

DETECCIÓN DE VELOCIDAD DE OBJETOS MEDIANTE UN SENSOR RGB-D Y APLICACIÓN A UN FRENTE ALUVIONAL

JAIME COTRONEO^{1,2}

¹Instituto Nacional de Hidráulica, Ministerio de Obras Públicas, Chile

²Estudiante Programa Doctorado Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Chile

jaimecotroneo@inh.cl

RESUMEN

Este artículo presenta un estudio sobre el uso de la cámara Intel RealSense D455, basada en tecnología RGB-D, para la detección y seguimiento de objetos en movimiento, y la medición de su velocidad en experimentos hidráulicos. Se evaluó su desempeño realizando ensayos con diferentes objetos geométricos (cubo, pirámide y dodecaedro) desplazándose a distintas velocidades sobre un riel con servomotor. Los resultados mostraron que la cámara D455 es capaz de realizar un seguimiento preciso y determinar la velocidad con buena precisión para los casos del cubo y el dodecaedro, con diferencias porcentuales inferiores al 1,6% respecto a las velocidades reales. Sin embargo, en el caso de la pirámide, se observaron mayores discrepancias (hasta 9,3%), atribuidas a las características geométricas y los reflejos especulares que afectaron la estimación de profundidad. Posteriormente, se aplicó la misma técnica para detectar y medir la velocidad del frente de un pulso aluvional en una instalación experimental. Los datos de altura obtenidos permitieron identificar el avance del frente y calcular su velocidad media mediante un ajuste lineal, demostrando el potencial de esta tecnología para el monitoreo de fenómenos hidráulicos dinámicos. A pesar de las limitaciones puntuales, los resultados generales demostraron el gran potencial de la tecnología RGB-D para el seguimiento de objetos y la medición de velocidades en experimentos hidráulicos, combinando una alta resolución temporal y espacial sobre un área amplia.

Palabras claves: Sensor RGB-D, velocimetría superficial, medición de altura

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La experimentación física juega un papel crucial en el avance de la hidráulica contemporánea, ya que muchos aspectos de la dinámica de los flujos aún deben ser clarificados o documentados mediante investigación o aplicaciones prácticas. A lo largo de la historia, las técnicas de instrumentación y medición han sido indispensables para cuantificar los complejos fenómenos hidráulicos, desempeñando un papel crucial en la investigación y en la aplicación en problemas de ingeniería (Ettema et al., 2000; Novak et al., 2010; Frostick et al., 2011, 2017; Sukhodolov, 2015). La instrumentación para la experimentación hidráulica proporciona los medios para observar, apreciar y controlar los procesos de flujo en el laboratorio y en el campo.

Desde los primeros experimentos de Henri de Pitot y Daniel Bernoulli en el siglo XVIII, hasta el arribo de la era moderna, la instrumentación hidráulica ha evolucionado considerablemente para satisfacer las cambiantes demandas de la ciencia fundamental y las aplicaciones prácticas. Tradicionalmente, los experimentos hidráulicos han planteado desafíos significativos en términos de capacidad de instrumentación para medir flujos no uniformes, no estacionarios y turbulentos (Rouse e Ince, 1957). A lo largo de los años, los avances en la sofisticación de la instrumentación y las técnicas de medición han permitido medir más propiedades del flujo y del medio ambiente con una resolución espacial y temporal notablemente alta (Sukhodolov, 2015; Venditti et al., 2016; Williams et al., 2015).

La instrumentación típica utilizada en experimentos hidráulicos incluye mediciones de altura del flujo (limnómetros, sensores ultrasónicos, sensores laser, etc.), de velocidad (veletas, tubos de Pitot, flujómetros de hélice, ADV, PIV, etc.), sensores de presión, instrumentos de medición de caudal, sistemas de adquisición de datos y cámaras de video de alta velocidad, entre otros. Sin embargo, existe una necesidad continua de combinar los avances en instrumentación y métodos con orientación práctica sobre cómo llevar a cabo experimentos hidráulicos de manera efectiva (Novak y Cabelka, 1981).

Recientemente, las nuevas tendencias en instrumentación hidráulica se han enfocado en el desarrollo de técnicas ópticas, acústicas y de procesamiento de imágenes avanzadas (Carfagni et al., 2019). En particular, la tecnología de cámaras tridimensionales (3D) o de profundidad, como las cámaras Intel RealSense series D400, surge como una alternativa potencial para el estudio de flujos superficiales libres inestables y turbulentos, permitiendo simultáneamente una alta resolución temporal y espacial sobre dominios espaciales relativamente grandes.

La cámara Intel RealSense series D400 utiliza estereoscopía activa para estimar la distancia desde la cámara hasta la superficie de un objeto, combinando una cámara digital RGB, dos cámaras infrarrojas (IR) y un láser IR (Carfagni et al., 2019; Giancola et al., 2018). Esta tecnología ha sido implementada previamente en diversos estudios enfocados en topografía, flujos granulares transitorios y flujos aireados como los resaltos hidráulicos (Butkiewicz, 2014; Caviedes-Voullième et al., 2014; Bung et al., 2020).

La precisión y versatilidad de esta tecnología, nos lleva a explorar diferentes campos de investigación en el área hidráulica, como lo es por ejemplo la detección y seguimiento de frentes aluvionales a escala de laboratorio y con ello poder obtener la altura y velocidad de este. Por lo tanto, en este estudio, se investiga la idoneidad del módulo de cámara Intel RealSense y sus sensores de altura (láser) para capturar la superficie del flujo. Se analiza la sensibilidad del instrumento experimentalmente, con el seguimiento elementos de diferentes geometrías y a diferentes velocidades controladas externamente. Además, los datos adquiridos por la cámara se comparan con datos de un frente aluvional obtenidos utilizando otras técnicas, resaltando las ventajas y limitaciones de esta nueva tecnología en el contexto de la experimentación física hidráulica.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Instalación Experimental

Con el propósito de validar el funcionamiento del equipo para capturar la velocidad, se construye un riel con servomotor de velocidad contralada para movilizar diferentes elementos, como se muestra en la Figura 1. El riel mide 1.5 metros y los rangos de velocidad que alcanza el servomotor son de 0,074 – 0,29 m/s. los elementos que se ocuparon para el seguimiento son un cubo de 5 cm de lado, una pirámide con aristas de 5 cm y un dodecaedro con aristas de 2 cm, como se aprecian en la Figura 2a, Figura 2b y 2c, respectivamente. Las tres piezas fueron impresas mediante una impresora 3D con un error de 0.2 mm. La cámara Intel® RealSense™ D455 fue montada sobre un trípode a 1 metro aproximadamente de altura sobre el riel, de forma perpendicular a este. En la Figura 1a se observa la salida RGB y en la Figura 1b la salida del mapa de altura de la cámara Intel® RealSense™ D455.

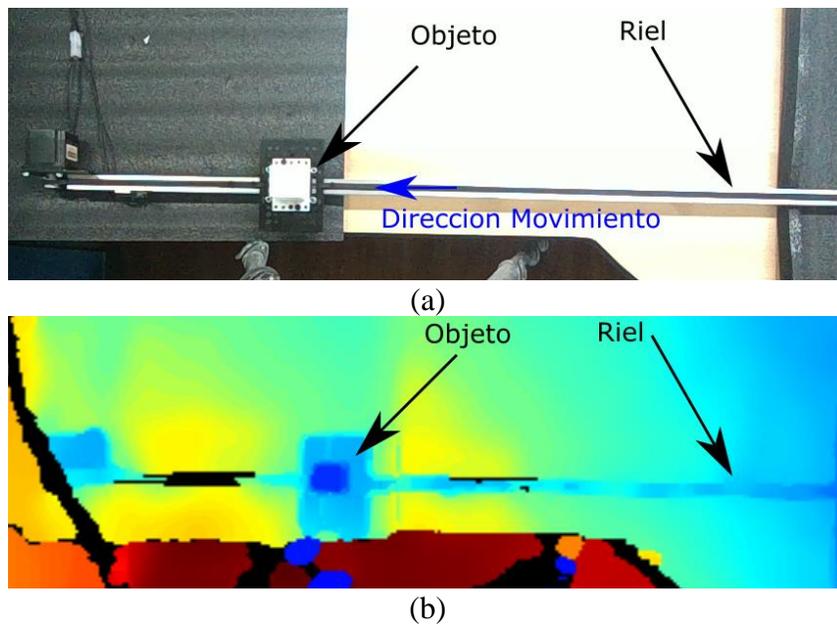


Figura 1. Imágenes obtenidas de la cámara D455. (a) Fotografía de la instalación experimental. (b) Mapa de profundidad obtenida de la misma fotografía mostrada en (a).

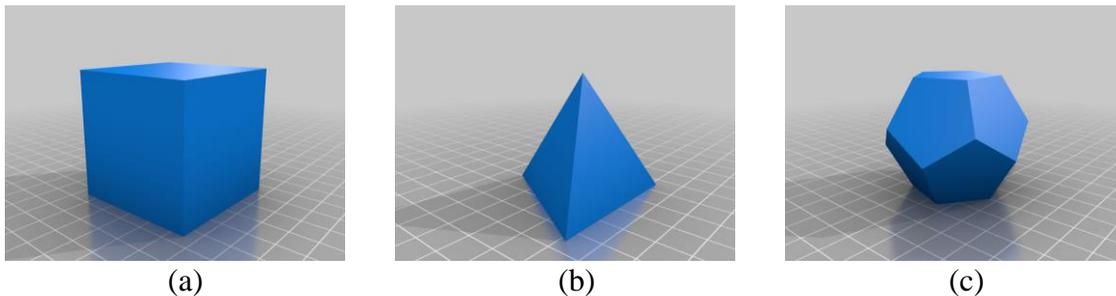


Figura 2. Croquis de los objetos usados. (a) Cubo con lados de 5 cm. (b) Pirámide con aristas de 5 cm. (c) Dodecaedro formado por 12 pentágonos de aristas de 2 cm.

2.2 RGB-D cámara

La cámara seleccionada para este estudio es la Intel® RealSense™ D455. Esta cámara utiliza una tecnología de cámara estéreo activa para generar mapas de profundidad. Cuenta con dos cámaras infrarrojas (IR) y un proyector láser IR que emite un patrón de puntos aleatorios en la escena. Las dos cámaras IR captan este patrón de puntos desde ángulos ligeramente diferentes, lo que permite calcular la profundidad mediante triangulación estéreo. Además de las cámaras de profundidad, la D455 también incluye una cámara RGB para capturar imágenes a color. Esto permite combinar los datos de color con los datos de profundidad, brindando una representación 3D a todo color de la escena. Más detalle se puede ver en la Tabla 1

Tabla 1. Principales características de la cámara Intel RealSense D455

Resolución de profundidad (max)	1280 × 720 px
Resolución RGB (max)	1280 × 1080 px
Frame rate (max)	90 fps
Baseline	95mm
FOV (H × V) at 16:9 in HD	87.0° × 58.0° (±3°)
FOV (H × V) at 8:5	75° × 62° (±3°)
Rango ideal (z axis)	0.6 a 6 m
Tecnología de Profundidad	Active IR stereo
	OmniVision Technologies
Sensor imagen	OV9782

La cámara Intel RealSense D455 es compatible con varias bibliotecas y SDK, como Intel RealSense SDK, OpenCV, ROS (Robot Operating System), y la librería en Python pyrealsense2, entre otras. Esto permite a los desarrolladores integrar fácilmente las capacidades de visión artificial y percepción 3D en sus aplicaciones. En este estudio en particular se usara para la grabación de los videos el software Intel RealSense SDK y para obtener los datos la librería en Python pyrealsense2.

La D455 es capaz de detectar sutiles variaciones de textura en entornos bien iluminados, incluyendo aplicaciones al aire libre. Aunque el sistema fue desarrollado específicamente para aplicaciones con una gran variedad de condiciones de iluminación, se proporcionan orientaciones para superposiciones del proyector óptico para condiciones de poca iluminación o escenas sin textura (Brung et al, 2020). Por otra parte, la cámara no tiene dificultad para determinar profundidades a través de materiales transparentes como acrílico y agua clara, a menos que la sustancia sea altamente reflectante o cree distorsión óptica por refracción.

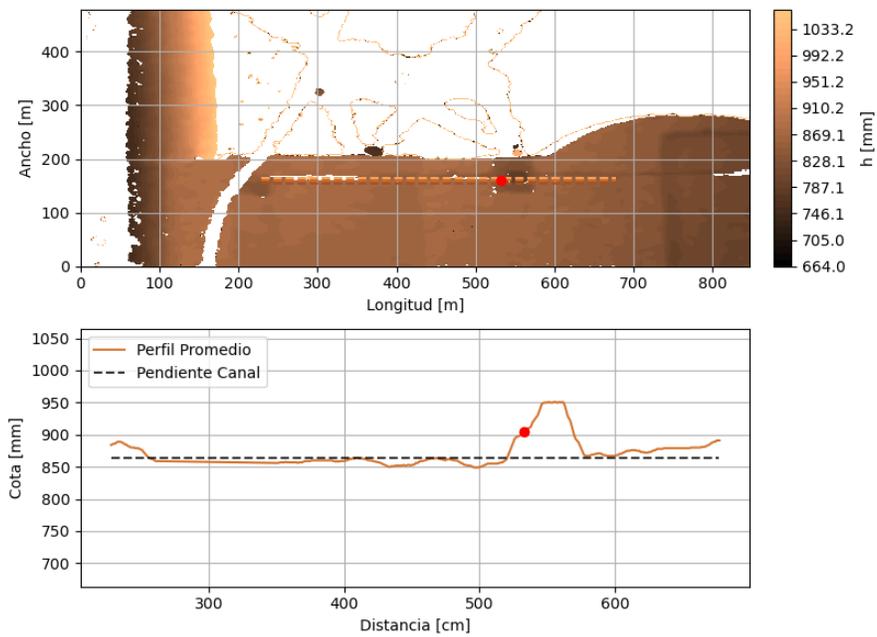
Se realizaron 12 ensayos diferenciados en 4 velocidades y 3 elementos geométricos, los que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Ensayos realizados

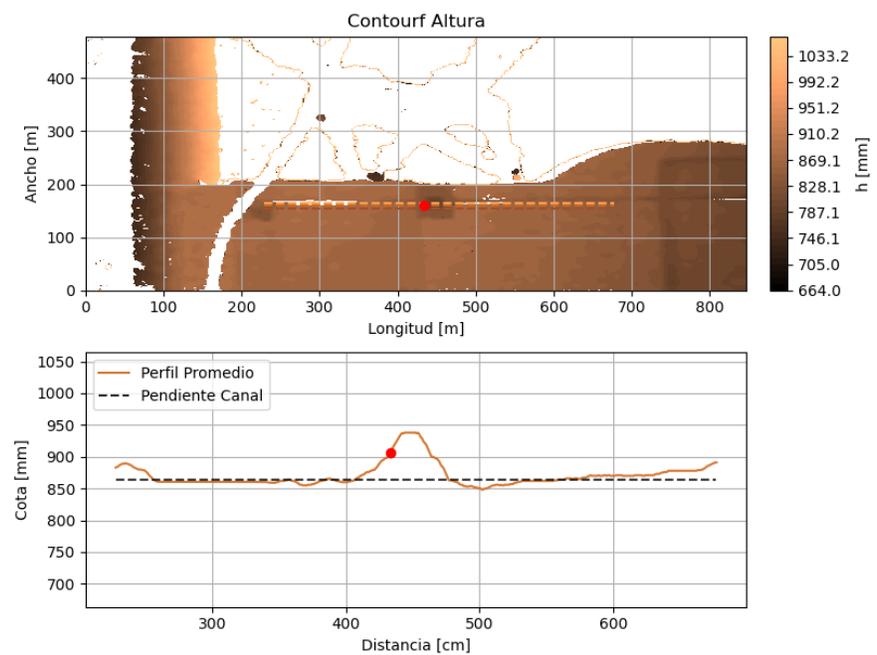
Exp N°	Elemento	Velocidad riel [m/s]
C1	Cubo	0,2904
C2	Cubo	0,1469
C3	Cubo	0,0981
C4	Cubo	0,0737
P1	Pirámide	0,2904
P2	Pirámide	0,1469
P3	Pirámide	0,0981
P4	Pirámide	0,0737
D1	Dodecaedro	0,2904
D2	Dodecaedro	0,1469
D3	Dodecaedro	0,0981
D4	Dodecaedro	0,0737

2.3 Post-procesos

Para poder identificar la velocidad de los elementos en el riel, primero se debe detectar la posición del objeto en el tiempo. Para ello se usan los datos de profundidad de la cámara D455. Se extraen 3 perfiles longitudinales al riel, uno en el centro de este y los otros dos desplazados 2 cm por arriba y abajo del perfil central para después promediar estos 3 perfiles e identificar el primer punto de este perfil promediado que supere un umbral sobre los 5 cm del riel. En las imágenes superiores de las Figura 3a y Figura 3b se observa la vista en planta del mapa de profundidad a diferentes tiempos para el caso del cubo con los 3 ejes longitudinales al riel, donde en color rojo se identifica el vértice con el cual se obtiene el grafico posición v/s tiempo. En el grafico inferior de la Figura 3a y 3b se muestra el perfil promedio de los 3 perfiles, identificando el vértice o punto más prominente de cada objeto, registrando su posición en cada fotograma. Las coordenadas de posición obtenidas se graficaron en función del tiempo, generando curvas que reflejaban el desplazamiento de los objetos a lo largo del riel. Para cada curva, se realizó un ajuste lineal mediante mínimos cuadrados, obteniendo la ecuación de una recta cuya pendiente representaba la velocidad del objeto en ese ensayo (Figura 4).



(a)

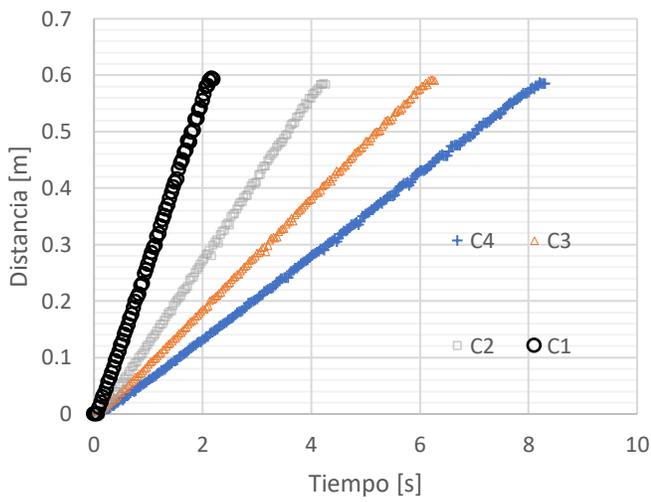


(b)

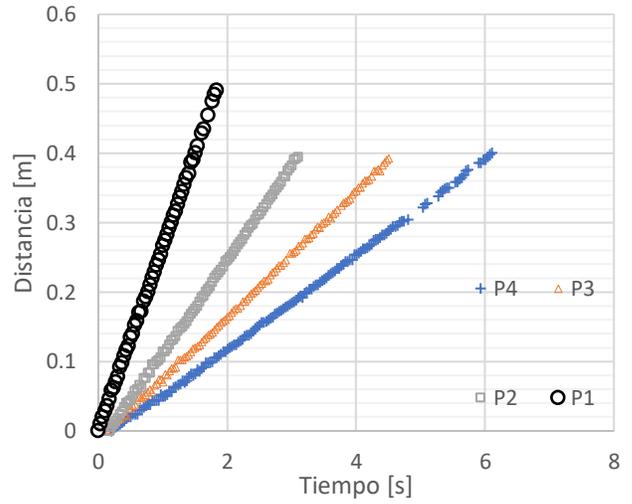
Figura 3. La imagen superior corresponde al mapa de profundidad para el ensayo C3 obtenido mediante la cámara D455 y el gráfico inferior al perfil longitudinal promedio. (a) Experimento C3 en $t=1,06$ segundos. (b) Experimento C3 en $t=3,435$ segundos.

3. RESULTADOS

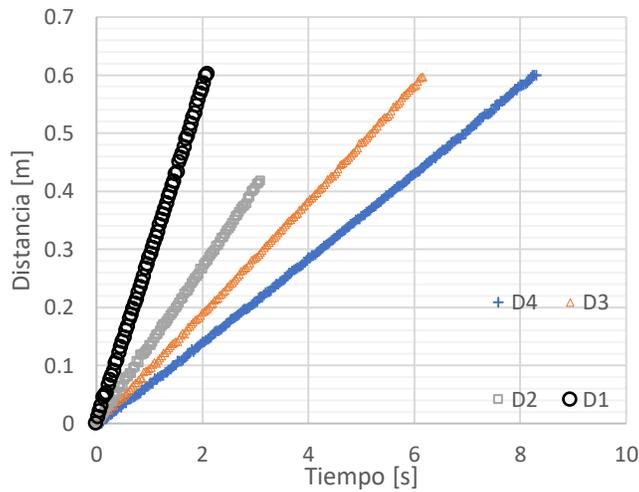
Las Figura 4a, Figura 4b y Figura 4c presentan las curvas de posición en función del tiempo obtenidas a partir de los tres perfiles para los ensayos realizados con el cubo, la pirámide y el dodecaedro a diferentes velocidades del riel (0,2904, 0,1469, 0,0981 y 0,0737 m/s) respectivamente. Para obtener las curvas de posición en función del tiempo, se analizaron los datos de profundidad capturados por la cámara D455 en la zona donde se desplazaban los objetos. Para cada una de estas curvas se les realizó un ajuste lineal mediante mínimos cuadrados obteniendo la velocidad promedio mostrada en la Tabla 3.



(a)



(b)



(c)

Figura 4. Curva de la posición del elemento en función del tiempo. (a) Cubo. (b) Pirámide. (c) Dodecaedro.

En la Tabla 3 se resumen las velocidades obtenidas a partir del análisis de los datos de la cámara D455 para los ensayos con el cubo, pirámide y dodecaedro contrastándolas con las velocidades reales impuestas por el riel. El error se asoció a la diferencia relativa porcentual de velocidades y se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$Diferencia [\%] = \frac{V_{intel} - V_{real}}{V_{real}} \times 100 \quad (1)$$

Donde la V_{intel} es el valor obtenido a partir de la pendiente de la curva de posición v/s tiempo de los datos de la cámara D455, y la V_{real} es el valor de velocidad configurado en el servomotor del riel.

Tabla 3. Resultados de las velocidades medias obtenidas mediante ajuste lineal a las curvas de la Figura 4.

Ensayo	Velocidad [m/s]		
	Intel	Real	Diferencia [%]
C1	0,286	0,290	1,5%
C2	0,145	0,147	1,6%
C3	0,098	0,098	0,5%
C4	0,073	0,074	0,9%
P1	0,266	0,290	8,4%
P2	0,135	0,147	8,1%
P3	0,092	0,098	6,0%
P4	0,067	0,074	9,3%
D1	0,288	0,290	0,8%
D2	0,145	0,147	0,9%
D3	0,097	0,098	1,2%
D4	0,073	0,074	1,1%

4. ANALISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados resumidos en la Tabla 3, se observa que la cámara Intel RealSense D455 es capaz de realizar un seguimiento preciso de los objetos en movimiento y determinar su velocidad con buena precisión para los casos del cubo (ensayos C) y el dodecaedro (ensayos D). En estos ensayos, las diferencias porcentuales entre las velocidades medidas por la cámara y las velocidades reales impuestas por el riel son inferiores al 1,6% para todas las velocidades evaluadas.

Sin embargo, en el caso de la pirámide (ensayos P) se aprecia una mayor discrepancia, con diferencias de hasta un 9,3% respecto al valor real. Esta mayor desviación se atribuye principalmente a las características geométricas de la pirámide, que dificultan la correcta detección del vértice utilizado para el seguimiento. A medida que la pirámide se desplaza,

las caras laterales inclinadas pueden generar reflejos o sombras que afectan la definición del vértice en el mapa de profundidad, introduciendo errores en la estimación de la posición.

Otro factor que podría incidir en la menor precisión para el caso de la pirámide es la pendiente de sus caras laterales. Cuando la pirámide se encuentra en ciertas orientaciones, las caras pueden generar reflexiones especulares del patrón de puntos infrarrojo proyectado por la cámara, lo que perturba la triangulación estéreo y la estimación de profundidad.

5. APLICACIÓN

Ahora, para llevar la detección de objetos al área de la experimentación hidráulica, se probó la detección de la superficie libre de un pulso aluvional utilizando la cámara Intel RealSense D455. Para ello, se habilitó una instalación experimental en el INH (Instituto de Hidráulica), consistente en un canal cuyas dimensiones son: 4,6 metros de largo divididos en tres partes - 2,2 metros para el desarrollo del pulso aluvional, 2,0 metros con lecho móvil para medir la erosión y 0,4 metros de lecho fijo. El ancho es de 0,2 metros y la altura de 0,3 metros. Se instaló la cámara Intel RealSense D455 a 1 metro de altura, centrada en la zona del lecho móvil. En la Figura 5 se aprecia una imagen captada por la cámara. Se aplicó el mismo algoritmo para detectar el frente mediante el campo de alturas que proporciona la D455.

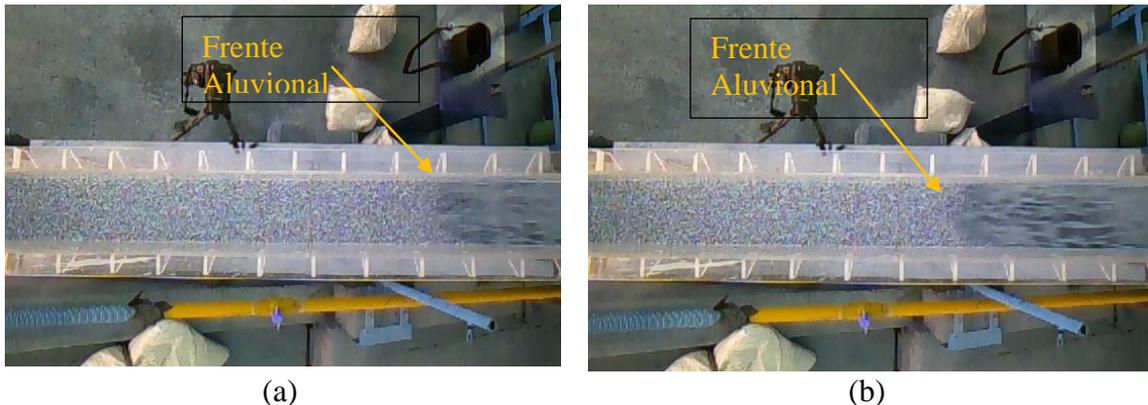


Figura 5. Fotografías obtenidas mediante la cámara D455. La dirección del flujo es de derecha a izquierda. (a) Frente aluvional en $t=0,168$ s. (b) Frente aluvional en $t=0,247$ s.

El resultado de este algoritmo en diferentes tiempos se puede observar en las Figuras 6a y 6b. En la imagen superior, se caracteriza el campo de altura del frente aluvional con los 3 perfiles longitudinales de la imagen mostrada en las Figuras 5a y 5b, respectivamente. En la imagen inferior, se muestra el promedio de los 3 perfiles longitudinales, junto con la identificación del frente simbolizado con un punto rojo. Al igual que en los casos de los objetos detallados anteriormente, se registró el avance de este punto rojo en función del tiempo, como se detalla en la Figura 7. Se observó un avance lineal, a partir del cual se pudo obtener su pendiente y, con ello, la velocidad media a la que se movía el frente.

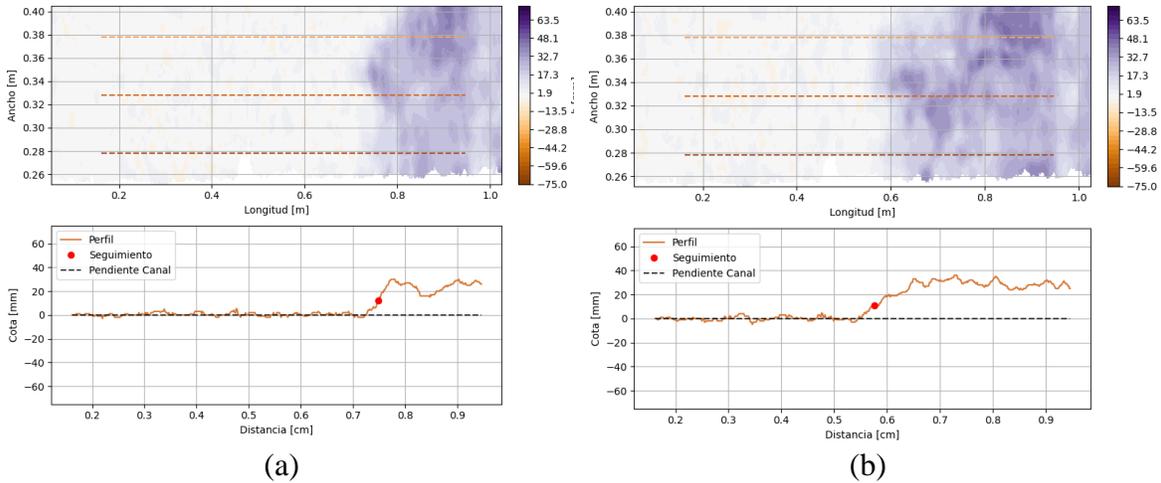


Figura 6. La imagen superior corresponde al mapa de profundidad del pulso aluvional obtenido mediante la cámara D455 y el gráfico inferior al perfil longitudinal promedio.
 (a) Frente aluvional en $t=0,168$ s. (b) Frente aluvional en $t=0,247$ s.

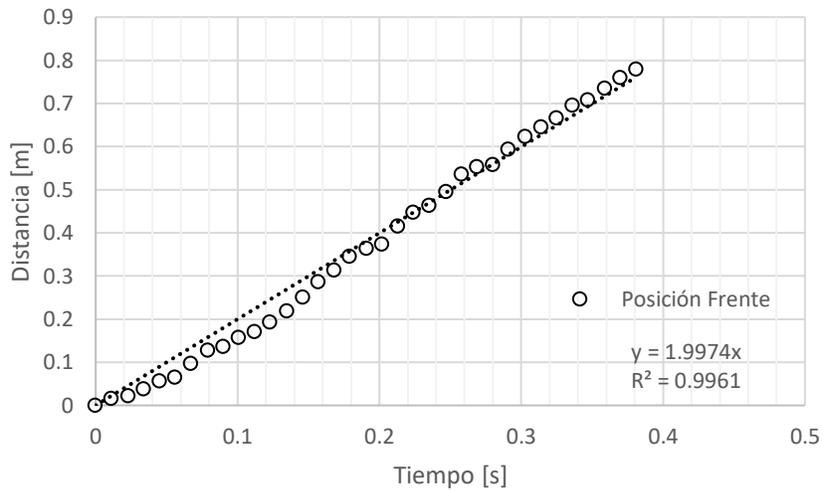


Figura 7: Curva de la posición del frente en función del tiempo para el frente aluvional.

6. CONCLUSIONES

Este estudio demostró el gran potencial de la tecnología RGB-D, y específicamente de la cámara Intel RealSense D455, para el seguimiento de objetos en movimiento y la medición precisa de velocidades en experimentos hidráulicos. La capacidad de combinar datos de color con mapas de profundidad de alta resolución permitió capturar de manera robusta el desplazamiento de diferentes objetos con formas geométricas variadas.

Sin embargo, se identificaron ciertas limitaciones relacionadas con las características geométricas de los objetos rastreados. En el caso de la pirámide, las caras inclinadas

generaron reflejos especulares que perturbaron la estimación de profundidad, introduciendo errores de hasta un 9,3% en la medición de velocidad.

Para mejorar la precisión en casos similares, se podría optimizar la configuración del sistema, ajustando la iluminación y los ángulos de visión para minimizar los reflejos indeseados. Además, se podrían explorar técnicas de procesamiento de imágenes avanzadas para combinar con la detección de la profundidad y con ello mejorar la detección de vértices y bordes en objetos con geometrías complejas.

La aplicación de esta técnica en la detección del frente de un pulso aluvional demostró su versatilidad y potencial para el monitoreo de fenómenos hidráulicos dinámicos. El seguimiento del avance del frente a partir de los datos de altura permitió obtener su velocidad media, abriendo la posibilidad de explorar otras aplicaciones en el transporte de sedimentos, flujos torrenciales y procesos con patrones de movimiento complejos.

Finalmente, se puede mencionar cómo esta tecnología llega a complementar lo que es la detección de la superficie libre 2D en el tiempo para diferentes fenómenos en la experimentación hidráulica, ya que antes de esta técnica usualmente solo se podía detectar mediante sensores puntuales (lidar, ultrasónicos, etc.) o técnicas de iluminación de perturbación de superficie libre con la limitante de no tener velocidad en el flujo.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este artículo. También agradece al convenio entre el INH y la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile que permite al autor realizar los estudios para el Programa del Doctorado en Ingeniería Civil.

REFERENCIAS

- Bung, D.B., Crookston, B.M., & Valero, D. (2020). "Turbulent free-surface monitoring with an RGB-D sensor: the hydraulic jump case". *J. Hydraulic Res*, Vol. 59, No. 5, 779.
- Butkiewicz, T. (2014). Low-cost coastal mapping using Kinect v2 time-of-flight cameras. In *2014 Oceans-St. John's* (pp. 1-9). IEEE.
- Caviedes-Voullième, D., Morales-Hernández, M., López-Marijuan, I., & García-Navarro, P. (2014). Reconstruction of 2D riverbeds by appropriate interpolation of 1D cross-sectional information for flood simulation. *Environmental modelling & software*, 61, 206-228.
- Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Santarelli, C., Servi, M., Ucheddu, F., & Volpe, Y. (2019). Metrological and critical characterization of the intel D415 stereo depth camera. *Sensors*, 19(3), 489.
- Ettema, R. (2000). "Hydraulic modeling: concepts and practice". *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, No. 97.
- Frostick, L.E., McLelland, S.J., Mercer, T.G. (Eds.) (2011). *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation*. New York, CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Frostick, L. E., Thomas, R. E., Johnson, M. F., Rice, S. P., & McLelland, S. J. (Eds.). (2017). *Users Guide to Ecohydraulic Modelling and Experimentation: Experience of the*

- Ecohydraulic Research Team (PISCES) of the HYDRALAB Network*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Giancola, S., Valenti, M., Sala, R. (2018). *A Survey on 3D cameras: Metrological comparison of time-of-flight, structured-light and active stereoscopy technologies*. SpringerBriefs in Computer Science. Springer.
- Novak, P., Cabelka, J. (1981). *Models in Hydraulic Engineering: Physical Principles and Design Applications*. Pitman, London.
- Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayanan, R. (2010). *Hydraulic structures*. CRC Press, London.
- Rouse, H., Ince, S. (1957). *History of Hydraulics*. Iowa Institute of Hydraulic Research, Pub. No. 37. También fue publicado en 1963 por Dover, New York.
- Sukhodolov, A. N. (2015). Field-based research in fluvial hydraulics: potential, paradigms and challenges. *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), 1–19.
- Venditti, J. G., Church, M., Attard, M. E., & Haught, D. W. (2016). “Use of ADCPs for suspended sediment transport monitoring: An empirical approach”. *Water Resources Research*, 52, 2715–2736.
- Williams, R., Rennie, C., Brasington, J., Hicks, M., Vericat, D. (2015). "Hydraulic validation of two-dimensional simulations of braided river flow with spatially continuous aDcp data". *Water Resour. Res.*, Vol. 51, No. 7, pp. 5695-5716.

ACERCA DEL AUTOR

Jaime Cotroneo es Ingeniero Civil y Magister en Ciencias de la Ingeniería, mención Recursos Hídricos y Medio Ambiente de la Universidad de Chile. Actualmente es Candidato a Doctor en Ingeniería Civil en la misma casa de estudios. Durante los últimos 10 años se ha desarrollado como Ingeniero en el Instituto Nacional de Hidráulica, abarcando temáticas de modelación física y numérica en diversos ámbitos de la Hidráulica Fluvial y Transporte de Sedimentos.