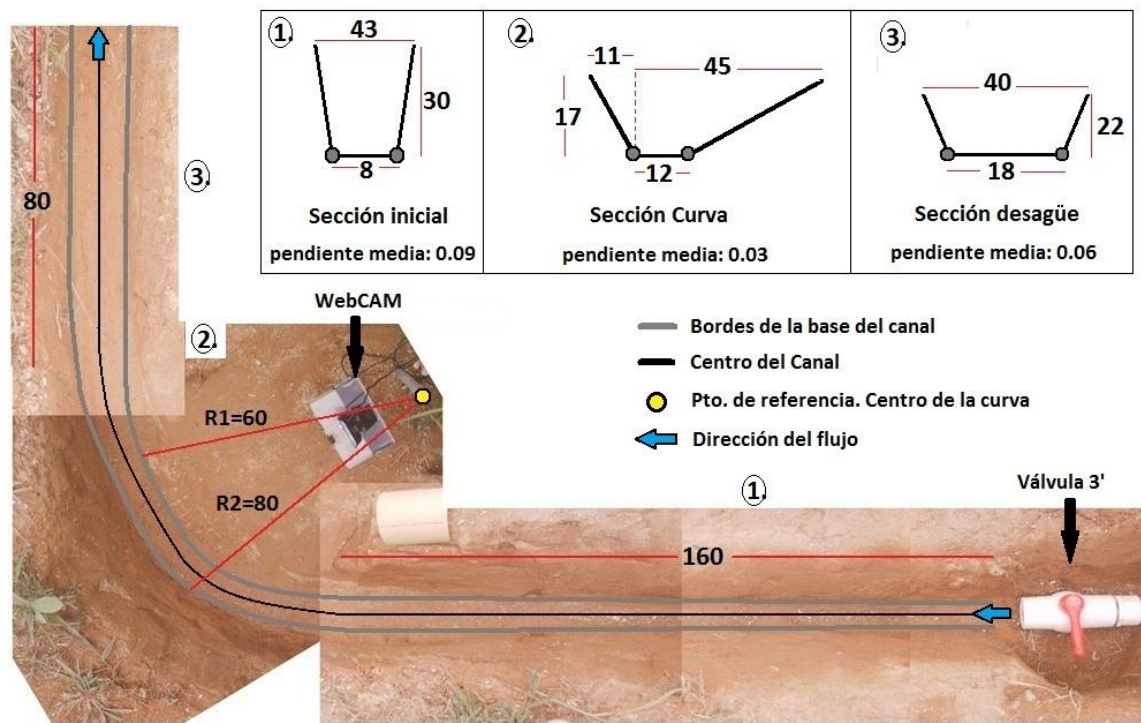


Figura 9. Canal construido y sus secciones transversales (todas las dimensiones en cm): Consta de 3 zonas. Zona inicial 1, en la que se recibe la descarga del fluido desde el tanque a través de la válvula de 3". Zona de curva 2, en la que se observaría la súper elevación usando la Webcam. Zona 3, de desagüe o descarga de la curva.

Todas estas variables que influyen en la velocidad de la corriente se han reunido en una ecuación empírica lograda por el francés Chézy, tal como sigue (Vide, 2003):

$$v = C\sqrt{R \cdot S} \quad \text{Ecuación 11}$$

v : es la velocidad media de la corriente en metros por segundo

R : es el radio hidráulico en metros

S : es la pendiente media del canal en metros por metro (también se utiliza la letra i para designar a la pendiente)

C : es coeficiente de resistencia al flujo que depende del fluido y de las condiciones del lecho del canal.

3. Por otro lado en el experimento del presente proyecto, es posible obtener de forma indirecta el caudal volumétrico Q , basándose en el nivel de agua en el tanque instalado en el canal y en la apertura de la válvula, usando el teorema de Torricelli, el cual describe que a la salida de un orificio en un tanque el caudal puede ser calculado por la ecuación 12 (Mott, 2006):

$$Q = C_d A \sqrt{2gh} \quad \text{Ecuación 12}$$

C_d es el coeficiente de descarga el cual depende de la forma de la abertura.

A es el área transversal de apertura de la válvula.

g es la gravedad.

h es el nivel de agua en el tanque.

2.4 ERRORES EN LA MEDIDAS

La incertidumbre debida a la propagación de errores en el cálculo de un parámetro como el caudal, se puede obtener a partir de la ecuación 13 (Skoog y otros, 2001), en la que f es una función dependiente de las variables x_1, x_2, \dots, x_n y donde δx_i es la incertidumbre en la medida de la variable x_i .

$$\delta f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right| \delta x_i \quad \text{Ecuación 13}$$

Por lo tanto el error en la medida de caudal, según la ecuación 3 será:

$$\delta Q = |A_m| \delta v + |v| \delta A_m \quad \text{Ecuación 14}$$

El error en el cálculo de caudal a partir de la ecuación 12 es:

$$\delta Caudal Ref = \left| \frac{AC_d}{2\sqrt{2gh}} \right| \delta h + \left| C_d \sqrt{2gh} \right| \delta A + \left| A \sqrt{2gh} \right| \delta C_d \quad \text{Ecuación 15}$$

Y el error en el cálculo de velocidad a partir de la ecuación 7 es:

$$\delta v = \left| \frac{1}{2} \sqrt{\frac{gr}{B\Delta z}} \right| \delta \Delta z + \left| \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g\Delta z}{Br}} \right| \delta r + \left| \frac{1}{2} \sqrt{\frac{gr\Delta z}{B^3}} \right| \delta B \quad \text{Ecuación 16}$$

En las anteriores ecuaciones:

A_m es el área transversal de inundación calculada.

A es el área transversal de apertura de la válvula.

g es la gravedad.

h es el nivel de agua en el tanque.

C_d es el coeficiente de descarga el cual depende de la forma de la abertura.

$\Delta z = (zA) - (zA')$: es la súper-elevación generada entre los márgenes izquierdo y derecho o puntos A' y A .

v : es la velocidad media en la sección

B : ancho del cauce (en superficie libre)

g : la gravedad en el lugar

r : el radio de curvatura de la curva del cauce.

Por otro lado el porcentaje de error de una medida, como el caudal calculado ($Q_{calculado}$) respecto de un caudal real (Q_{real}) se obtiene de la ecuación 17 (Skoog y otros, 2001).

$$\% Err Rel = \left(\frac{Q_{calculado} - Q_{real}}{Q_{real}} \right) 100\% \quad \text{Ecuación 17}$$

3. PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.

Antes de describir sobre el procesamiento digital de las imágenes obtenidas y los métodos que hacen parte del sustento teórico de este proyecto, es preciso comentar sobre dos de las condiciones que el sistema real debería enfrentar:

- La iluminación será la proporcionada por el sol, lo que implica una iluminación muy variada en intensidad, dirección y espectro.
- Presencia de nubes, lluvia y/o neblina.

Además se debe aclarar que no se pueden predecir las propiedades (color, textura y demás, ante la cámara) que un nuevo flujo de escombros pueda tener.

Considerando lo dicho anteriormente, se ha de esperar que el algoritmo sea lo suficientemente robusto como para que en investigaciones futuras se puedan proyectar los resultados logrados a un sistema real. Para lograrlo, el procesamiento digital de imágenes debe estar basado en una buena calibración espacio real - espacio imagen⁵, y alimentado por algoritmos que permitan la detección del fluido, como los de detección de movimiento en imágenes de video.

3.1 CALIBRACIÓN DE CÁMARA

Si se quiere conocer la posición real de los objetos de una escena, es necesario conocer con exactitud el valor de una serie de parámetros como la distancia focal real de la cámara - que será un poco distinta a la nominal o a la entregada por el fabricante -, el valor del coeficiente de distorsión de la lente o la inclinación de la cámara respecto de, por ejemplo, una cinta transportadora por dónde pueden ir los objetos de estudio, en un proceso industrial. La obtención de estos y otros parámetros es el objetivo de los algoritmos de calibración.

La idea general de todos los algoritmos de calibración es la misma. Se colocan en posiciones perfectamente conocidas una serie de objetos y se calculan los valores de sus proyecciones reales sobre la cámara. En un segundo paso se toman unos valores aproximados de los parámetros que se consideran importantes (distancia focal, centro de la imagen y matriz de transformación) y se calculan los valores teóricos de los objetos en la imagen. Por último, a partir de la diferencias entre valores reales y teóricos, se van modificando los parámetros de modo que se disminuya ese error.

⁵ El espacio real corresponde a las coordenadas espaciales de la escena, el canal en este caso y el espacio de la imagen corresponde a las coordenadas (i,j) de cada pixel de la imagen

En el caso de este trabajo, el proceso de calibración requiere de un levantamiento topográfico respecto de la posición de la cámara, con el que se obtienen las medidas del espacio (cauce) de una sección transversal, cuyos puntos son proyectados en el espacio de la imagen, con sus correspondientes píxeles. Este levantamiento topográfico se podrá lograr de una o varias secciones transversales del lugar.

3.2 DETECCIÓN DE MOVIMIENTO

La detección de movimiento en imágenes de video, se logra cuando algún objeto en movimiento, se consigue distinguir y resaltar del resto de elementos de la escena que no están en movimiento.

Dos metodologías sencillas que permiten la detección de movimiento en un video son las siguientes:

a) Detección por acumulación de fondo

Esta técnica supone la posibilidad de capturar una imagen de la escena, en la que los objetos de interés no están presentes o se encuentran estáticos, de modo que cuando aparezca o adquiera movimiento el objeto de interés, se pueda hacer una diferencia simple entre la imagen con el objeto de interés y la imagen del fondo de la escena. (De la Escalera, 2001)

Una vez hecha la diferencia entre estas dos imágenes, se puede aplicar una umbralización o segmentación de la imagen resultante, de modo que se segmente el objeto de interés.

Esta técnica posee varios problemas:

- Cambios en la imagen escena debidos a variación general de la iluminación
- Mala identificación de la imagen escena.
- Fallo ante pequeños cambios de posición de la cámara.

b) *Motion templates.*

En este caso se obtienen en principio siluetas de imágenes segmentadas a partir de la resta de imágenes consecutivas. Asumiendo que se tiene una buena segmentación con estas diferencias de imágenes, como el rectángulo en la Figura 10 (A), el cual se encuentra de color blanco para indicar que todos los píxeles del rectángulo fueron segmentados de la última resta de imágenes consecutivas. Cuando el rectángulo se mueve, nuevas siluetas aparecen y son superpuestas

como nuevas siluetas segmentadas, la nueva silueta queda de color blanco como en las Figura 10 (B) y Figura 10 (C), mientras que las viejas siluetas adquieren tonalidades más oscuras entre más antiguas sean.

Estas siluetas secuencialmente en desvanecimiento registran la historia de movimientos previos y en consecuencia se definen como “imágenes de historial de movimiento” (Bradski & Kaehler, 2008)

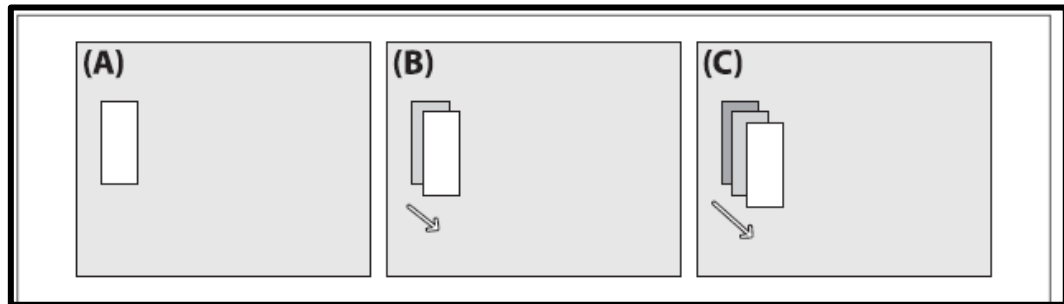


Figura 10. Diagrama de modelo de movimiento: (A) Un objeto detectado en movimiento (blanco); (B) al siguiente *frame*, el objeto se mueve y es marcado con el tiempo actual (blanco), dejando la vieja silueta a un lado (gris); (C) al siguiente *frame*, el objeto se mueve más, dejando las viejas segmentaciones como rectángulos sucesivamente más oscuros, cuya secuencia de movimientos crea el historial de movimiento (Tomado de Bradski & Kaehler, 2008).

Este método permite agregar certeza a la presencia de un objeto en movimiento en una escena, sin embargo al estar basado en el historial, es posible que si un objeto desaparece de un *frame* al siguiente, éste no desaparezca hasta que el historial haya terminado, haciendo distinguir ese objeto durante varios *frames* mas después de su desaparición, resultando lento para detectar la desaparición de objetos en cualquier lugar de la imagen y rápido para detectar la aparición de cuerpos en cualquier parte de la imagen.

Estos dos métodos son usados para hacer la detección de movimiento en imágenes de video, lo que implica que hay una secuencia temporal de imágenes, en la que los elementos estáticos de la escena no deben presentar cambios bruscos entre dos imágenes consecutivas, para lograr detectar únicamente aquellos elementos que realmente se encuentran en movimiento, estos cambios se pueden originar por ejemplo, por la iluminación de la escena y/o también, en algunos casos, por la auto compensación que pueden hacer algunas cámaras.

4. METODOLOGÍA

El proyecto se realizó en dos etapas: una experimental en la que el desarrollo y la implementación del prototipo se finalizaron, otra evaluativa en la que se definieron las recomendaciones sobre la implementación del sistema real.

Considerados los estudios descritos en los anteriores capítulos, es posible describir con mayor claridad la metodología usada para desarrollar el sistema prototipo.

4.1 SISTEMA PARA OBTENER CAUDAL DE REFERENCIA

Con el fin de medir caudal, se evaluaron tres opciones:

- El uso de un molinete permite obtener una medida de la velocidad del flujo en el canal, de modo que solo falta obtener el área mojada en donde sea usado el mismo. Sin embargo, se observó que la hélice no permanecía introducida en el fluido, por lo tanto no se obtendrían valores reales de velocidad.
- La obtención de la velocidad a partir del modelo de Chézy $v = C\sqrt{R \cdot S}$ (ecuación 11), requiere de la identificación en tiempo real del radio hidráulico y el conocimiento de S así como de C , este último depende de las condiciones del lecho del canal y debe ser encontrado experimentalmente, razón por la cual hace poco práctico, en este caso, el uso del modelo de la ecuación 11 como base para la obtención del caudal de referencia.
- Por último para obtener el caudal a partir del modelo de Torricelli: $Q = C_d A \sqrt{2gh}$ (ecuación 12), hace falta determinar los valores de A y h , además del valor de C_d para un A específico. El valor del nivel es posible medirlo usando algún instrumento que ofrezca el nivel del agua en el tanque, la apertura se puede lograr calibrando la válvula, y C_d puede ser encontrado experimentalmente por medio de pruebas de aforo. Además para hacer válido el cálculo de caudal, como caudal de referencia, se debe ubicar la salida de la válvula a la misma altura de la base del canal de modo que el caudal que recorre el canal sea lo más cercano posible al caudal que sale del tanque.

Tomando en cuenta los anteriores argumentos se optó por crear un montaje que permitiese usar la ecuación 12, para calcular el caudal de referencia y para ello se diseñó un montaje que cuenta con un sensor de distancia con el que se obtiene h , además se realizó una calibración de la apertura de la válvula y por último, se

realizaron pruebas de aforo usando un tanque de volumen conocido y un cronómetro para determinar C_d .

Ahora bien, considerando que el sistema de estimación de caudal propuesto en este proyecto, busca calcular el caudal en cada *frame* en el que aparezca fluido, es ideal que el sistema que permite calcular el caudal de referencia, logre un valor también en cada *frame* que sea capturado, para ello se implementó una etapa de adquisición de datos al computador, de las señales analógicas de A , h y C_d .

Para la obtención del nivel h , se usó un dispositivo electrónico GP2Y0A21YK (SHARP, 2007), elemento cuyo voltaje de salida analógico depende de la distancia a algún objeto que se encuentre frente a él, este dispositivo se basa en la emisión y recepción de un rayo infrarrojo de $\lambda = 870 \pm 70\text{nm}$ (IR cercano).

El sensor se fijó de tal forma que ayudado de un flotador sobre el nivel de agua, permitiese determinar la profundidad de la misma, tal y como muestra la Figura 11.

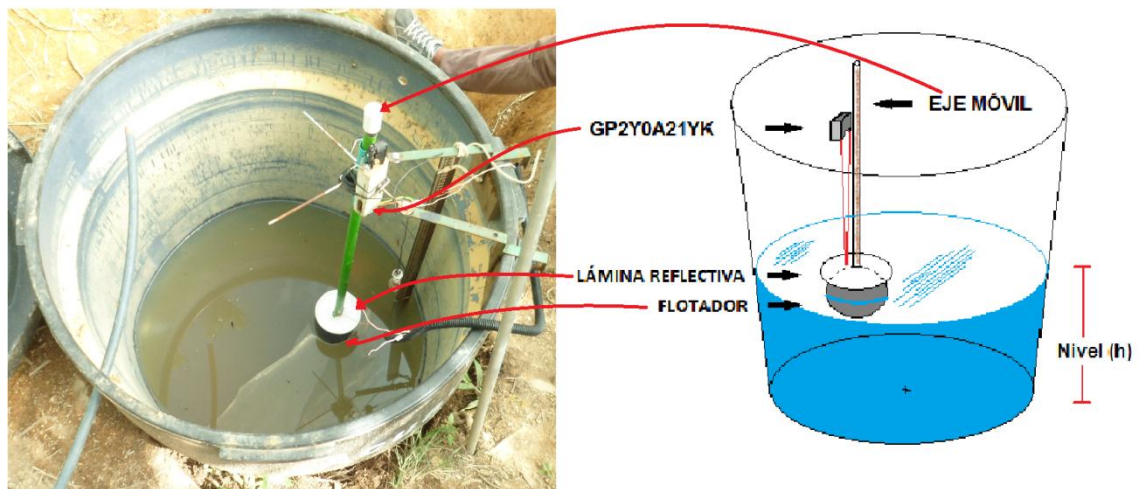


Figura 11. Montaje del tanque con el sensor GP2Y0A21YK y flotador para obtención del nivel h .

La calibración del sensor respecto del nivel, fue lograda usando por instrumento patrón un metro de precisión $\pm 1\text{ mm}$, pero cuyas medidas pueden tener $\pm 5\text{ mm}$ de precisión debido al movimiento del agua dentro del tanque y problemas de paralaje durante la calibración (Figura 12).

La curva de calibración del sensor que se obtuvo es:

$$\text{Profundidad (cm)} = -23.33\text{Voltaje}^2 + 105.02\text{Voltaje} - 61.57 \quad \text{Ecuación 18}$$

Para enviar el dato arrojado por el distanciómetro al computador se diseñó un circuito de acondicionamiento analógico de la señal y se programó un PIC18F4550 de Microchip que envía los datos al PC. El diagrama de bloques que describe la adquisición se muestra en la Figura 13.

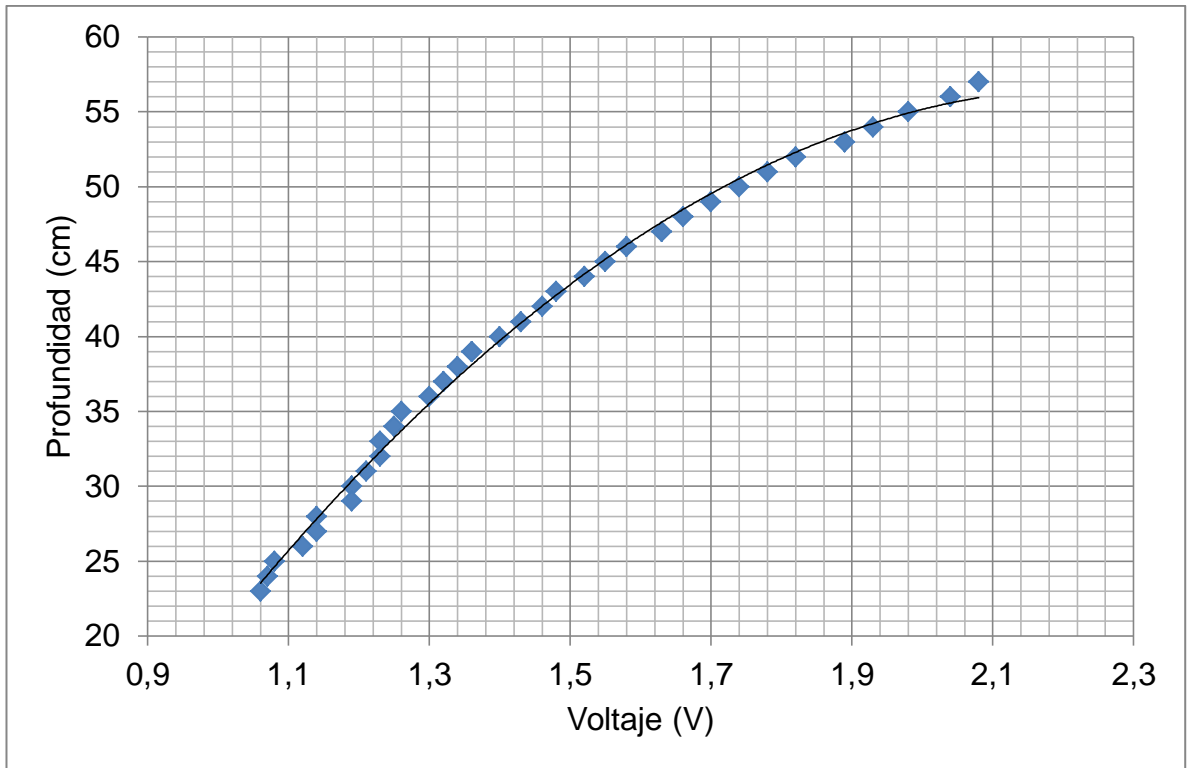


Figura 12. Calibración hallada experimentalmente para el dispositivo electrónico GP2Y0A21YK.

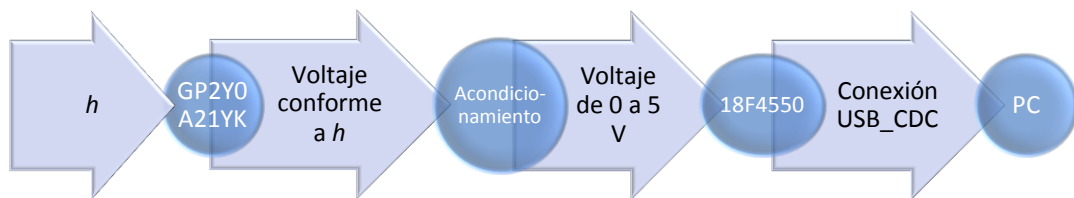


Figura 13. Diagrama de bloques de la adquisición usada para los datos de h .

La conexión al computador se hizo usando USB 2.0 en el formato llamado USB_CDC (*Communications Devices Class*), que permite hacer la transmisión de los datos en forma serial a través de USB llegando a un puerto COM virtual en el computador.

Una vez que el micro controlador transforma los datos de voltaje DC a su valor digital, éstos son enviados al computador a través de USB_CDC y el dato es leído por una aplicación implementada en DevC++ 4.9.9.2⁶, la cual permite capturar los datos y guardar sus valores en un archivo temporal .txt, que va a ser leído por la aplicación que calcula flujo a partir del procesamiento digital de imágenes.

De otro lado, para calibrar la válvula se tomaron 4 posiciones de la manija de la válvula y usando imágenes tomadas al interior de la válvula como muestran las imágenes de la Figura 14, se llegó a los resultados mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Calibración de válvula de bola de 3”.

Posición	Área píxeles	Área A cm ²	Perímetro píxeles	% error en medida. *	<i>C_d</i>	%Error <i>C_d</i> **
0 (Abierta)	137609	45.6	1188	1.7	1.0	1
1	76903	25.5	978	1.4	0.99	9.2
2	40405	13.4	775	1.1	0.62	8.6
3	11719	3.9	540	0.8	0.57	3.96
4 (Cerrada)	0	0.0	0	0	x	x

* El cálculo del error de A se basó en que por cada pixel en el perímetro existiría la posibilidad de al menos ± 2 píxeles de error.

** El % de error de *C_d* se obtiene de las pruebas de aforo realizadas.

Los valores de área dados en la Tabla 6 se lograron considerando que con la válvula totalmente abierta, posición 0, el área es $\pi(3''/2)^2=45.6$ cm², lo que equivale a 137609 píxeles de la imagen (Figura 14A), luego cada pixel en las imágenes equivale aproximadamente a 0.0003 cm² de área, tomando en cuenta esto, el área transversal en cualquier posición de la válvula sería equivalente a 0.0003 veces el número de píxeles en blanco de su imagen respectiva.

⁶ DevC++ es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para programar en lenguaje C/C++. Usa MinGW que es una versión de GCC (GNU Compiler Collection) como su compilador.

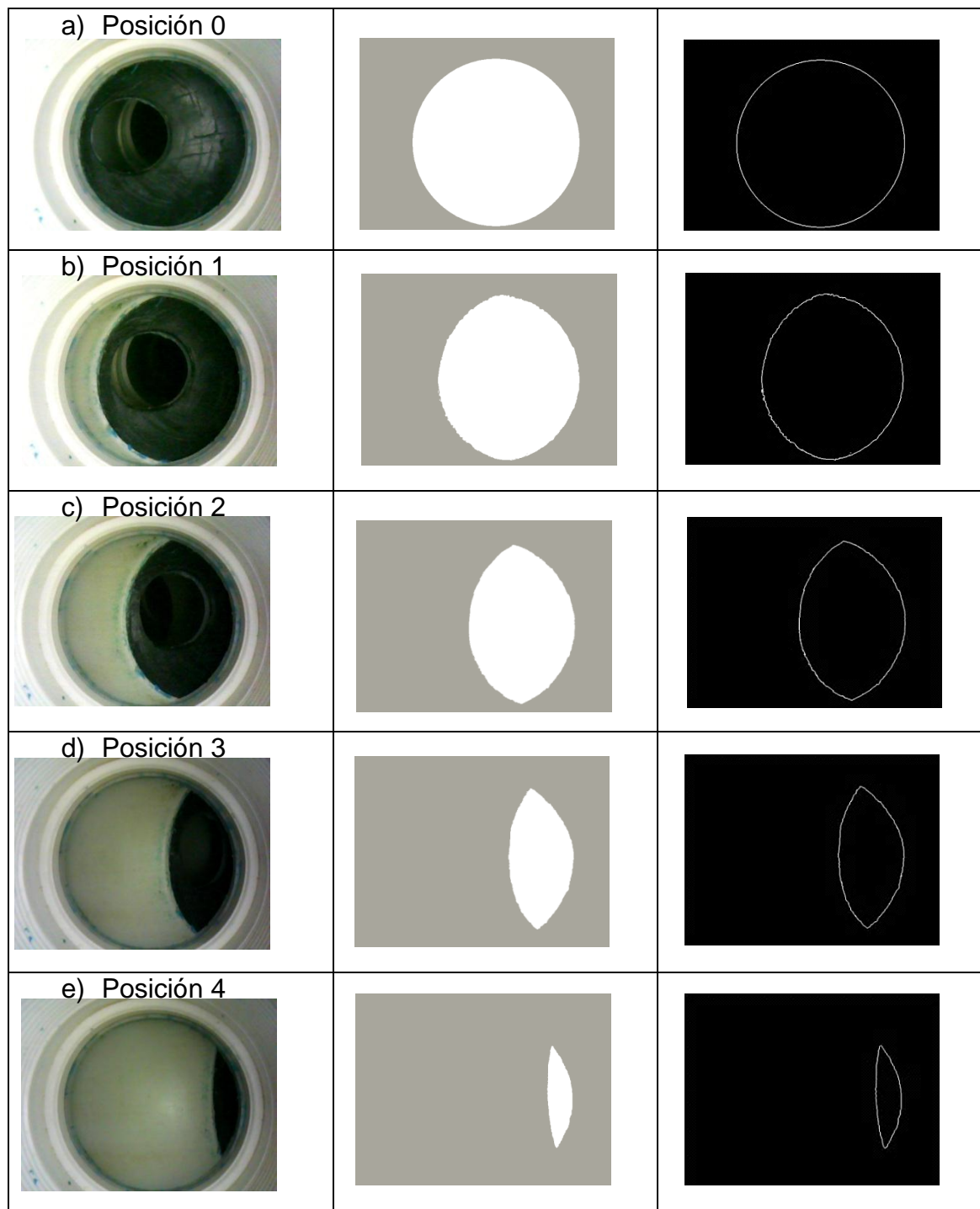


Figura 14. Calibración de la válvula de bola de 3' usando imágenes. Imagen original (izq.), área (centro), perímetro (der.)

4.2 MÉTODO DE CALIBRACIÓN ESPACIO-CÁMARA

Considerando el caso particular sobre el que se está trabajando, se optó por crear una aplicación para hacer calibración punto a punto, de modo que se logró un mapa de una sección transversal del lecho del canal como en la Figura 7.

En primer lugar la cámara debe estar ubicada de tal forma que garantice que una línea vertical de la imagen, coincida con una sección transversal de la curva del canal y no con cualquier sección, de modo que se certifique que el área mojada calculada sea la correspondiente a una sección transversal de la curva.

En segundo lugar, para lograr la calibración se debe tener definida la posición de la cámara, posición que no deberá cambiar en el tiempo, de modo que se mantenga la calibración, con este objetivo en mente, se ubicaron 4 puntos fijos de referencia sobre el canal, uno en cada esquina de la imagen, los cuales sirven de guía para la ubicación de la cámara cuando fuese necesario mover o desarmar el montaje, estos puntos se observan en las imágenes de la Figura 15.

Además se debe elegir una línea vertical en la imagen del canal, a lo largo de la cual se van a localizar los puntos de calibración tal como muestran las Figura 15 y Figura 16. Se tomaron por defecto 14 puntos de calibración (14 puntos en la imagen con sus correspondientes 14 puntos (X, Y) en el mapa), que son usados para obtener puntos (x, y) interpolados, empleando una aproximación lineal (ecuación 19); seguidamente se genera un mapa de la sección transversal. Una vez interpolado el mapa, a cada punto sobre la imagen le corresponde un punto de coordenadas en 'x' y en 'y' tal como en la Figura 7, generando así un archivo de datos de 480 puntos imagen y 480 puntos mapa (x, y) correspondientes. Ejemplo de esta correspondencia son los puntos a, b y c de la Figura 15.

$$y = \left[\frac{(Y_{i+1} - Y_i)}{(X_{i+1} - X_i)} \right] \cdot x - \left[\frac{(Y_{i+1} - Y_i)}{(X_{i+1} - X_i)} \right] \cdot X_i + Y_i \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

x e y , son los puntos interpolados entre dos puntos (X_i, Y_i) y (X_{i+1}, Y_{i+1}) , obtenidos de la calibración espacio-cámara.

Los 14 puntos son identificados inicialmente en la imagen del canal, logrando intervalos de 33 pixeles entre punto y punto. Debido a la posición de la cámara en el canal, la correspondencia entre cada uno de los puntos imagen con sus puntos en el mapa no es lineal, tal como se puede observar en la Figura 16.

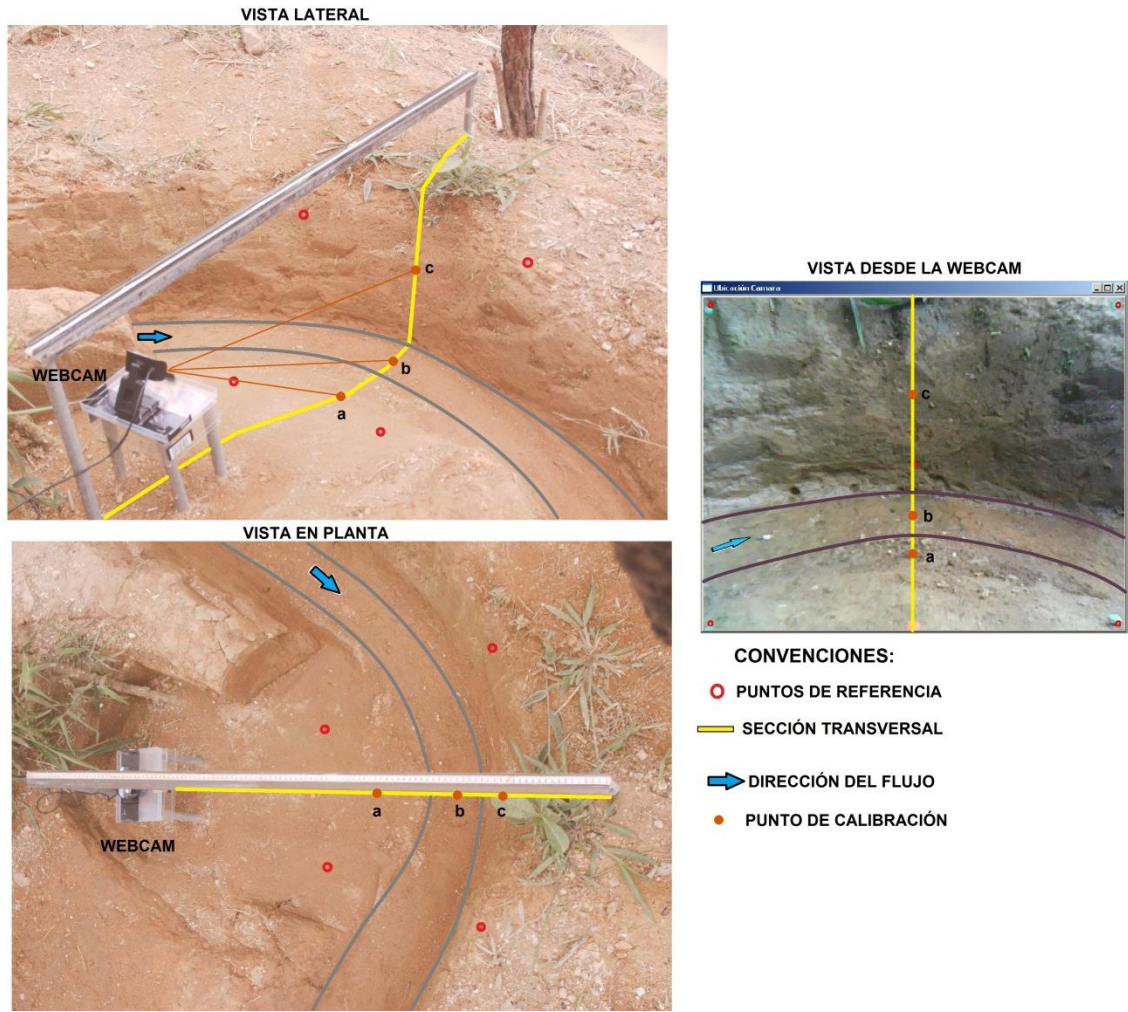


Figura 15. Elementos del método de calibración, mostrados en el canal y en la imagen de la webcam.

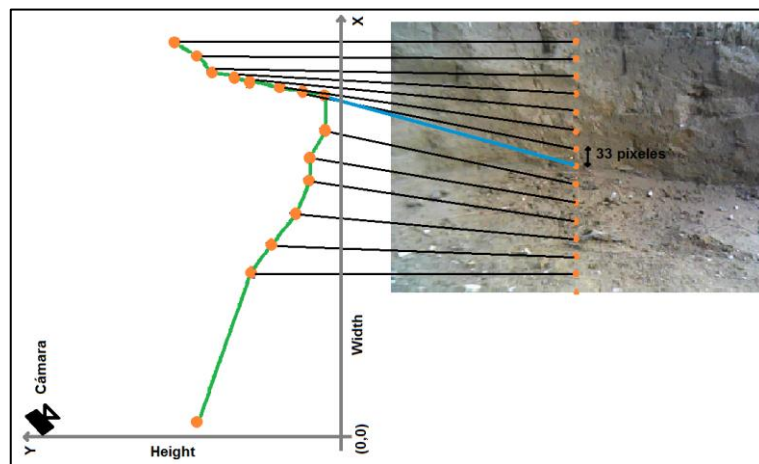


Figura 16. Aplicación de calibración, 14 puntos de calibración. Mapa de la sección transversal (esta girado por efectos de visualización, izq.), puntos de calibración en la imagen (der.).

4.3 CÁLCULO DE CAUDAL A PARTIR DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.

Una vez definido el mapa de una sección transversal, el cálculo del caudal requiere de dos valores: área de inundación o área mojada y la velocidad media en la sección.

El área mojada, tal como se explicó en el apartado 2.2 (sobre el área de inundación), puede ser calculada conociendo los márgenes izquierdo y derecho del flujo sobre el lecho del canal (Figura 7, ecuación 10). La velocidad, por su parte se puede obtener a través de las ecuaciones 7 y 9.

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{g \cdot r \cdot \Delta z}{B}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\Delta z = \frac{v_{\max}^2}{g} \left[\frac{20}{3} \frac{r}{B} - 16 \frac{r^3}{B^3} + \left(\frac{4r^2}{B^2} - 1 \right)^2 \ln \left(\frac{2r+B}{2r-B} \right) \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

Con el objetivo de hacer uso de estos modelos, se cuenta con algunos parámetros como la aceleración gravitatoria del lugar (g) y el radio de curvatura (r), obtenido de la forma del canal y otros se tendrán que lograr del procesamiento digital de las imágenes logadas por la webcam, tales como Δz (súper elevación) y B (ancho del cauce en superficie libre), los cuales se pueden calcular si se conocen las coordenadas del margen izquierdo y margen derecho del flujo sobre el lecho del canal, tal y como muestra la Figura 4.

Así las cosas, la obtención de las coordenadas de los márgenes izquierdo y derecho del flujo sobre el lecho del canal y el mapa de la sección transversal, son los elementos que permiten el cálculo del caudal a partir de la súper elevación.

Estos márgenes están definidos de la siguiente forma:

A' , corresponde al margen izquierdo del fluido en la sección transversal y en la imagen se ubicará en la parte baja (Figura 17).

A , corresponde al margen derecho del fluido en la sección transversal y en la imagen se ubicará en la parte superior (Figura 17).

La súper elevación Δz se logra de la diferencia de alturas entre A' y A , B resulta de la distancia en el eje horizontal entre A' y A , el radio de curvatura se logra de mediciones en el canal y g es conocida ($9.81 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$).

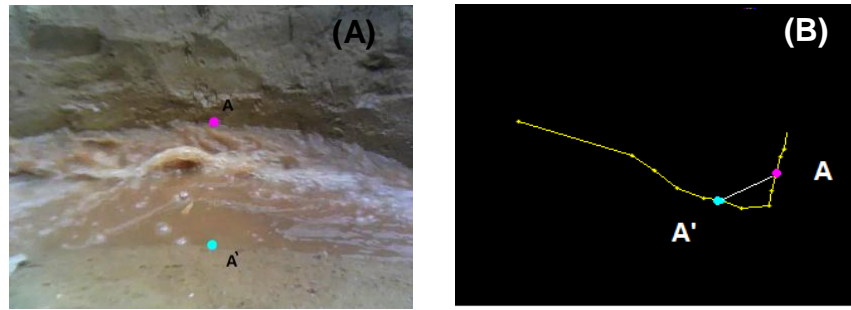


Figura 17. Identificación de las posiciones A' y A en la imagen (A) y sus posiciones correspondientes en el mapa de la sección transversal (B).

Para identificar los puntos A' y A en las imágenes (Figura 17) se hizo uso de algoritmos de detección de movimiento (etapa de segmentación), filtrado de imágenes, identificación de bordes y de conocimiento previo del comportamiento del fluido en las imágenes. La Figura 18 esquematiza este proceso y la Figura 19 muestra una imagen lograda a partir de *motion templates*, explicado en el apartado 3.2.



Figura 18. Proceso de detección de las posiciones A' y A en las imágenes

Continuando a la etapa de filtrado, se aplican ciclos de apertura y cierre a las siluetas logradas por cualquiera de los dos métodos descritos anteriormente.

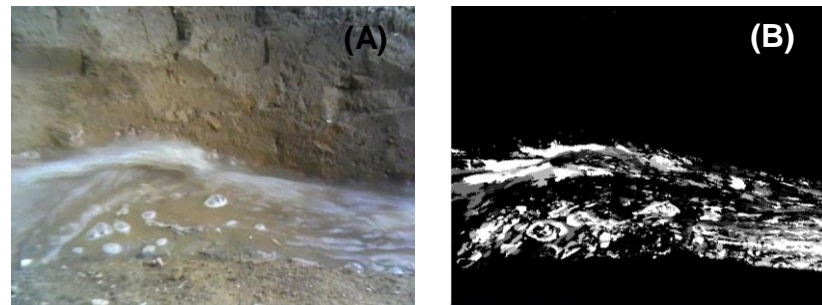


Figura 19. Imagen Original (A). Imagen segmentada por *motion templates* (B).

A continuación se hace una identificación de los bordes superior e inferior (en la imagen) o márgenes derecho e izquierdo (en la sección) a lo largo de toda la imagen logrando un grupo de puntos como los que se muestran en la imagen (A) de la Figura 21.

Posteriormente, se tratan los puntos-bordes de modo que se elimine ruido de las imágenes tomando en cuenta el comportamiento del fluido en el canal:

- Se debe recalcar que el fluido solo deberá aparecer en los alrededores del *thalweg*⁷, luego cualquier objeto grande o pequeño que aparezca aislado sin pertenecer al *thalweg*, será descartado (ver Figura 20).

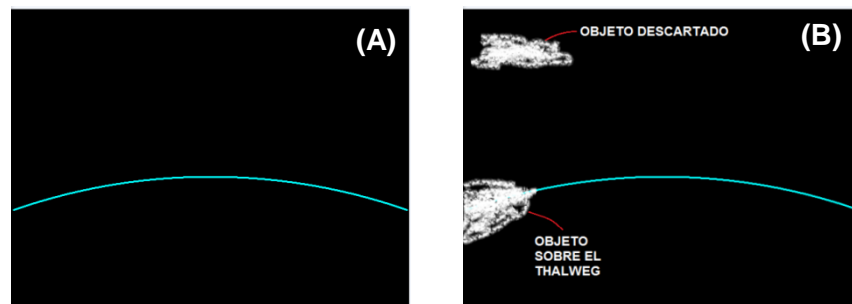


Figura 20. Línea que define la posición del *thalweg* en la imagen (A), para la eliminación de inconsistencias y ruido (B)

- Además es preciso que exista una cierta continuidad entre puntos-borde consecutivos, tal como se esperaría de un fluido, de modo que si hay un punto de borde aislado en medio de puntos de borde agrupados, el algoritmo procura acercar ese punto aislado a los demás, logrando un suavizado, mejorando así la identificación de los puntos A' y A, ver Figura 21.

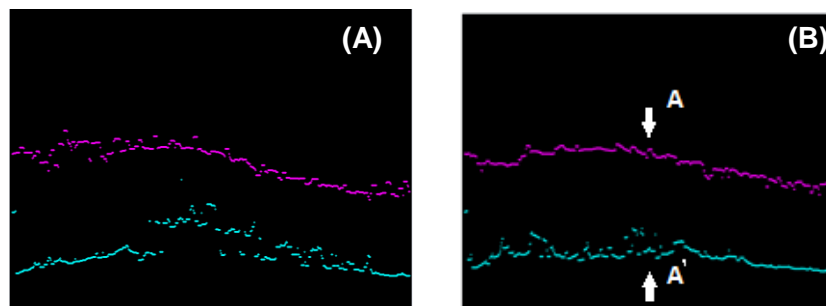


Figura 21. Identificación de bordes (A) e identificación de los puntos A' y A (B).

⁷ El *Thalweg* es la línea que marca la parte más honda de un canal y es el camino por el cual discurren las aguas de las corrientes naturales.

Pasadas las anteriores etapas, se hace la identificación de las coordenadas en la imagen del punto-borde A y el punto-borde A'. Estos puntos al igual que los puntos a, b y c de la Figura 15 tienen sus coordenadas correspondientes en el mapa, en la Tabla 7 se muestra un ejemplo de lo descrito.

Tabla 7. Ejemplo de ubicación de coordenadas de los puntos A' y A, en imagen y en mapa de sección la transversal.

Punto	Coordenadas imagen		Coordenadas mapa Sección transversal	
	i	j	x (cm)	y (cm)
A	320	210	84.97	6.67
A'	320	416	58.45	3.82

De modo que es posible lograr los términos suficientes para hacer el cálculo de la velocidad usando las ecuaciones 7 y 9, ΔZ será $(6.67 - 3.82) = 2.85$ cm y $B = 84.97 - 58.45 = 26.52$ cm. Una vez calculada la velocidad solo hace falta calcular el área mojada o área transversal de inundación, la cual se puede obtener a partir de los puntos A' y A usando la ecuación 10.

$$A_m = B \cdot y_2 - \frac{B \cdot \Delta z}{2} - \int_{x_1}^{x_2} y(x) dx \quad \text{Ecuación 10}$$

4.4 MEDICIÓN DE INTENSIDAD DE LUZ

Para la caracterización de iluminación de la escena, se usó un luxómetro LX-102 que entrega un valor de la intensidad de luz medidas en lux. Éste, se ubicó en la curva del canal ofreciendo un dato en cada *frame* en el proceso de una prueba.

El instrumento arroja un voltaje de 0.1mV por cada valor que muestra en su pantalla llegando a un máximo de 200mV, de modo que agregando una etapa de acondicionamiento analógico, se logra la intensidad en el canal a cada instante, la Figura 22 muestra el diagrama de bloques de este acondicionamiento.

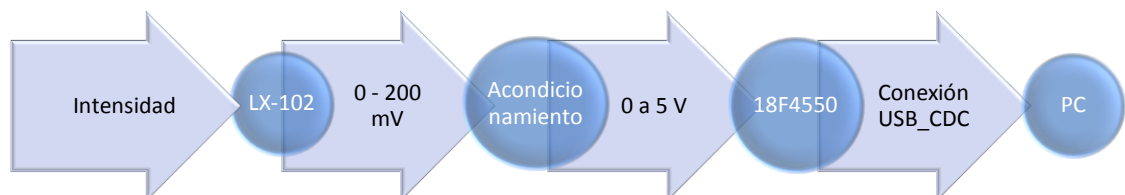


Figura 22. Diagrama de bloques de la adquisición de datos desde LX-102.

Para su uso apropiado, según los datos del fabricante, existe un factor de corrección debido a la fuente de iluminación, en éste caso con iluminación del sol, el factor de corrección corresponde a 0.95.

4.5 DESARROLLO DE PRUEBAS

Las pruebas se llevan a cabo solo durante el día, y en diferentes días, en cada prueba procedimiento regular requiere del monte y desmonte de todo el sistema siguiendo el proceso explicado a continuación:

Una vez todo esté conectado (Webcam, baterías y circuito de acondicionamiento, ubicación del dispositivo electrónico GP2Y0A21YK, ubicación del luxómetro, ubicación del computador), se da paso al desarrollo de la prueba, el cual se puede definir mediante el siguiente algoritmo:

1. Definir la posición de la válvula a usar.
2. Con el tanque lleno, se mezcla barro con el agua de tal forma que se logre un buen grado de turbidez.
3. Se abre la válvula a la posición elegida, lo que marca el inicio de la prueba.
4. La prueba termina cuando el flotador llegue a su límite (~35cm de profundidad).
5. Grabación de los resultados en archivo específico.
6. Se repiten los pasos 2.1 al 2.5 en cada prueba.

Para lograr el buen desarrollo de las pruebas se diseñó una aplicación en Qt 4.7.0⁸ (Blanchette & Summerfield, 2008; Mateo, 2011), en la que se hace el cálculo del caudal de referencia, se aplican los algoritmos de procesamiento digital de imágenes para estimar caudal, y define un archivo en el que se recogen los resultados, así como un registro de video del transcurso de la prueba. La Figura 23 presenta el algoritmo de funcionamiento de la aplicación y la Figura 24 muestra la interfaz de la aplicación.

De cada prueba realizada se obtiene un archivo .txt con el registro de los valores logrados en cada *frame*, de las siguientes variables:

- Área mapa. Área mojada detectada (cm²).
- ΔZ : súper elevación detectada (cm).
- B : ancho del cauce en superficie libre (cm).
- Área de la válvula (cm²) y nivel en el tanque (cm).

⁸ Qt Es una biblioteca multiplataforma ampliamente usada para desarrollar aplicaciones con una interfaz gráfica de usuario (QtCreator) (GNU Lesser General Public License).

- Intensidad (Lux).
- Caudal de referencia (L/min) y caudal calculado (L/min).
- Fecha: día de la prueba y tiempo en milisegundos (Formato UNIX, POSIX).
- Posición de los puntos A' y A en la imagen.

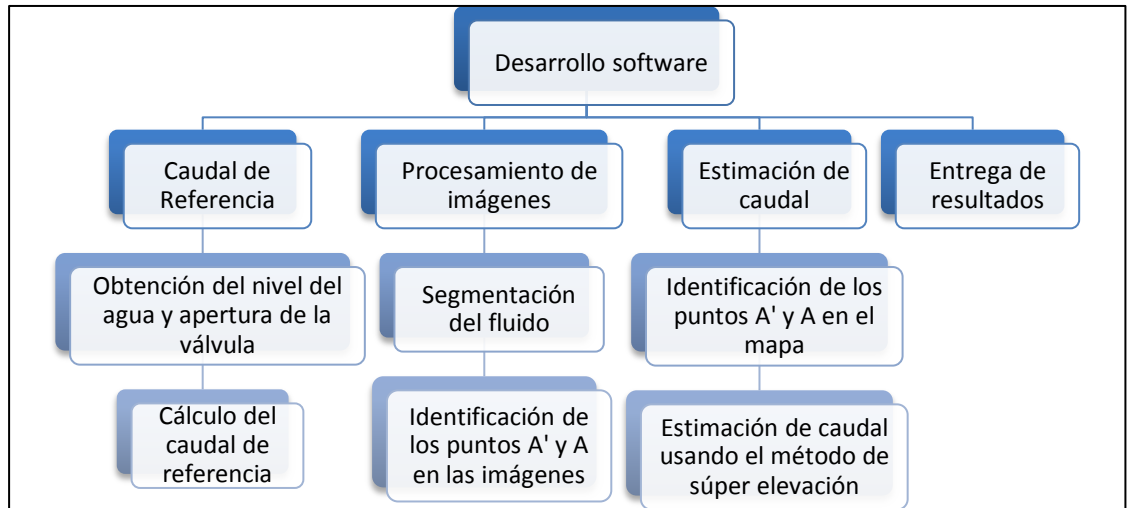


Figura 23. Esquema de funcionamiento de aplicación para el desarrollo de las pruebas del sistema prototipo.

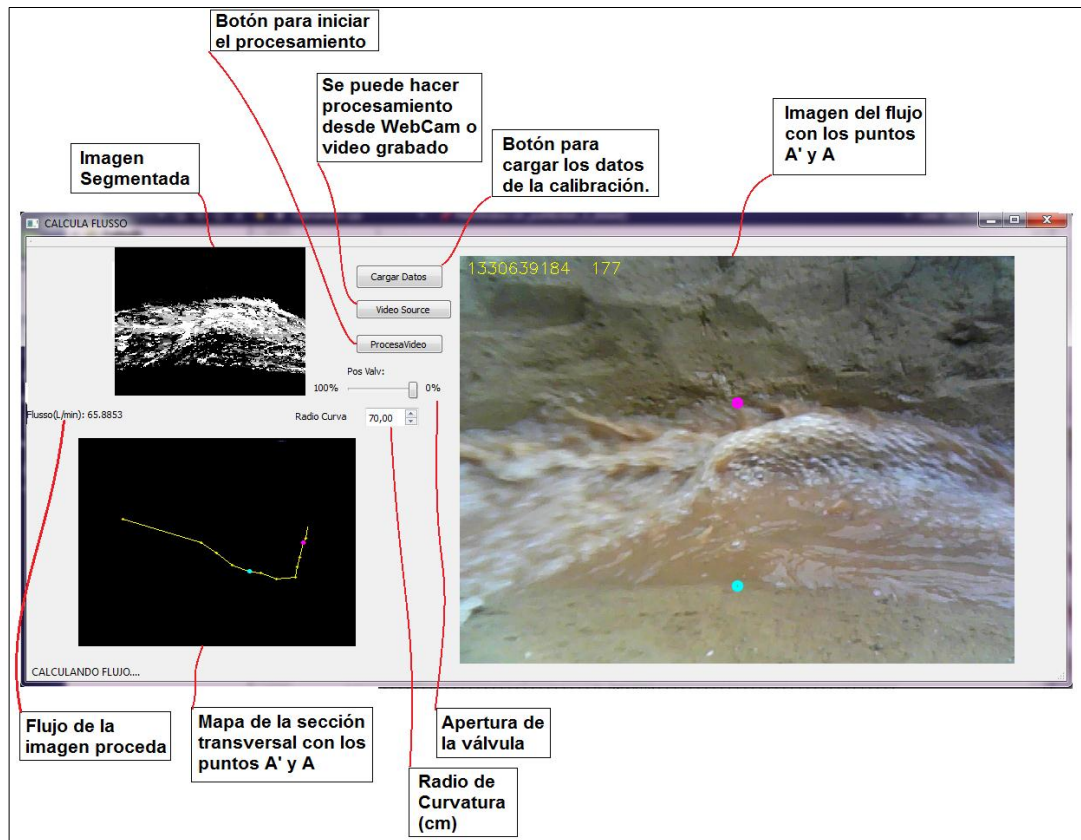


Figura 24. Interfaz de la aplicación para desarrollo de pruebas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se debe considerar que el método en el que se basa este proyecto, descrito en el apartado 4, permite estimar caudal con solo obtener una imagen del flujo en la sección transversal. Por lo que en un video, cada *frame* representa una estimación de caudal (Caudal Calculado), al que corresponde un valor de Caudal de Referencia y una intensidad lumínica lograda por el luxómetro.

Para presentar los resultados se ha definido un orden, de tal manera que se facilite el análisis de los mismos:

Primero se va a evaluar el método de obtención de Caudal de referencia (apartados 2.3 y 4.1.1) y los resultados que arrojó su uso durante todas las pruebas.

Segundo se presenta un análisis de los resultados del método de calibración espacio cámara elegido (apartado 4.1.4) y de la aplicación hecha para tal fin.

Tercero se presentará resultados en los que se comparan las estimaciones de caudal obtenidas durante la Prueba 1 (de aproximadamente 60 segundos), a partir de PDI, con el caudal estimado por el sistema de referencia.

Seguido se presentarán gráficas en las que se observa la precisión, del algoritmo de PDI, en la detección de los puntos A' y A en la imagen, cruciales para el cálculo de estimación de caudal.

Con el objetivo de validar los resultados, en el siguiente paso se hace un análisis de los errores y la propagación de errores que tiene lugar en la obtención del caudal calculado.

Por último se muestran los datos logrados en otras pruebas.

Considere de aquí en adelante que:

- El caudal estimado determinado a partir de la ecuación 7 será llamado CaudalSimple, el caudal estimado usando la ecuación 9 se denominará CaudalWoodward y el caudal de referencia, CaudalRef.
- La prueba 1 fue realizada tal y como se describe en 4.1.7, usando la posición 2 de la válvula, ante una intensidad media de 660 lux y a una tasa de captura de 15 fps (*frames per second*).

5.1 SOBRE EL MÉTODO DE OBTENCIÓN DEL CAUDAL DE REFERENCIA

Se realizaron pruebas de aforo, usando un tanque de volumen conocido y un cronómetro. Estas pruebas permitieron obtener los valores de C_d para cada apertura de la válvula, y fueron usadas para confrontar el caudal que arroja el sistema de referencia (CaudalRef), descrito en 4.1.1. Los resultados de las pruebas de aforo demuestran que CaudalRef posee errores relativos menores al 10%, como se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Comprobación del caudal calculado por el sistema, a partir de pruebas de aforo. Caudales en (L/min)

Posición	C_d	Caudal Aforo	Caudal Sistema	% Err. relativo
0 (Abierta)	1	641.97	641.33	0.1
1	0.99	419.83	449.28	7.02
2	0.62	161.25	150.98	6.37
3	0.57	40.42	43.35	7.24
4 (Cerrada)	x	x	x	x

Por otro lado en la Figura 25 se muestra el porcentaje de error relativo debido a la propagación de errores en el cálculo de caudal de referencia (δ CaudalRef) para la prueba 1, que se obtuvo mediante la ecuación 15.

Considerando estas dos perspectivas de análisis de errores; a pesar de que el método de cálculo de CaudalRef puede presentar errores por propagación de errores de hasta 1.4% (Figura 25), por otro lado CaudalRef puede tener hasta 7.24% de error respecto del caudal real que sale de la válvula (Tabla 8). Por lo tanto, el cálculo de caudal permite dar buena precisión, pero el modelo de Torricelli (ecuación 12) presenta un mayor error entre CaudalRef calculado y el caudal real, de las pruebas de aforo.

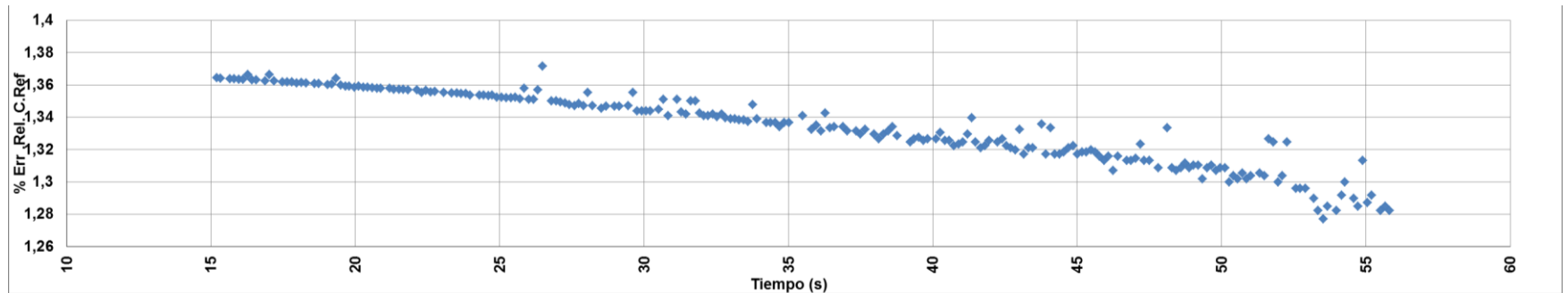


Figura 25. Porcentaje de error relativo CaudalRef. Prueba 1.

Tabla 9. Puntos de calibración medidos.

Punto i	(360, j _i) (píxeles)*	X _i (cm)**	Y _i (cm)**
1	40	94,0	19,5
2	73	91,0	17,0
3	107	88,0	14,5
4	141	87,5	11,2
5	175	86,5	9,7
6	209	85,0	5,7
7	243	84,0	3,0
8	277	83,5	0,0
9	311	76,0	-0,7
10	345	70,0	1,2
11	379	66,0	1,5
12	413	59,0	3,5
13	447	53,0	7,0

* Posición en la imagen del punto de calibración.

** Posición en el espacio real del punto de calibración.

Tabla 10. Diferencias entre los puntos interpolados consecutivos, para los 13 intervalos de puntos de calibración.

Punto	j _i (píxeles)*	ΔX (cm)**	Δx (cm)***	Δy (cm)***
1-2	40-73	3,0	0,0909	0,0758
2-3	73-107	3,0	0,0909	0,0758
3-4	107-141	0,5	0,0152	0,1000
4-5	141-175	1,0	0,0303	0,0455
5-6	175-209	1,5	0,0455	0,1212
6-7	209-243	1,0	0,0303	0,0818
7-8	243-277	0,5	0,0152	0,0909
8-9	277-311	7,5	0,2273	0,0212
9-10	311-345	6,0	0,1818	-0,0576
10-11	345-379	4,0	0,1212	-0,0091
11-12	379-413	7,0	0,2121	-0,0606
12-13	413-447	6,0	0,1818	-0,1061

* Intervalo usado para interpolar puntos del espacio real

** Distancia en planta entre intervalos usados para interpolar puntos del espacio real.

*** Distancia entre puntos interpolados en cada intervalo.

5.2 RESULTADOS DEL MÉTODO DE CALIBRACIÓN ESPACIO-CÁMARA

La cámara fue ubicada de modo que la línea vertical de referencia en las imágenes (320, 0 a 480) coincidiese con una sección transversal de la curva del canal, haciendo que esta línea de referencia correspondiera con la “sombra” de uno de los radios de la curva en el lecho del canal.

Para desarrollar la calibración, descrita en 3.1.4, fue necesario que las medidas sobre la sección transversal se tomaran sobre un marco de referencia confiable, razón por la que se ubicó una regla horizontal (resolución ± 1 mm), desde donde se tomaron las alturas, para las cuales se usó una plomada y un metro (resolución ± 1 mm). Los 14 puntos en la imagen y en el mapa se muestran en la Tabla 9 y la cámara se ubicó a una altura de 17 cm y una distancia de 45 cm desde el *thalweg*. A cada uno de estos puntos se le asigna un error máximo de ± 1 cm en la abscisa y ± 1 cm en la ordenada debido a los problemas de paralaje durante el proceso de calibración espacio-cámara (estos errores se representan en el tamaño de los rombos de cada uno de los 14 puntos y con las líneas punteadas en la Figura 26).

Los puntos interpolados permitieron obtener una posición (x,y) para cada pixel de la línea vertical de la imagen. En la Tabla 10 se muestran las diferencias, Δx y Δy , entre cada uno de los puntos interpolados, en cada intervalo de puntos de calibración; además se muestran los ΔX existentes entre los puntos de calibración, estos ΔX permiten ver como existe mayor diferencia entre los puntos que se encuentran entre los pixeles (320,277) y (320,447), y menores diferencias entre los pixeles (320,107) y (320,277), lo que se ve representado en la Figura 16. Estas diferencias son debidas principalmente a problemas de perspectiva, generados por la ubicación de la cámara respecto del canal y la sección transversal.

En conclusión, es posible decir que posee una característica intrínseca a esta metodología que consiste en que cualquier punto $P(320,j)$, en la imagen, tendrá un punto interpolado en el mapa (x,y) y este punto tendrá “mayor” precisión si se encuentra entre los pixeles (360,107) y (320,277), una “buena” precisión entre (320,40) y (320,107) y una “baja” precisión si se encuentra entre (320,277) y (320,447).

Por otro lado, para observar las posibles variaciones del lecho del canal en el tiempo, al final de las pruebas se realizó una calibración de éste. El contraste entre los dos perfiles logrados, se observa en la Figura 26. Es fácil observar que la mayoría los cambios se generaron en la parte más profunda del canal (desde los 70 hasta los 86 cm en la abscisa), como era de esperar, pues es el lugar en donde el fluido está la mayor parte del tiempo en contacto con el canal. El área mojada en esta zona (desde los 74 hasta los 84 cm en la abscisa) para el mapa inicial fue

de: 23.7 cm^2 y el área mojada en esta zona con el mapa final fue de: 19.1 cm^2 , de modo que el área mojada en el mapa final en esta zona es el 80% del área mojada en el mapa inicial, luego la disminución en las medidas de caudal debidas a la erosión del lecho del canal pueden llegar a ser de hasta el 20% para las últimas pruebas.

Sin embargo, es posible decir que los errores introducidos por problemas de paralaje, resultan más representativos respecto de los cambios entre el mapa logrado en la primera calibración y la última calibración. Así mismo, es posible observar que el mapa logrado de la última calibración se encuentra en el rango de error del mapa logrado en la primera calibración.

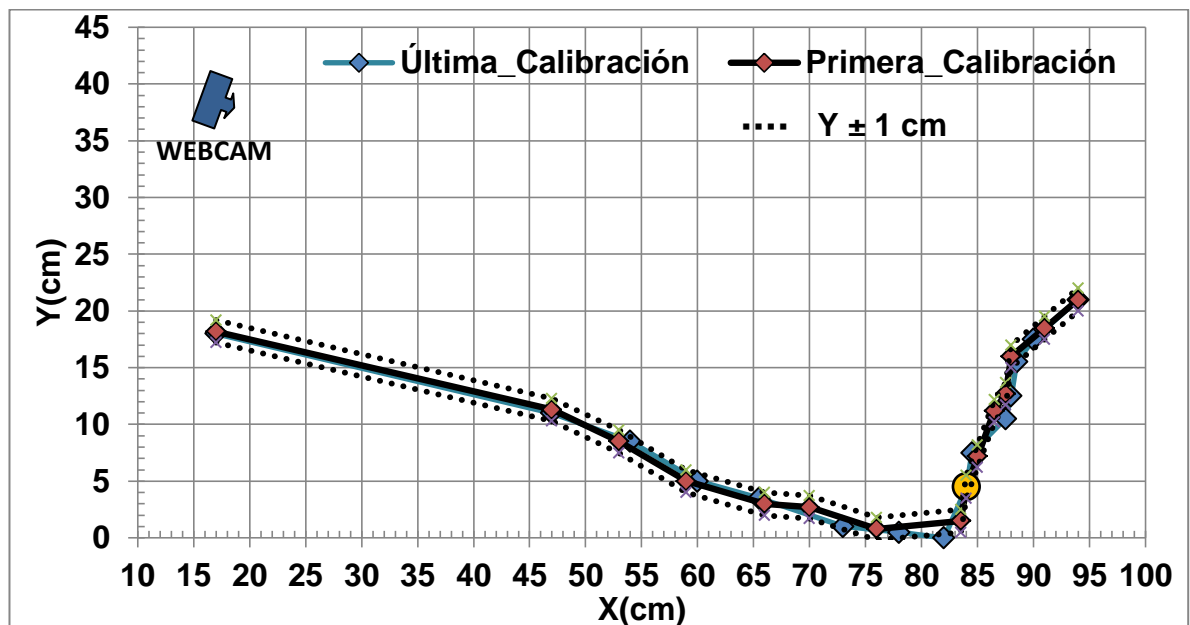


Figura 26. Corte transversal que muestra los cambios en el lecho debidos a la ejecución de las diferentes pruebas. El punto amarillo representa el punto en el mapa que coincide con el centro de la imagen en la cámara.

5.3 CAUDAL ESTIMADO A PARTIR DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES Y CAUDAL DE REFERENCIA.

Las estimaciones que se muestran en la Figura 27 fueron logradas durante la prueba 1 (~tiempo real) usando la metodología descrita en el apartado 4.5. Éstas muestran que las estimaciones calculadas están regularmente por encima del caudal de referencia, llegando a presentar valores de hasta 2.7 veces CaudalRef para el caso de CaudalWoodward y hasta 1.9 veces CaudalRef para

CaudalSimple, valores que se pueden corroborar en la Figura 28 que muestra un primer análisis de las relaciones entre los caudales calculados y el caudal de referencia: $CaudalSimple/CaudalRef$ y $CaudalWoodward/CaudalRef$.

En la Figura 27 se observa que con el paso del tiempo, CaudalSimple se acerca cada vez más a CaudalRef, lo que se corrobora con la tendencia a 1, en el tiempo de la gráfica $CaudalSimple/CaudalRef$, que se observa en la Figura 28.

Se debe aclarar que los intervalos 0 a 16 s y 57 a 60 s, durante los cuales CaudalSimple y CaudalWoodward muestran un aumento desde 0 L/min y un decrecimiento hasta 0 L/min representan respectivamente los instantes durante los cuales el fluido aparece en la imagen desde que la válvula es abierta y el tiempo de desaparición del fluido del campo de visión de la cámara.

Durante el desarrollo de las pruebas fue posible observar que a pesar de que el caudal de referencia es una curva continua descendiente, el fluido a la salida de la válvula no era realmente continuo, presentando intervalos durante los que salía mayor caudal, seguido de un intervalo en el que el caudal era un poco menor y de nuevo otro intervalo con un caudal mayor, es por esta razón, que a pesar de que CaudalRef es una curva continua y casi lineal, el caudal que se observa en los videos es variable y tiene intervalos de aumento y de decremento constantemente. Por ello el sistema detectó algunos intervalos durante los que sobreestimó el caudal, seguido de otros en los que subestima el caudal, generando una curva parecida a la respuesta de un sistema amortiguado ante una señal de entrada tipo escalón unitario.

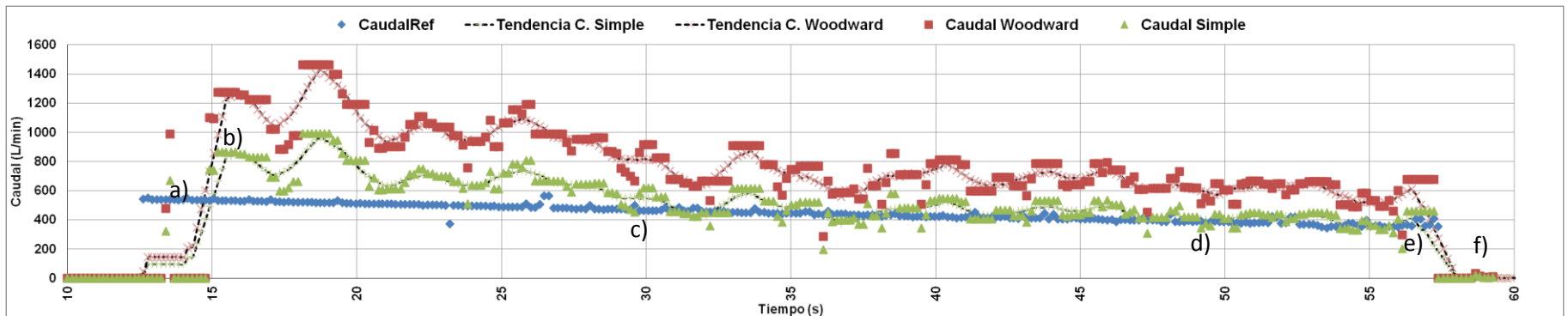


Figura 27. Caudales estimados y caudal de referencia. Prueba 1.

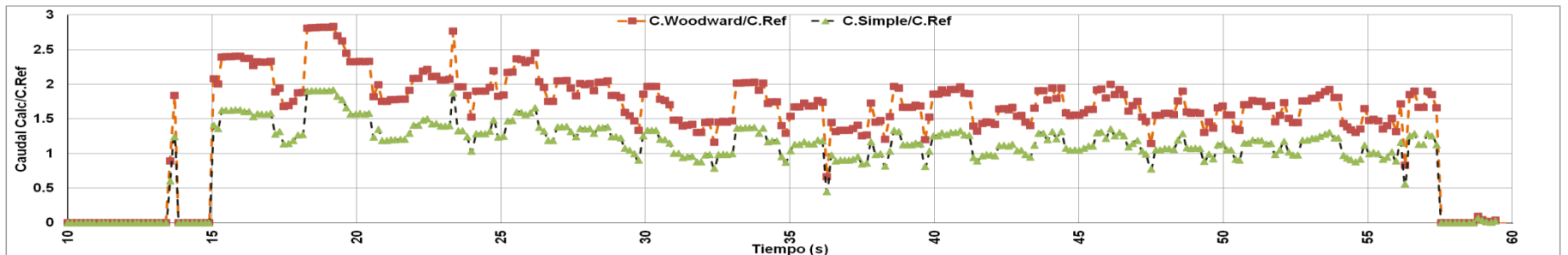


Figura 28. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 1.

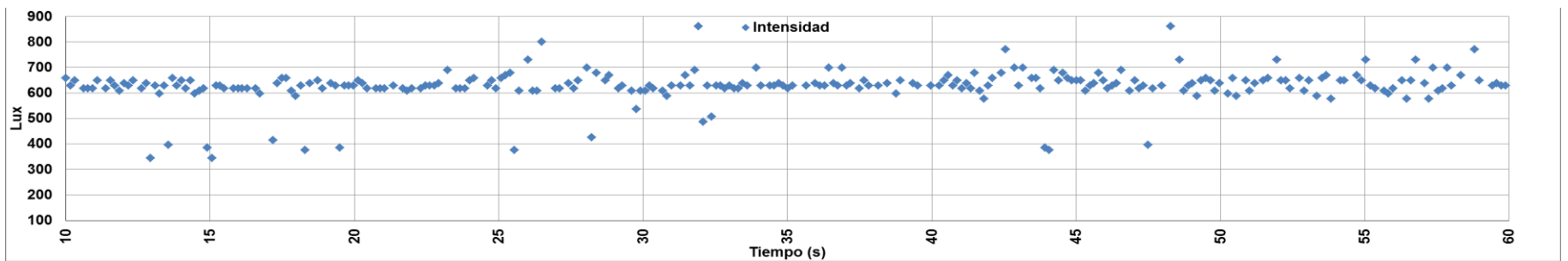


Figura 29. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 1. Obtenida desde luxómetro LX-102.

En la Figura 27 es posible observar una componente aproximadamente sinusoidal en la respuesta de las gráficas de CaudalSimple y CaudalWoodward, respuesta que a pesar de no verse reflejada en CaudalRef, se pudo observar tanto durante la prueba como en los videos grabados de cada prueba.

En las imágenes de la Figura 30 se muestran distintos instantes a lo largo de la prueba y en ellas su detección de los puntos A' y A a partir de PDI. Cada punto ha sido dibujado en la Figura 27.

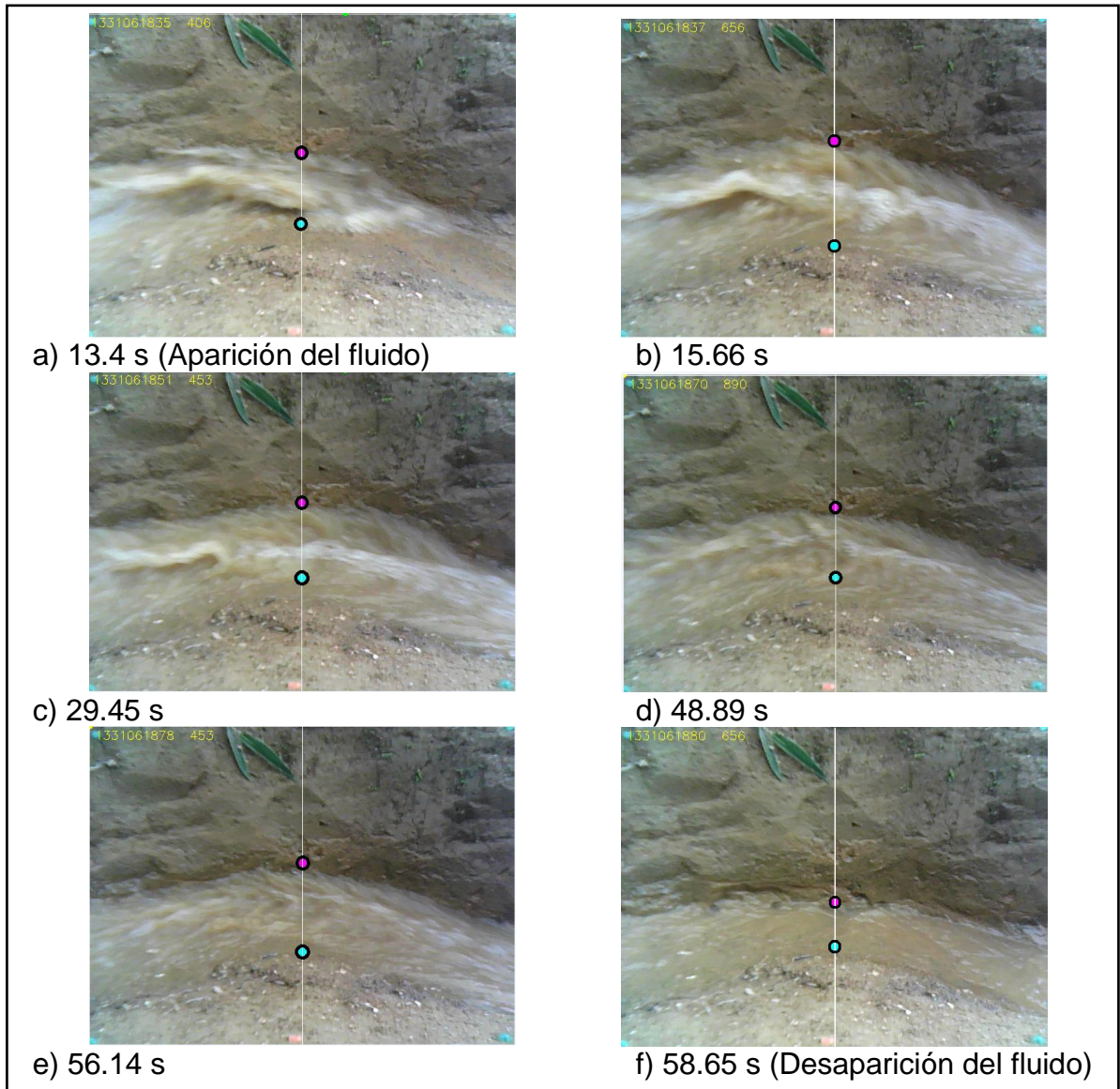


Figura 30. *Frames* en diferentes instantes, obtenidos del video de Prueba 1, con los puntos A'(azul) y A(fucsia) detectados usando PDI.

5.4 DETECCIÓN DE LAS MÁRGENES LATERALES DEL FLUJO (PUNTOS A' Y A).

A continuación se presentarán gráficas en las que se observan los puntos A' y A detectados usando PDI (A' detectado y A detectado) y las ubicaciones reales de dichos puntos en la imagen, cruciales para el cálculo de estimación de caudal (Figura 33).

La ubicación real de los puntos se obtuvo a partir de la identificación manual, *frame a frame*, tal como se observa en la Figura 31 considerando que los puntos reales (A' real y A real) se ubican identificando los límites sobre los cuales se observa fluido a lo largo de la línea vertical blanca en la Figura 31. Los puntos detectados hacen referencia a los puntos detectados a partir del algoritmo de PDI.

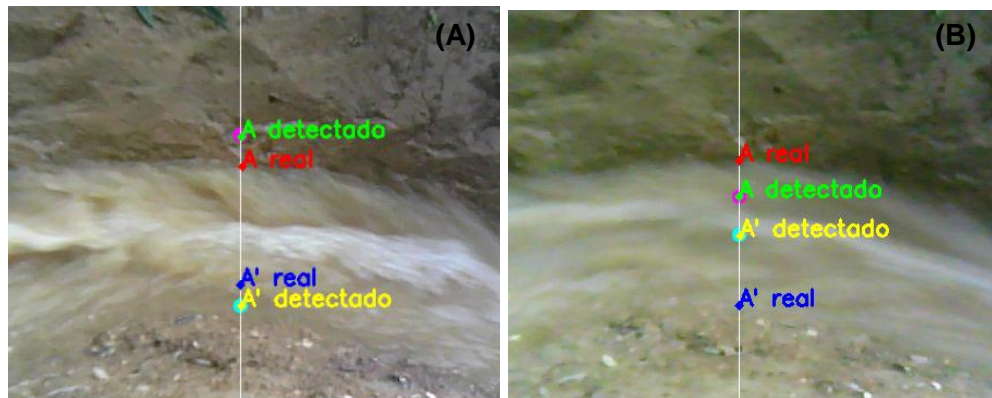


Figura 31. Ubicación de los puntos reales A' y A respecto de sus posiciones detectadas.

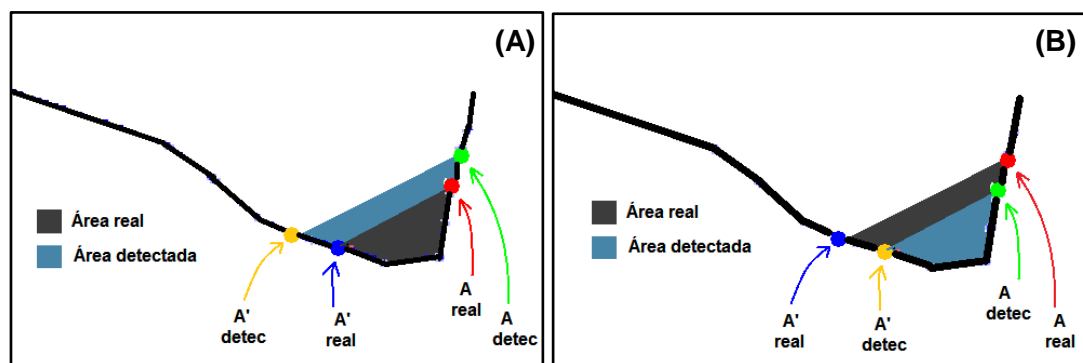


Figura 32. Sobreestimación (A) y subestimación (B) del área mojada y por tanto del caudal CaudalSimple y CaudalWoodward, debidas a la detección errada de A' y A en las imágenes

Respecto de la ubicación de estos puntos habrá dos casos comunes, de sobreestimación y subestimación del área transversal y por lo tanto del caudal calculado CaudalSimple y CaudalWoodward. Estos dos casos se presentan en la Figura 32. Si el punto $A'_{\text{detectado}}$ está por debajo de A'_{real} en la imagen (Figura 31A), implica que el $A'_{\text{detectado}}$ estará a la izquierda de A'_{real} en el mapa de la sección transversal. Caso contrario ocurre cuando $A'_{\text{detectado}}$ está por encima de A'_{real} en la imagen (Figura 31B).

Si el punto $A_{\text{detectado}}$ está por encima de A_{real} en la imagen (Figura 31A), implica que el $A_{\text{detectado}}$ estará a la derecha de A_{real} en el mapa de la sección transversal. Caso contrario cuando $A_{\text{detectado}}$ está por debajo de A_{real} en la imagen (Figura 31B).

Según lo arriba descrito, el caso de la Figura 31A, corresponde con el caso de sobreestimación (Figura 32A) y la Figura 31B con el caso de subestimación (Figura 32B).

Respecto de los puntos reales es fácil ver que los puntos A pueden llegar a variar de un *frame* a otro hasta en 10 píxeles (Figura 33A), mientras que los A' pueden llegar a variar de un *frame* al siguiente hasta en 20 píxeles (Figura 33B). Además es posible ver que existe una mayor variación en el tiempo de los puntos A' que de los puntos A, tanto reales como detectados. Esto se debe esencialmente a que la actividad o dinamismo de los *frames* del video, es mayor en la parte exterior de la curva, que corresponde a los puntos A, que en la parte interna de la curva, que corresponde a los puntos A'. Lo que es consistente con el comportamiento de un fluido que viaja en un canal a través de una curva, pues el fluido tiene mayores velocidades en la parte externa que en la interna de la curva⁹, lo que permite al algoritmo de PDI detectar con mayor precisión los puntos A que los puntos A'.

La Figura 34 permite mostrar las diferencias: $(A'_{\text{detect}} - A'_{\text{real}})$ y $(A_{\text{detect}} - A_{\text{real}})$. En ella es posible observar que las diferencias: $(A'_{\text{detect}} - A'_{\text{real}})$ y $(A_{\text{detect}} - A_{\text{real}})$ varían más entre los primeros 15 a 23 segundos que en el resto de la prueba, lo que permite dar fundamento a las sobreestimaciones exageradas que se observan en la Figura 27 durante este intervalo de tiempo. Estas variaciones se dan posiblemente debido a los cambios bruscos en las imágenes por la acción de la auto-compensación de la webcam en video cuando en la escena aparece un objeto que ocupa una cantidad considerable de píxeles, los cuales generan ruido sobre la imagen que ante el algoritmo de PDI parece ser un objeto o el fluido.

⁹ En una sección recta de un canal, el campo de velocidades muestra que la velocidad disminuye desde las partículas más cercanas a la superficie libre del fluido hasta las partículas cercanas al lecho de canal. Así que cuando el fluido entra en una curva, la fuerza centrífuga (fuerza aparente) hace que las partículas con mayor velocidad se dirijan hacia la parte externa de la curva, mientras las más lentas se dirigen a la parte interna de la misma (Vide, 2003; Dingman, 2009).

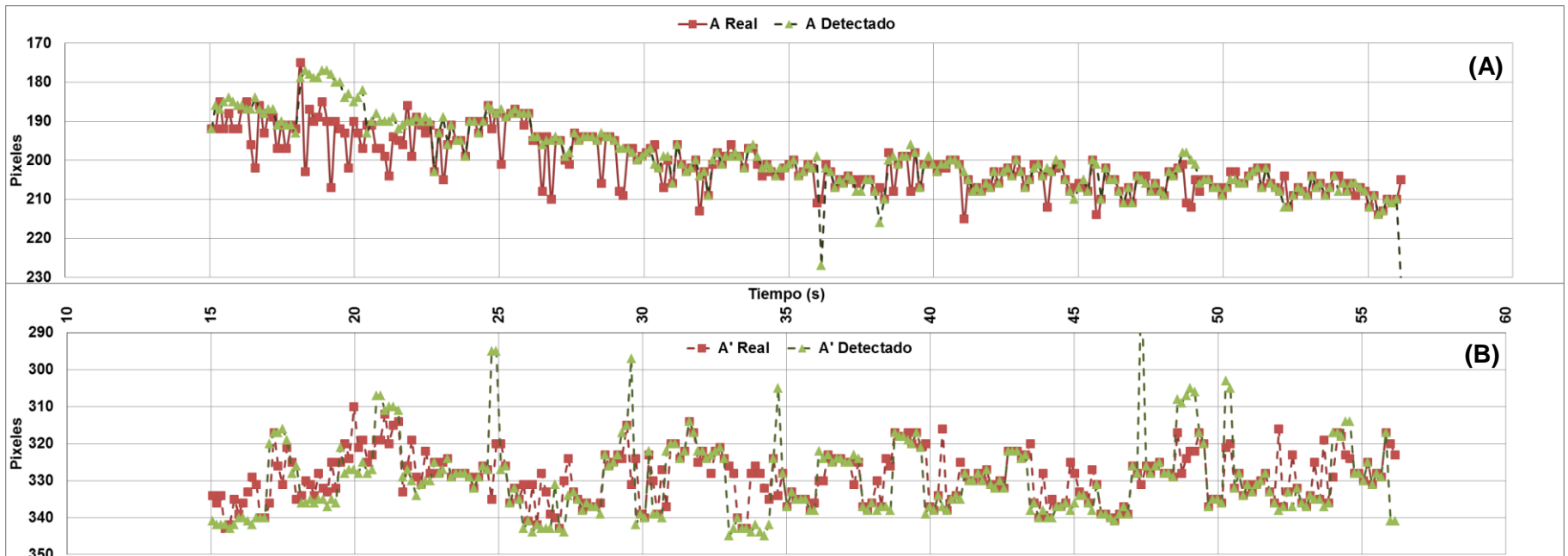
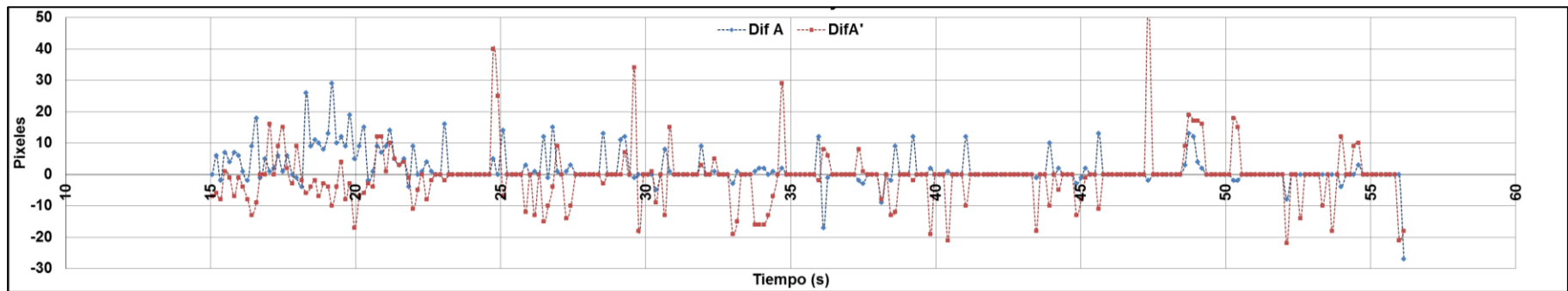


Figura 33. Detección de los puntos A' (A) y A (B) con PDI y sus posiciones reales en las imágenes del video. Prueba 1.



5.5 ANÁLISIS DE ERRORES EN EL CÁLCULO DE CAUDAL.

Haciendo un análisis de propagación de errores en el cálculo de CaudalSimple, basado en la ecuación 13, se logra la ecuación 16 para la propagación de errores en el cálculo de la velocidad simple (ecuación 7).

Las Figura 35 y Figura 36 muestran el porcentaje de error relativo del cálculo de caudal CaudalSimple. En ellas se puede observar que hay valores de hasta el 30% de error hasta los 23 segundos, y luego, hasta el final de la prueba el % de error es menor al 1% salvo algunos instantes en los que éste es mucho mayor, llegando incluso al 40%.

En resumen de los 36 segundos efectivos de la prueba (segundo 15 a 56) durante aproximadamente 33 segundos (segundo 23 a 56) el sistema tuvo un % de error menor al 1%, y que por tanto fue relativamente efectivo durante esos 33 segundos de los 36 segundos de la prueba, lo que predice un 92% de efectividad.

Durante las pruebas se presentaron varios casos en los que el sistema arrojó resultados errados, estos casos son expuestos a continuación

- Caso 1. Subestimación por mala identificación de A' y A
Éste caso ha sido explicado en el apartado 5.4 Figura 31 (B) y Figura 32 (B).
- Caso 2. Sobreestimación por mala identificación de A' y A
Éste caso ha sido explicado en el apartado 5.4 Figura 31 (A) y Figura 32 (A)
- Caso 3. Sobreestimación debido a las exigencias del modelo de sobreelevación usado.
Se puede describir según la Figura 6 (B) en la que aparece una sobreestimación del área de inundación, sobreestimación que afecta los CaudalSimple y CaudalWoodward según la ecuación 3.
- Caso 4. Cambios bruscos ante la aparición o desaparición rápida (de un *frame* a otro) de un objeto grande en la imagen capturada, cambios debidos a la auto-compensación de la Webcam iSlim 1300 V2 usada.
- Caso 5. Iluminación baja.

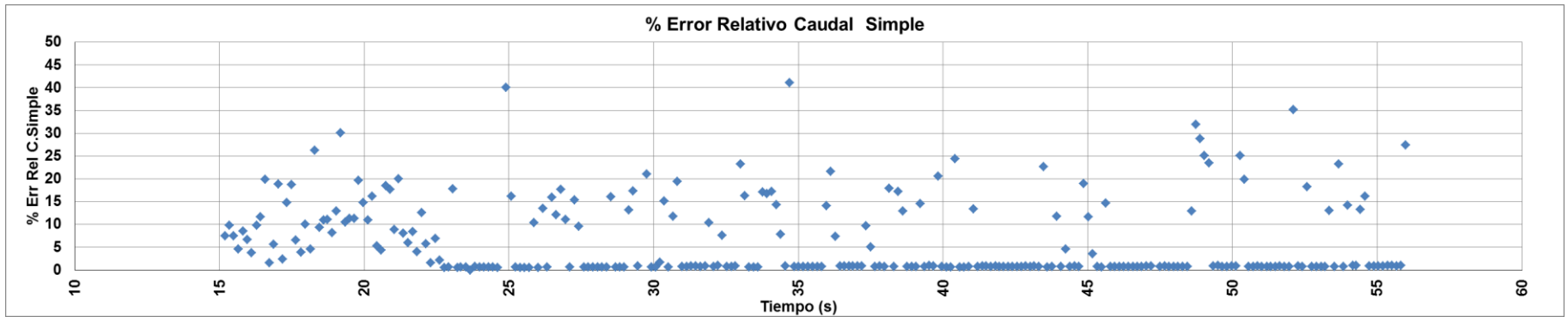


Figura 35. %Error relativo CaudalSmple. Prueba 1.

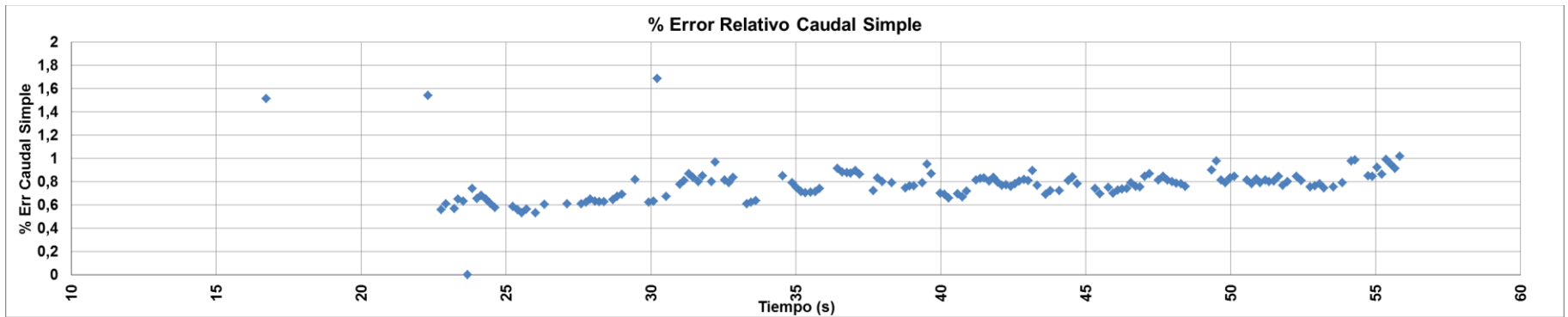


Figura 36. Valores más recurrentes del %Error relativo CaudalSmple. Prueba 1.

5.6 RESULTADOS DE OTRAS PRUEBAS

A continuación se presentan los resultados de 8 pruebas más, en las que hay variaciones en la posición de la válvula, intensidad de luz y *frames per second* (fps). Todas las pruebas fueron desarrolladas como se describe en el apartado 3.1.7 y tienen una duración de entre 20 y 45 segundos, tiempo que demoraba el tanque en disminuir su nivel hasta el límite de medición del sensor de distancia GP2Y0A21YK (de 58 a 23 cm de profundidad en la Figura 12).

En la Tabla 11 se presenta un resumen de los resultados logrados durante las pruebas (ver anexo), en ella se presentan:

- Las variaciones que hubo en cada una de ellas: Pos.Val. (posición de la válvula), Lux (intensidad lumínica en lux) y fps.
- Desviación estándar de los datos¹⁰.
- El valor medio de las diferencias entre CaudalRef y CaudalSimple: $\text{abs}(F.\text{Ref} - F.\text{Simple})$.
- Los volúmenes calculados totales a partir del CaudalRef y a partir de CaudalSimple, (ver ecuación 6).
- Por último se presentan los problemas más comunes durante la prueba.

A partir de estos resultados es posible inferir las siguientes observaciones:

Uno de los problemas más comunes fue el caso 3: sobreestimación por las exigencias del modelo de estimación de velocidad para CaudalSimple (Figura 6 B). Siendo en las pruebas 3 y 6 en las que se pudo observar con mayor claridad los efectos de este caso de sobreestimación, llegando a medir caudal CaudalSimple de hasta dos veces CaudalRef durante casi toda la prueba. Durante estas pruebas se usó la ‘posición 0’ de la válvula, lo que quiere decir que la válvula fue abierta totalmente, adquiriendo los caudales más altos que se podían obtener con el tanque de 500L y la válvula de 3”. Además es en estas pruebas que se logran las mayores diferencias medias entre CaudalRef y CaudalSimple, presentadas en la Tabla 11, midiendo en promedio 698 L/min de sobreestimación de caudal para la prueba 3 y 448 L/min sobreestimados en la prueba 6.

El segundo caso más común fue el caso 1, subestimación debida a la mala identificación de A’ y A (Figura 31B y Figura 32B), debida a defectos del algoritmo de PDI, y en la prueba 7, principalmente a la baja iluminación.

¹⁰ La dispersión de datos no es la mejor forma de evaluar la precisión en estos datos debido a que éstos cambian en el tiempo en la medida que el caudal de referencia disminuye, sin embargo dan una noción de la variación de los datos en el tiempo.

El caso 4 fue observado en todas las pruebas, pero en instantes que variaron de una prueba a otra, razón por la que no está señalado en la Tabla 11, volviéndose significativo cuando el fluido aparece en el campo de visión de la cámara, durante los primeros instantes del experimento. Ésta situación toma lugar debido a la auto-compensación de la webcam usada en este proyecto, la iSlim 1300 V2.

Los volúmenes totales, reales y medidos son bastante similares en casi todas las pruebas, demostrando que aquellos instantes durante los que el sistema sobreestimó el caudal, se compensan con aquellos momentos en los que el sistema subestimó el caudal, lo que se puede deber a la forma como salía el fluido desde el tanque, con intervalos durante los que el caudal expulsado del tanque era mayor con respecto del intervalo siguiente durante el que el caudal que salía era menor, presentando “oscilaciones”.

La mayor diferencia entre el volumen real y el medido se dio en la prueba 7, durante la que el sistema no hizo buena identificación de los puntos A' y A probablemente debido a la baja iluminación (17 lux), lo que imposibilitó que el sistema detectara el fluido durante varios intervalos y por tanto no hubo estimaciones de caudal CaudalSimple.

Respecto de las prueba 8, 9 y 10, es posible inferir que a pesar de no contar con una velocidad de captura como el resto de pruebas, los resultados demuestran que el algoritmo de PDI implementado, permite identificar hacer una buena detección del fluido aunque con una tendencia a subestimar el caudal, según se observa en los cálculos de CaudalSimple en las Figuras Figura 56, Figura 59 y Figura 62, no obstante al tener menor cantidad de medidas de caudal instantáneo, la estimación de caudal se vuelve menos confiable, y por lo tanto también el cálculo del volumen total medido.

En la mayoría de los casos la curva de CaudalSimple estuvo más cerca a la curva de CaudalRef que CaudalWoodward.

Algunas de las formas con las que se podría enfrentar algunos de los casos de error, se presentan a continuación:

- Casos 1 y 2: Problema que se puede enfrentar mejorando el algoritmo de PDI, el cual ha funcionado para tratar imágenes de video, y que se puede complementar por algunos algoritmos de detección de movimiento, detectores de características o de trazadores naturales (Osorio, 2010). O desarrollar un algoritmo que permita detectar el fluido, en una sola imagen, de modo que esa detección no dependa de la velocidad de captura de las imágenes. Esto se puede lograr haciendo uso de otro tipo de técnicas de PDI, tales como las basadas en características, como el color, textura, energía de la imagen, detectores de bordes, entre otras, o usando

detectores de características, técnicas se pueden ayudar del conocimiento *a priori* del fenómeno particular de estudio.

- Caso 3. Problema que podría ser solucionado si se define una sección transversal, en la que se pueda esperar una superficie libre del fluido con una forma más rectilínea, en la mayoría de los caudales.
- Caso 4. Posible control de la auto-compensación

Tabla 11. Resumen de resultados de pruebas.

Prueba No.	Hora	Pos. Válv.	Lux	fps	Dispersión	abs(C.Ref-C.Simpl) (L/min)	Volumen total real (L)	Volumen total medido (L)	Casos más comunes	Intervalo de tiempo (s)
1	14:24	2	620	15	107	115	304,89	373,58	Caso 3	15 a 23
2	11:55	2	550	15	108	266	192,23	182,37		
5	15:30	2	200	15	125	122	224,10	227,25	Caso 1	7 a 9, 25 a 30
									Caso 3	3 a 7 y 9 a 13
3	16:40	0	1500	15	160	698	263,66	438,01	Caso 3	toda la prueba
6	16:49	0	125	15	963	448	243,21	327,78	Caso 3	toda la prueba
7	17:56	2	17	15	134	282	272,62	91,79	Caso 1	principalmente: de 8 a 10, 11 a 13, 30 a 32 y 36 a 41
									Caso 5	toda la prueba
8	12:25	2	850	1	86	187	327,80	288,23	Caso 1	toda la prueba
9	12:33	2	950	0.5	41	199	284,12	269,62	Caso 1	toda la prueba
10	12:39	2	1200	0.33	64	147	315,26	305,30	Caso 1	toda la prueba

6. EVALUACIÓN DEL PROYECTO Y REQUISITOS MÍNIMOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA REAL.

Actualmente para el Servicio Geológico Colombiano (antes INGEOMINAS), y en particular para el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Popayán (OVSPOP), el estudio de los flujos de escombros en el VNH, ha requerido del análisis de los depósitos dejados por éste una vez finaliza el flujo. Para llevarlo a cabo, es necesario que personal calificado se desplace a puntos estratégicos por donde ha pasado el fenómeno y realice los estudios correspondientes “*in situ*”. Este análisis de los depósitos es apoyado por los datos recibidos en las estaciones de flujos de lodo, ubicadas en las riberas de los ríos Páez y Símbola.

Además, en el OVSPOP se han hecho estudios que permiten simular escenarios, obteniendo áreas de inundación a lo largo de la cuenca del río Páez a partir de un volumen total de fluido que recorrería la cuenca. Con estas simulaciones es posible ubicar niveles de amenaza en diferentes secciones transversales conocidas de la cuenca.

Todas estas herramientas, así como los constantes procesos de concientización a la población, sumado a las diferentes medidas de seguridad desarrolladas para atender a las mismas, han permitido salvaguardar muchas vidas. Sin embargo el origen impredecible de un flujo de escombros, hace que sean continuamente estudiados, de modo que se pueda entender mejor el fenómeno, y en esa medida tomar mejores medidas de prevención y de atención a la población que se pudiera verse afectada.

Una de las herramientas que se ha pensado usar en el OVSPOP, para el estudio de estos flujos, son las cámaras de vigilancia, que estarían constantemente tomando imágenes de un flujo, cuando éste aconteciese. Sin embargo ante la posibilidad de instalar una cámara de vigilancia; ¿cuál sería la forma más adecuada de ubicarla para que logre la mayor cantidad de datos del flujo de escombros? y qué otros factores técnicos (como por ejemplo topográficos) pueden afectar el cumplimiento del objetivo al ubicar una cámara de vigilancia.

Actualmente es posible instalar una cámara de vigilancia para el estudio de flujos de escombros en la cuenca del río Páez, e incluso es plausible que se pueda estimar caudal conociendo la zona y el modelo de elevación del lugar donde se ubique la cámara. Sin embargo con los resultados de éste proyecto se pueden plantear por adelantado varios factores que podrán ser determinantes para no solo estimar caudal, si no también, hacerlo con un buen grado de certeza, precisión y

en tiempo casi real, es decir que en la medida que el evento sucede y que se tomen imágenes del fenómeno, se esperaría obtener un valor de caudal estimado.

Para poder dar seguridad de que un sistema real funcione, basado en los resultados logrados en este proyecto, se presentan a continuación, las condiciones que permitieron el funcionamiento de sistema prototipo y seguidamente se analizan las circunstancias ante las que podría enfrentarse el sistema real y por último, se argumenta sobre cómo este sistema se puede proyectar para ser instalado en un lugar como en la cuenca del río Páez, basado en los resultados de este proyecto.

El prototipo fue probado con:

- Canal abierto de forma hexagonal, y con una curva de 90° cuyo ancho en la base es de 12 cm y a una altura de 17 cm alcanza un ancho de 56 cm.
- Volúmenes totales de hasta 300 L.
- Se usó un mapa de la sección transversal, basado en 14 puntos de referencia, a partir de una metodología y aplicación desarrolladas en este proyecto.
- La cámara se ubicó a una altura de 17 cm y una distancia de 45 cm desde el *thalweg*, de forma que permitió distinguir dos puntos del mapa, en planta a 0.2 cm de distancia en el caso de menor resolución.
- Computador portátil DELL Latitude D531, con Windows XP SP2, conectado directamente a la webcam, en el que está instalada la biblioteca OpenCV 2.0 y Qt 4.7.0, así como los códec de video para AVI.
- Intensidades de entre: 17 y 1500 lux. Entre las 11:55 y las 17:56.
- Velocidad de captura de video: 0.33 fps (1 *frame* cada 3 s) a 15 fps.
- Imágenes VGA 640x480 pixeles, en RGB, pero solo por visualización (puede ser en escala de grises).

Posible escenario del sistema real:

- Canal abierto: cuenca del río Páez en zona de curva. Las dimensiones variarán según el lugar que sea elegido para la instalación, sin embargo suponiendo la Sección Minas Seminario Figura 2 y Figura 38, el ancho máximo esperado del flujo sería de 260 m y una altura máxima esperada en súper elevación de 62 m. (Tomado de NASAKIWE & INGEOMINAS, 2009).
- Volumen máximo total del orden de 1.000'000.000 de m³ (Tomado de NASAKIWE & INGEOMINAS, 2009).
- La cámara deberá ser ubicada de tal forma que permita distinguir dos puntos en el mapa, en planta, a una distancia conveniente.

- Es muy poco probable que se cuente con un computador en campo en el que se pueda hacer el PDI para la estimación de caudal. Por lo que el sistema deberá contar con un envío de datos por señales telemétricas.
- La iluminación la define la luz del sol y otros elementos ambientales que intervengan en la escena.

Las siguientes Figuras muestran de forma comprensible la ubicación que podría tener la cámara de vigilancia, para montar un sistema real, basado en el levantamiento topográfico de la sección transversal de Minas Seminario Figura 2; en contraste con la disposición de la cámara en este proyecto.

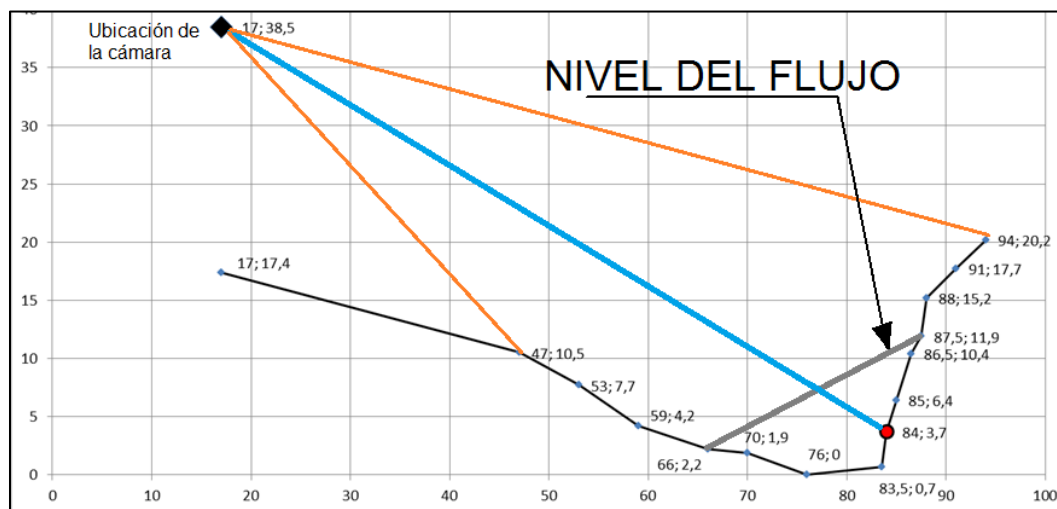


Figura 37. Sección transversal del canal de pruebas y campo de visión de la cámara ubicada en este proyecto.

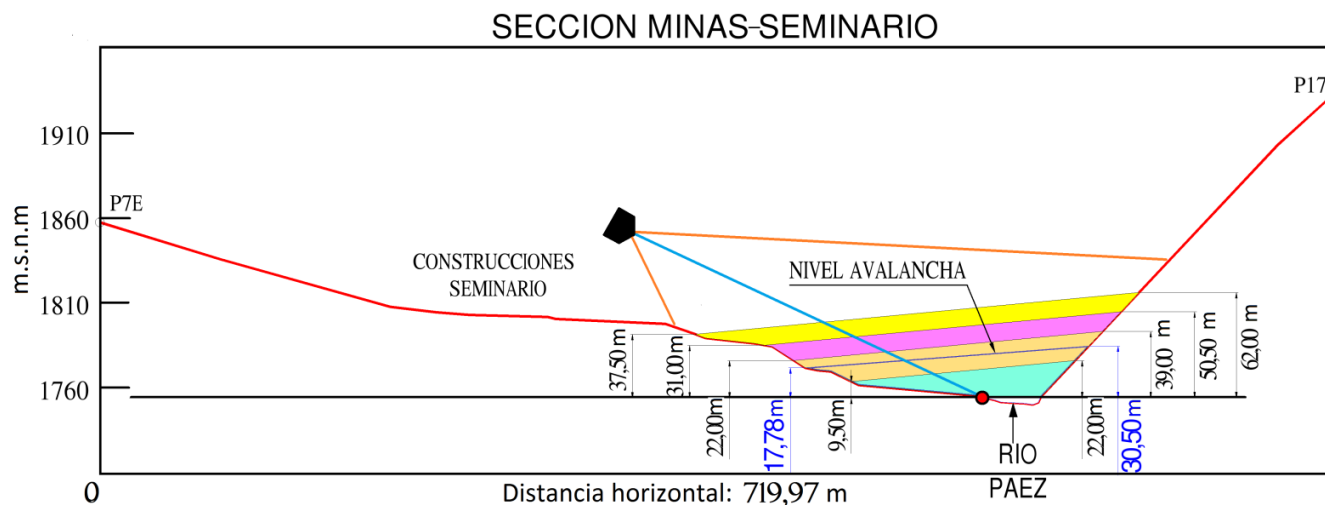


Figura 38. Sección transversal de la sección transversal Minas-Seminario y campo de visión que podría tener la cámara de vigilancia. Imagen basada en la Figura 2

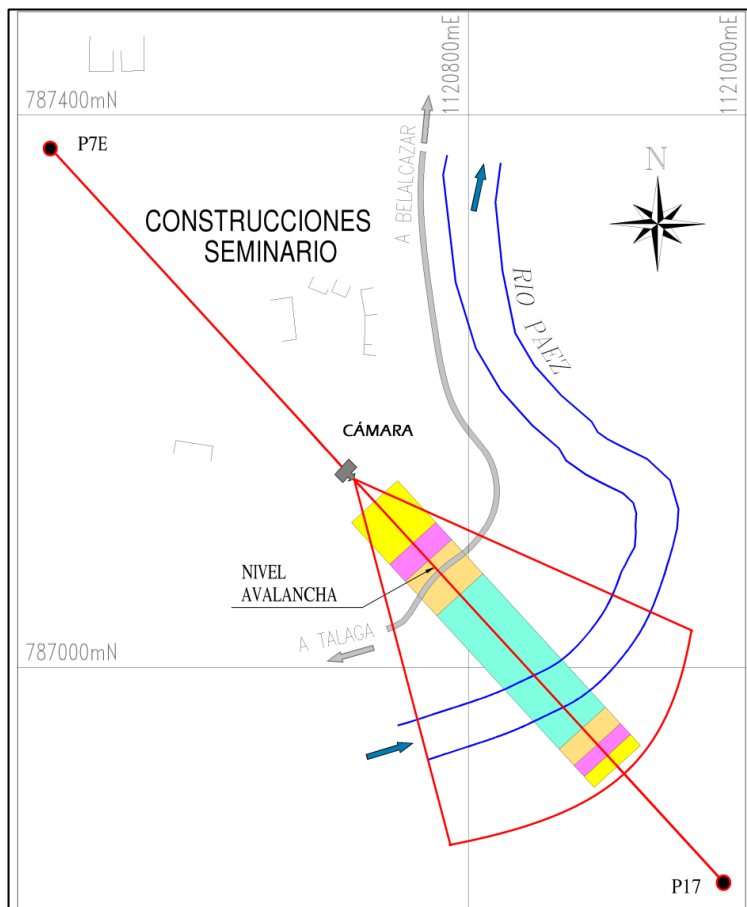


Figura 39. Vista en planta de la sección transversal Minas-Seminario y posible ubicación de la cámara de vigilancia. Imagen basada en la Figura 2

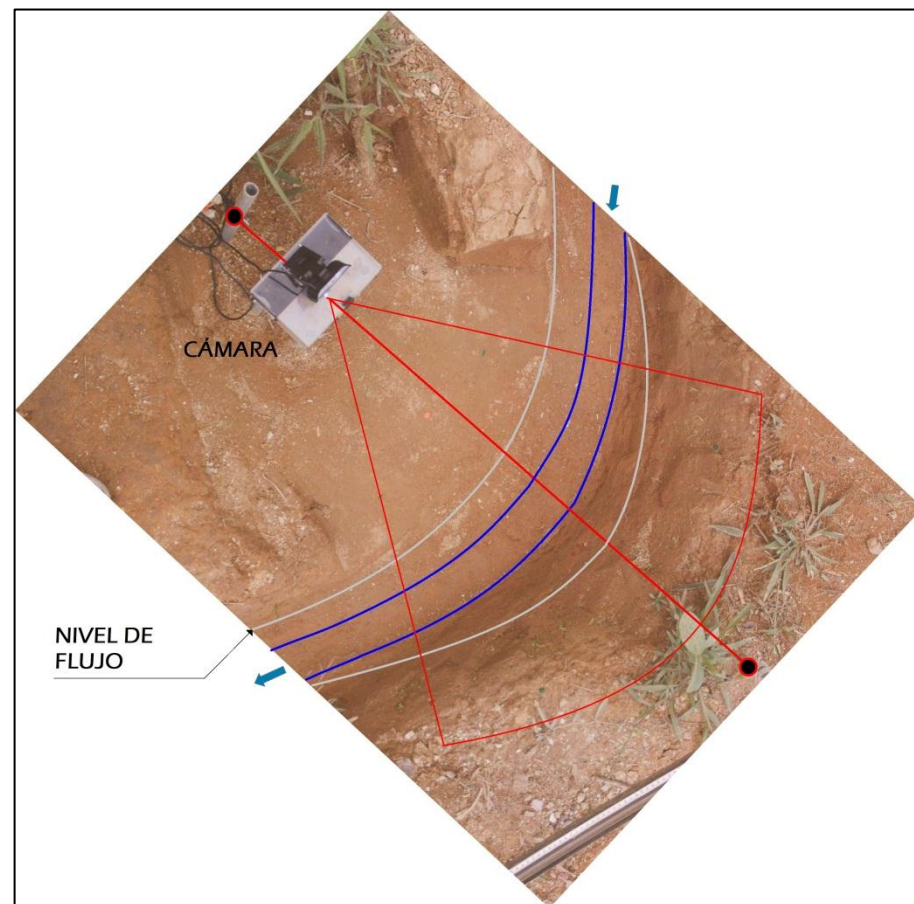


Figura 40. Vista en planta de la curva del canal usando el método implementado en este proyecto y ubicación de la cámara.

Basado en los resultados de este proyecto, es posible inferir los siguientes requisitos que tendrá que cumplir el sistema real:

1. La sección apropiada para la instalación del sistema debe ser una sección con una curva en la que se pueda esperar que la superficie libre del fluido tenga una forma aproximadamente lineal y en la que por otro lado, se garantice que la cámara no será girada, movida, tapada o que adquiera otra posición, ángulo u óptica de la cámara.
2. El levantamiento topográfico se deberá obtener a partir de la metodología creada en éste proyecto, una vez se haya elegido e instalado la cámara
3. Se debe hacer una caracterización del *Thalweg* en las imágenes de la cámara, de modo que el algoritmo de PDI funcione correctamente
4. La cámara de vigilancia debe ubicarse a una distancia prudente, en planta, del flujo, de modo que se preserven los equipos. Respecto de la altura y el ángulo de inclinación de la cámara, éstos deben ser tal que, se vea la mayor cantidad de puntos de la sección transversal, es decir que tenga la mínima cantidad de zonas ciegas u ocultas ante la cámara (Figura 6C)
5. Se debe garantizar que al ubicar la cámara, la línea vertical de referencia en las imágenes, coincida con una sección transversal de la curva.
6. Se debe garantizar que habrá un computador o dispositivo disponible para la adquisición de datos, y éste debe tener instalado como mínimo la biblioteca OpenCV 2.0 y la aplicación desarrollada en este proyecto, así como los DLL's correspondientes para el funcionamiento del ejecutable.
7. Además se debe lograr al menos 1 imagen cada 3 segundos (cualquier otra velocidad de captura menor deberá ser evaluada)

En conclusión, es posible ubicar un sistema real, que basado en este prototipo, permita estimar caudal de un flujo de escombros real. Sin embargo no es posible garantizar que el sistema funcionará a la perfección o que permitirá una alta precisión, por adelantado, de modo que se plantea que aún si se monta el sistema real, se continúe con su estudio, de modo que se permita refinarlo y en esa medida, dar fiabilidad de los resultados que éste pueda arrojar.

7. CONCLUSIONES

- El desarrollo de este proyecto permitió estimar caudal de un flujo turbio en un canal abierto usando una técnica que no requiere de un instrumento que entre en contacto con el fluido y presenta un avance en el estudio de la metodología que se requiere para que éste funcione. Sin embargo se plantea que aún si se monta el sistema, se continúe con su estudio, de modo que se permita refinarlo y en esa medida, dar fiabilidad de los resultados que éste pueda arrojar
- Se encontró que el mejor y más simple método para lograr un caudal de referencia consistió en hacer uso de la ecuación de Torricelli y a partir de un sistema de adquisición de datos lograr la profundidad en el tanque fuente, y las áreas de la válvula, a partir de la calibración de la válvula de 3" usada.
- La medición punto a punto de los puntos imagen y puntos mapa correspondientes, permitió dar una solución práctica y efectiva al problema de calibración de cámara.
- La precisión en las estimaciones depende de varios factores como la precisión lograda en la calibración espacio-cámara, el tamaño de las imágenes, la efectividad del modelo de velocidad usado, de los algoritmos de PDI, la iluminación que se tenga de la escena en un momento dado y de la velocidad de captura de las imágenes.
- Muchos de los errores en los resultados del sistema, fueron por sobreestimación, debida a las exigencias del modelo de sobreelevación usado. Sin embargo éste problema se puede relacionar de forma particular al canal construido, pues un mismo caudal en otro canal más amplio pudo no generar éste tipo de error.
- Las estimaciones de caudal CaudalSimple, en la mayor parte de los casos, fueron más precisas que las estimaciones logradas a partir del modelo de velocidad máxima propuesto por Woodward.
- El algoritmo de detección de movimiento en el que se basó el PDI, permitió identificar el fluido turbio en movimiento, con una buena efectividad en la detección de los márgenes izquierdo (A') y derecho (A) en la mayoría de instantes en la mayoría de las pruebas (90% en la prueba 1).

8. TRABAJOS FUTUROS

Existen principalmente dos posibles trabajos futuros:

El primero va dirigido al perfeccionamiento del sistema en el canal construido o en canales pequeños como el usado en este proyecto. Desarrollando por ejemplo: Pruebas con diferentes posiciones de la cámara de modo que se identifiquen las mejores ubicaciones para la misma, con diferentes curvas, exponer al sistema a experimentos, en los que haya más cambios ambientales que puedan afectar la estimación de caudal.

El segundo está encaminado a la instalación de un sistema real basado en éste prototipo, en el que se pondría a prueba la metodología seguida en el desarrollo de este trabajo y al sistema en general. En este segundo caso, se puede plantear la extrapolación del sistema a las horas de la noche, considerando que según los registros de las erupciones ocurridas en el VNH, la mayoría han tenido lugar en las horas de la noche.

También es importante ahondar sobre la manera más eficiente posible, de enviar video *y/o frames* del flujo de escombros vía telemétrica, desde el sitio en campo hasta el OVSPPOP.

Además, una vez ubicada una cámara de vigilancia para flujos de lodos, se pueden ampliar las expectativas del estudio del caudal de los flujos, a estudios de Reología y mecanismos de emplazamiento de éstas, así como de otros aspectos.

Es posible hacer una evaluación del posible uso de cámaras infrarrojas o térmicas para el estudio de flujos de escombros que permitan ayudar en la identificación del flujo. Para ello cabe aclarar que el algoritmo usado en este proyecto solo requirió de un plano de color para el PDI.

Es ideal hacer mucho más robusto el algoritmo de PDI, de modo que funcione a prueba de errores y en casos en los que por ejemplo factores como la lluvia o la neblina puedan afectar.

Por último es posible plantear el uso de un algoritmo de procesamiento secundario de los datos logrados por el sistema, de modo que éste responda ante la tendencia de los datos y permita eliminar datos errados entre los datos que el sistema mensura cuando un flujo tiene lugar.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Arattano, M. & Marchi, L. Video-Derived Velocity Distribution Along a Debris Flow Surge. En *Physics and Chemistry of the Earth*, 25 (1999); 781-784.
- Blanchette, J. & Summerfield, M. *C++ GUI Programming with Qt 4*, Second Edition. Birmingham. Prentice Hall. (2008)
- Bradski, G. & Kaehler, A. *Learning OpenCV Computer Vision with the OpenCV library*. O'Reilly. (2008).
- Cardona, C., Pulgarín, B., Agudelo, A., Calvache, M., Ordoñez, M., Manzo, O. Ajuste del Método Lahar-Z a la cuenca del río Páez (Colombia), con base en los Flujos de Lodos ocurridos en los años 1994 y 2007 en el sector del Volcán Nevado del Huila. VII Encuentro internacional del grupo de trabajo de nieves y hielo de América Latina PHI-UNESCO. Manizales (Colombia). (2008)
- Chow, V. T. *Hidráulica de Canales Abiertos*. En V. T. Chow, *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw Hill. (2004).
- De la Escalera, A. *VISIÓN POR COMPUTADOR Fundamentos y métodos*. PEARSON EDUCATION S.A. Madrid, Prentice Hall. (2001).
- Dingman, L. *Fluvial Hydraulics*. En D. Lawrence, *Fluvial Hydraulics*. Oxford. Oxford University Press, Inc. (2009)
- Inama, H., Itakura, Y., & Kasahara., M. (1999). Surface Velocity Computation of debris Flows by Vector Field Measurements. En *Physics and Chemistry of the Earth*, 25(9) (1999); 741-744.
- INGEOMINAS. (s.f.). Recuperado el 1 de febrero de 2012, de http://intranet.ingehominas.gov.co/popayan/Imagen:Mapa_Amenaza_VNH_3D.jpg.
- INGEOMINAS. (s.f.). Recuperado el 15 de Enero de 2012, de www.ingehominas.gov.co/Popayan/Volcanes/Nevado-del-huila/Generalidades.aspx.

- Iverson, R., Schilling, S., & Vallance, J. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. *Geological Society of America. Bulletin* 110(8), (1998); 972-984.
- Laganière, R. *OpenCV 2 Computer Vision Application Programming Cookbook*. Packt Publishing Ltd. Sebastopol. (2011).
- Massimo, A., & Marchi, L. Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning. *Sensors*. 8 (4), (2008);2436-2452.
- Mateo, G. G. Guión 1,2,3 y 4 de prácticas, Qt Creator. Recuperado el 1 de 10 de 2011.
- Mott, R. *Mecánica de Fluidos*. México: (2006) Pearson.
- Oliveras, N. Informe de velocidades estimadas a partir de datos de las estaciones de flujos de lodo en los ríos Símbola y Páez en la erupción del 20 de Noviembre del 2008. Popayán. Informe interno INGEOMINAS (2008).
- Osorio, J. D. Medellín (2010). METODOLOGÍAS Y TÉCNICAS BASADAS EN SISTEMAS DE VIDEO PARA LA MEDICIÓN DE VARIABLES HIDRODINÁMICAS. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MEDELLÍN. Facultad de Minas.
- Pulgarín, B. Ciudad de México (2000). Depósitos Masivos del Pleistoceno tardío asociados al colapso del flanco sur del volcán Nevado del Huila. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Sismología y Vulcanología). UNAM.
- Pulgarín, B., & Cardona, C.. Erupciones del volcán Nevado del Huila y cambios en su masa glaciár: 2007. *Boletín Geológico*, 42(1-2) (2008).
- Pulgarin, B., Hugo, M., Agudelo, A., Calvache, M., Manzo, O., Narváez, A., y otros. (2008). "Características del lahar del 20 de noviembre de 2008 en el Río Páez, causado por la Erupción del Complejo Volcánico Nevado del Huila – Colombia" Informe interno INGEOMINAS.
- Schilling, S. P. LAHARZ: GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones, U.S. Geological Survey. Open-File Report 98-638 (2002); 1-80

SHARP. (2007). GP2Y0A21YK0F. Distance Measuring Sensor Unit Measuring distance: 10 to 80 cm Analog output type. GP2Y0A21YK0F.

Skoog, D. A., Holler, J. F. & Nieman, T. A.. Principio de Analisis Instrumental. Madrid: McGrawHill. (2001).

Vélez, M. Hidrología para Ingenieros. En M. Vélez. Universidad Nacional de Colombia sede Medellin. (2000)

Vide, J. Ingeniería Fluvial. Barcelona: Centre de Publicacions del Campus Nord (CPET).

Worni, R., Huggel, C., Stoffel, M., Pulgarín, B. Challenges of modeling current very large lahars at Nevado del Huila Volcano, Colombia. Bulletin of Volcanology. Official Journal of the International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth`s Interior (IAVCEI) 74(2) (2008); 309-324.

ANEXO

A continuación los resultados logrados en 8 pruebas ante diferentes condiciones, resumidas en la tabla siguiente.

Prueba No.	Hora	Posición. Válvula.	Lux	fps.
2	11:55	2	550	15
5	15:30	2	200	15
3	16:40	0	1500	15
6	16:49	0	125	15
7	17:56	2	17	15
8	12:25	2	850	1
9	12:33	2	950	0.5
10	12:39	2	1200	0.33

Prueba 2 (15fps).

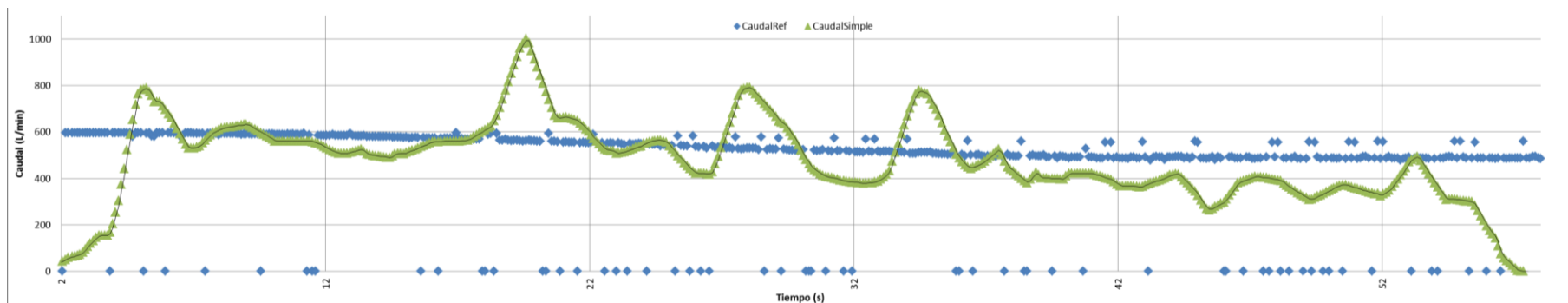


Figura 41. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 2.

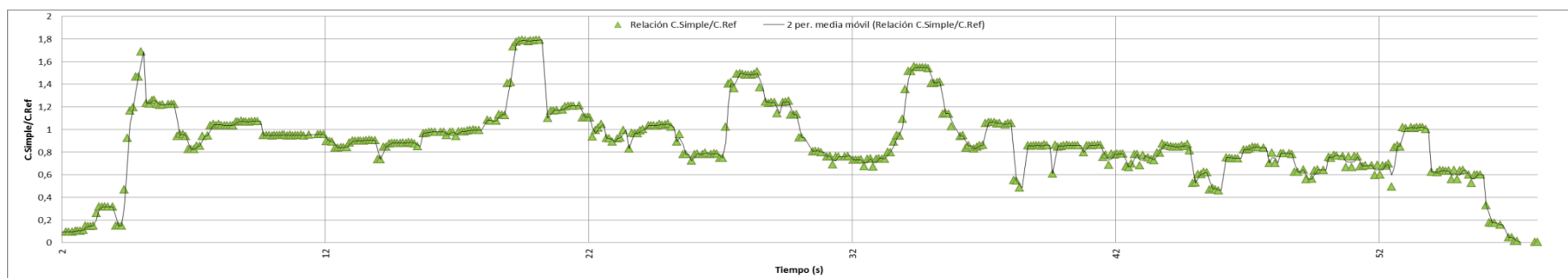


Figura 42. Relación entre el caudal estimado (Caudal Simple) con Caudal Ref. Prueba 2.

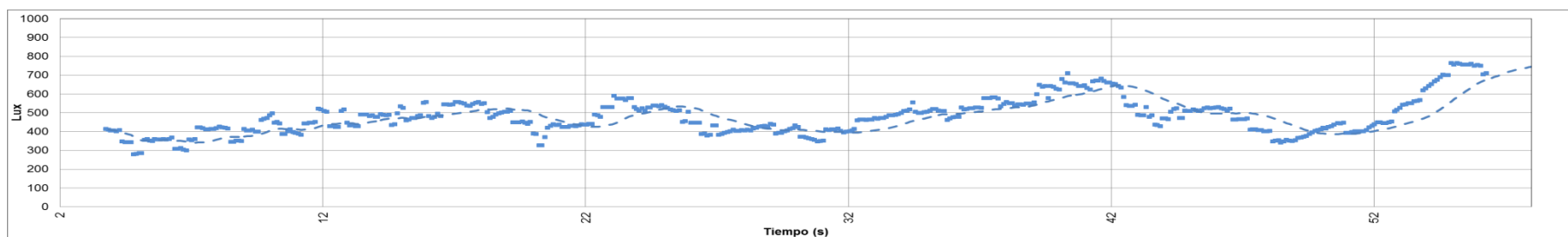


Figura 43. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 2.

Prueba 3 (15fps).

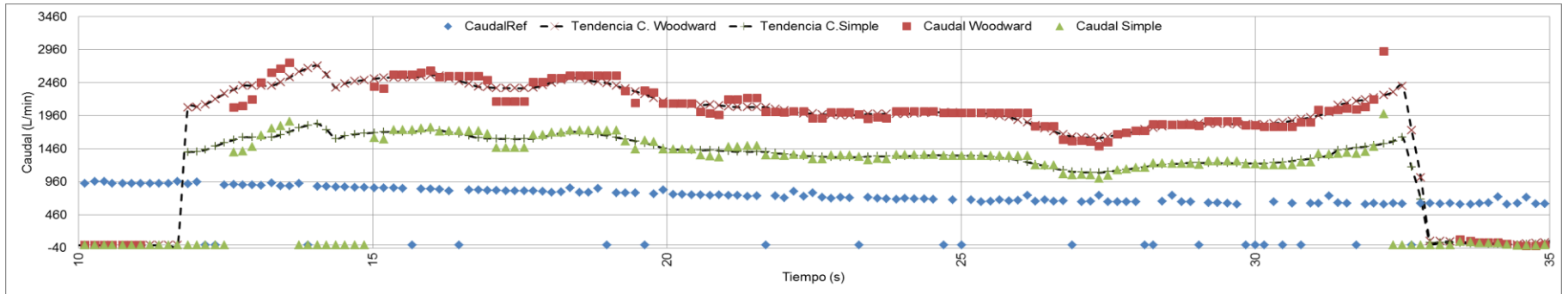


Figura 44. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 3.

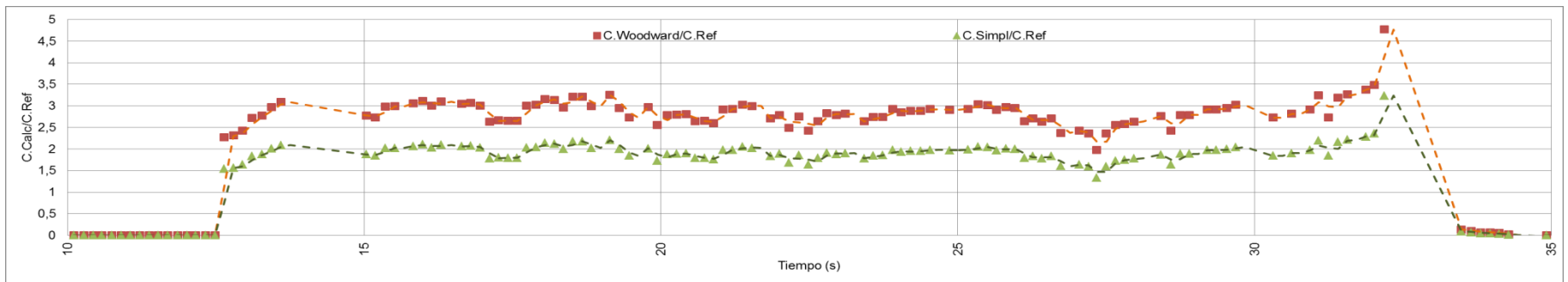


Figura 45. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 3.

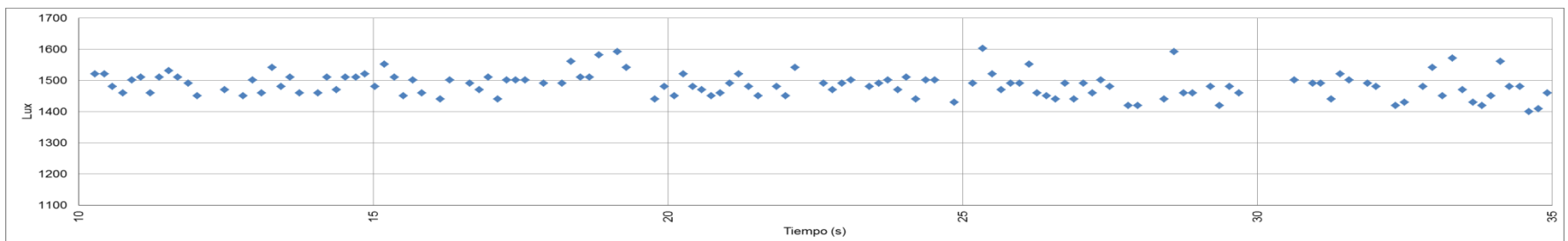


Figura 46. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 3.

Prueba 5 (15fps).

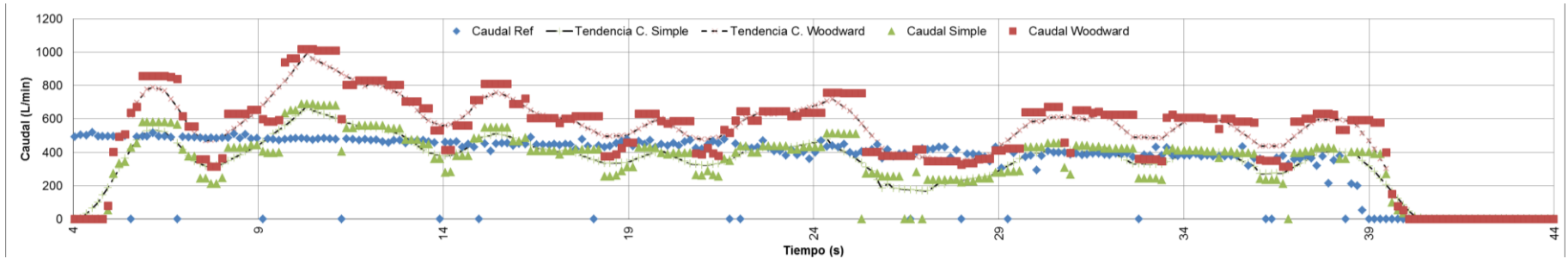


Figura 47. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 5.

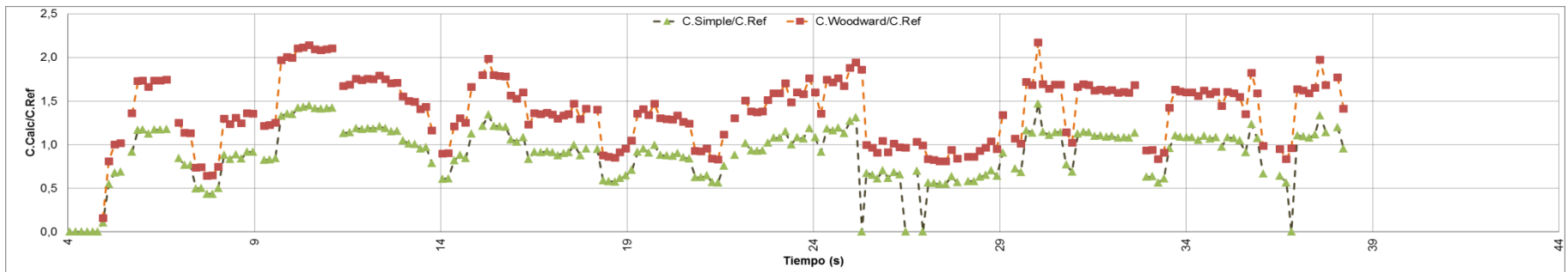


Figura 48. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 5.

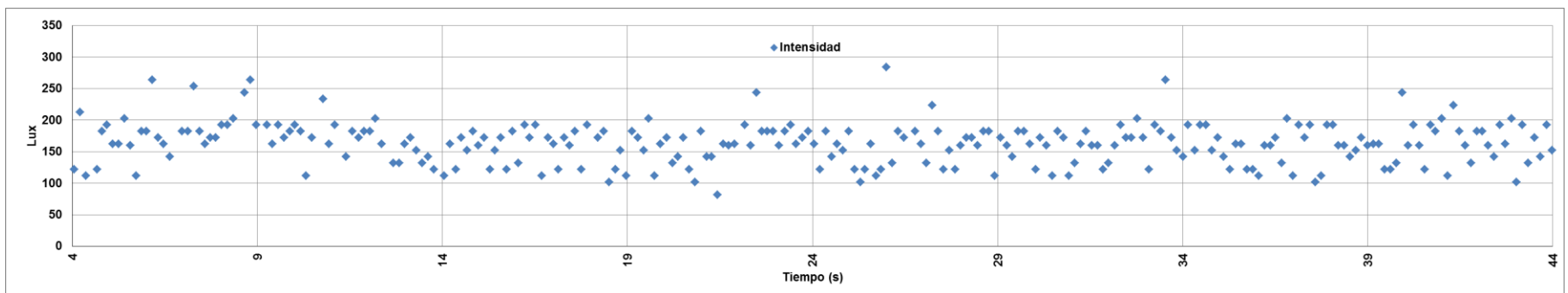


Figura 49. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 5.

Prueba 6 (15fps).

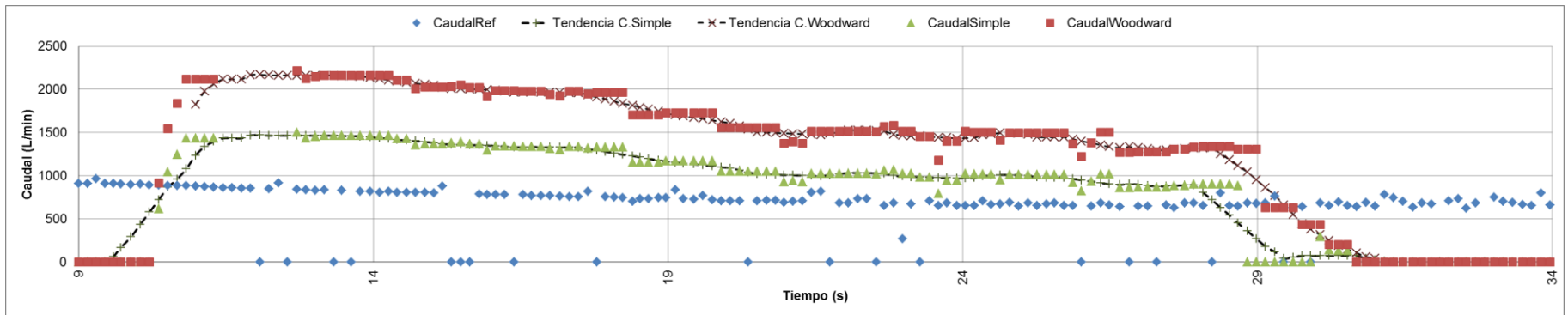


Figura 50. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 6.

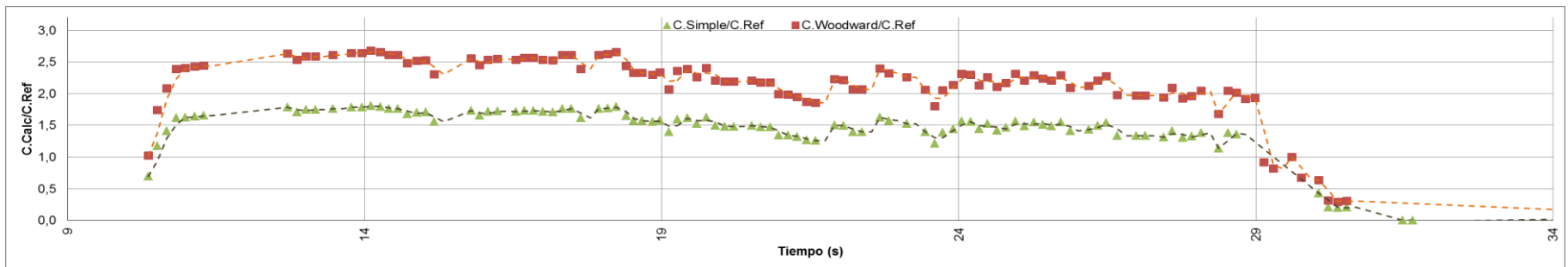


Figura 51. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 6.

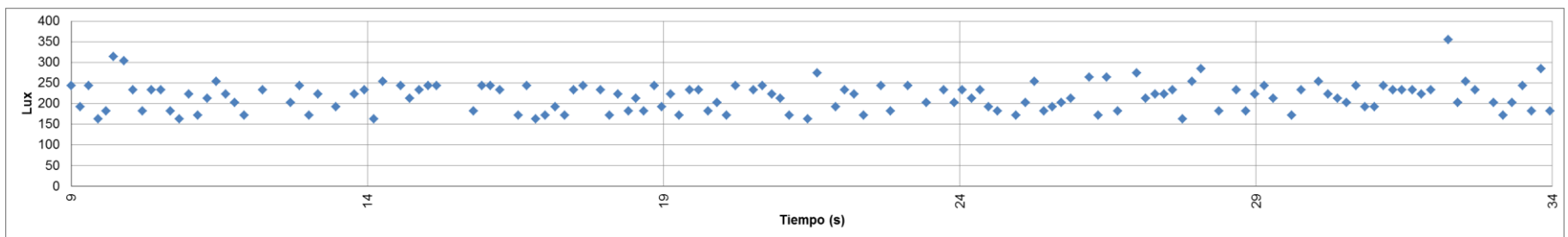


Figura 52. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 6.

Prueba 7 (15fps).

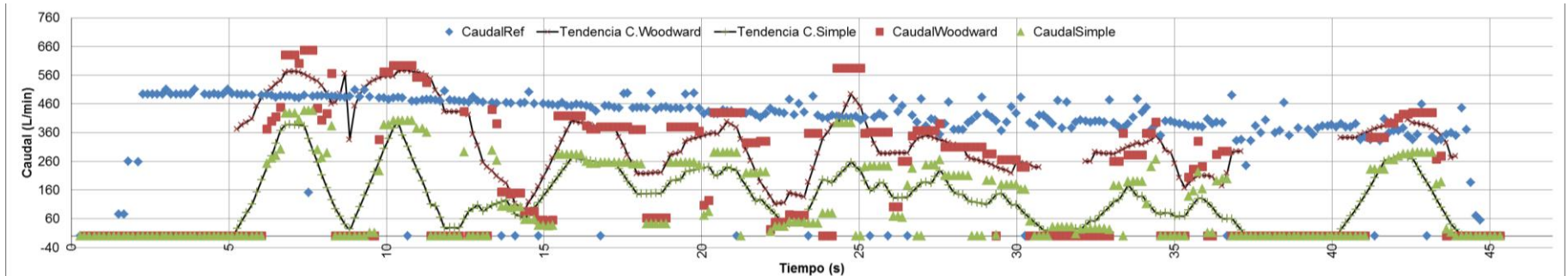


Figura 53. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 7.

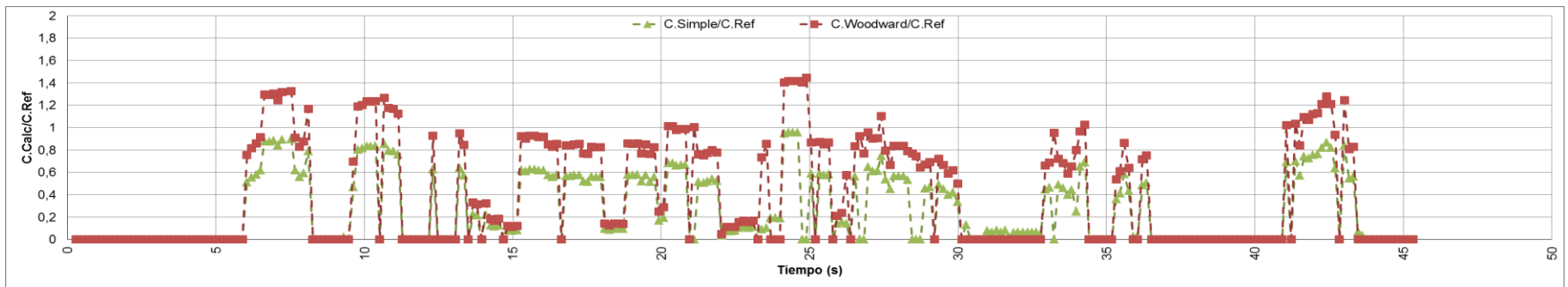


Figura 54. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 7.

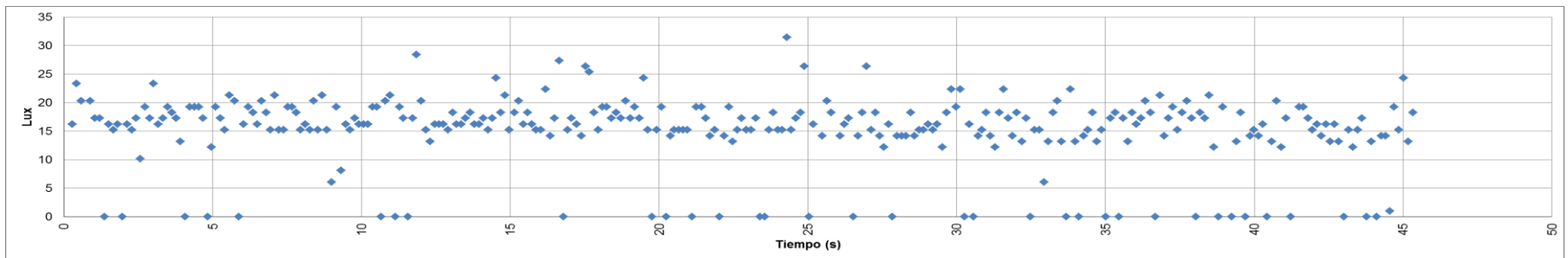


Figura 55. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 7.

Prueba 8 (1fps).

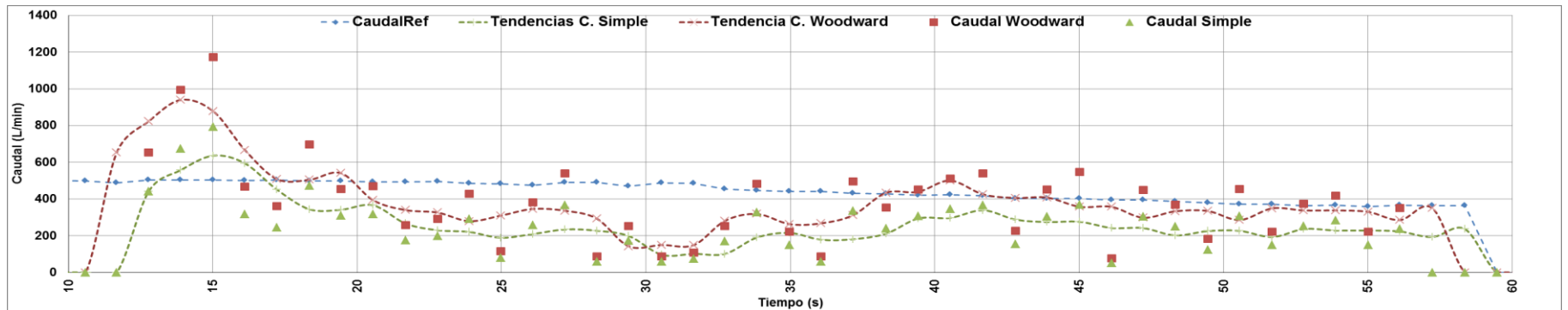


Figura 56. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 8.

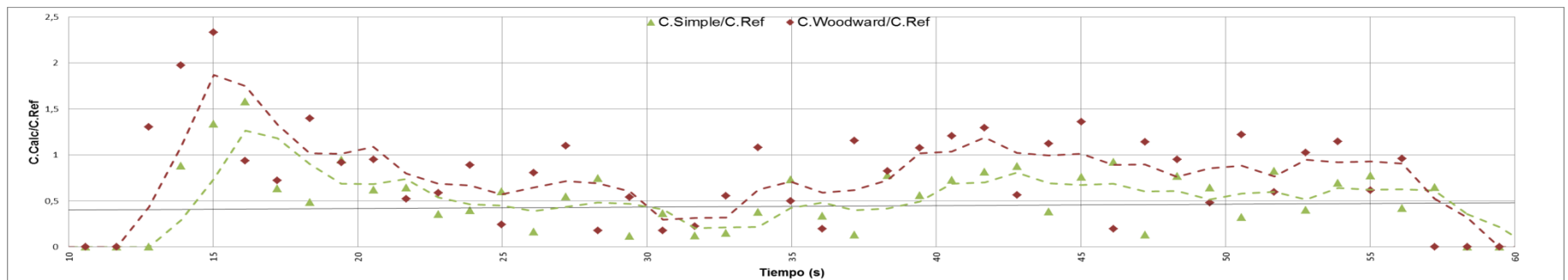


Figura 57. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 8.

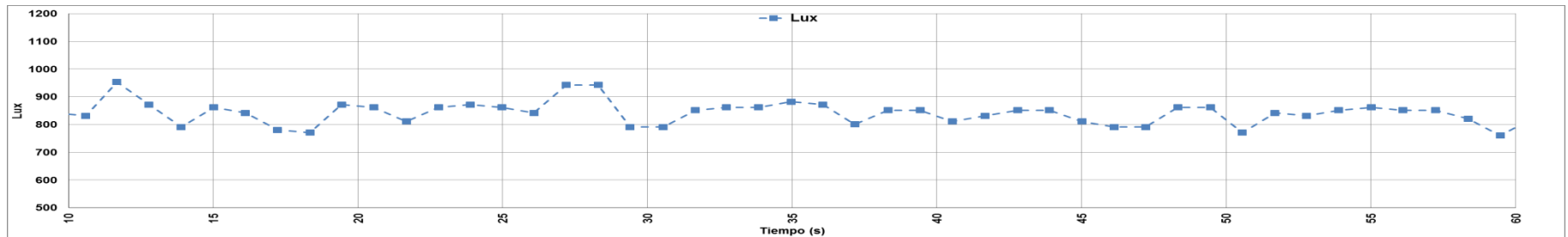


Figura 58. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 8.

Prueba 9 (0.5 fps).

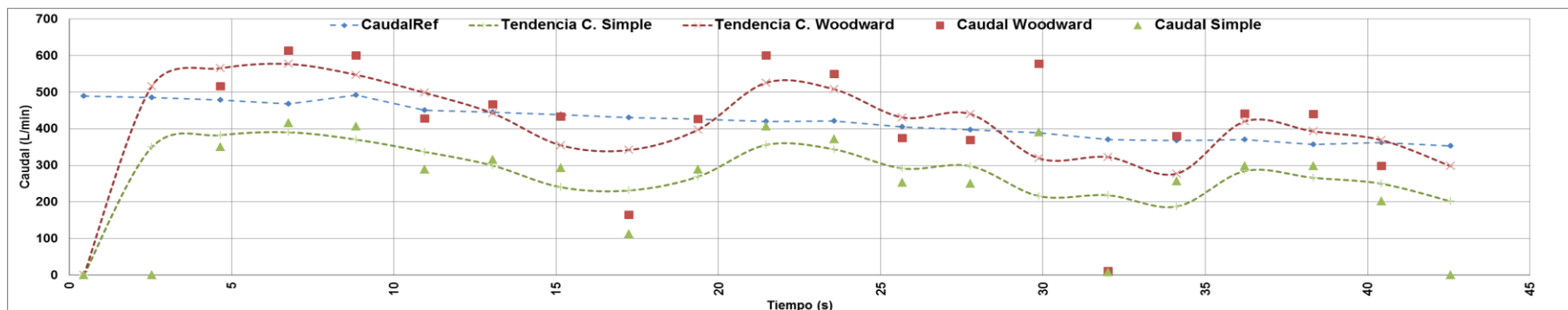


Figura 59. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 9.

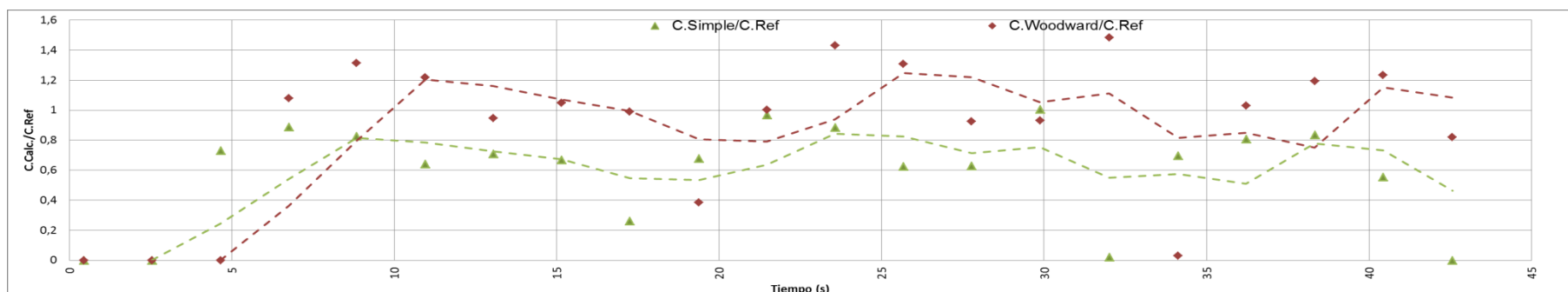


Figura 60. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 9.

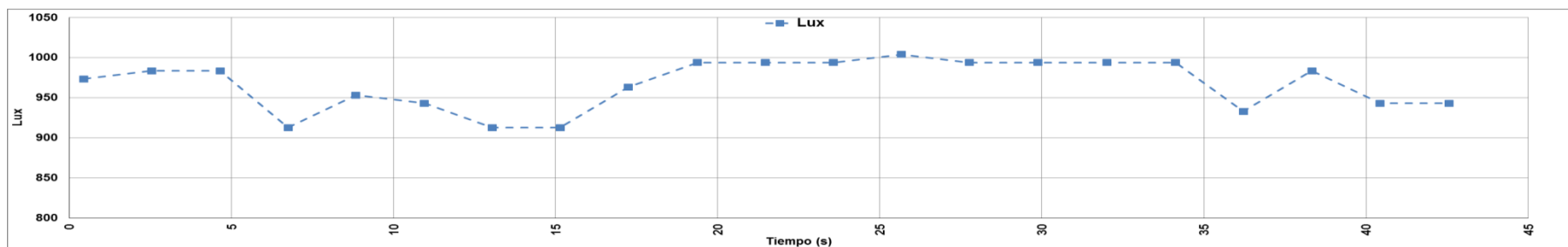


Figura 61. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 9.

Prueba 10 (0.33fps).

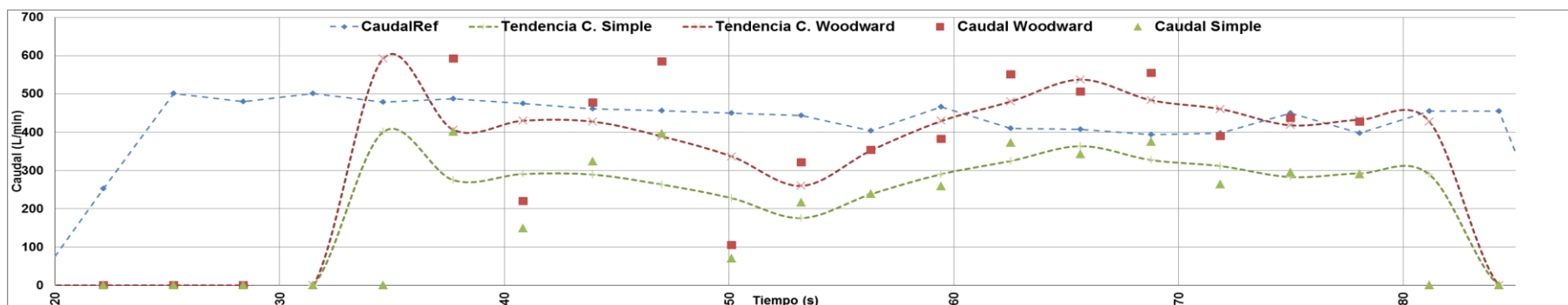


Figura 62. Caudales estimados y Caudal de Referencia. Prueba 10.

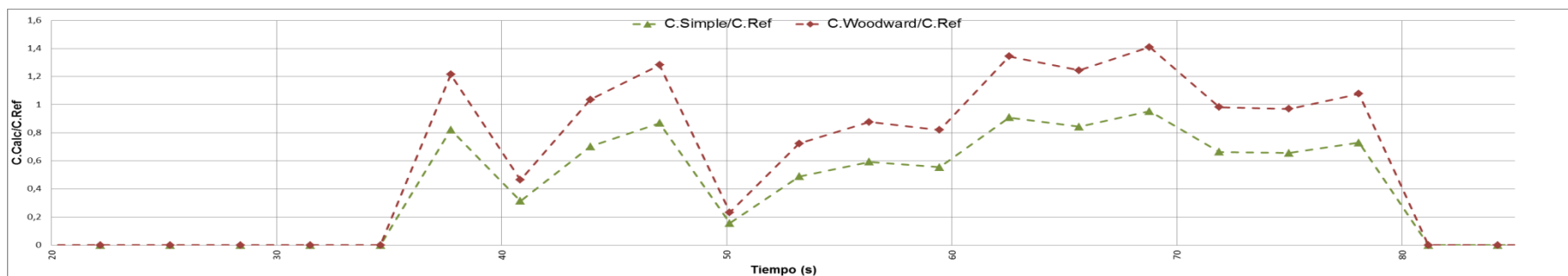


Figura 63. Relaciones entre los caudales estimados (Caudal Simple y Caudal Woodward) con Caudal Ref. Prueba 10.

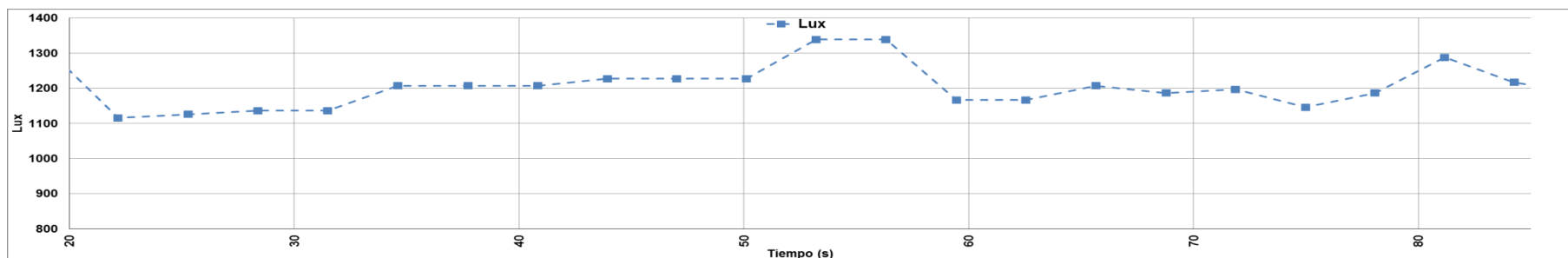


Figura 64. Intensidad lumínica a lo largo de la prueba 10.