

MEDICIÓN DE LA EVOLUCIÓN TEMPORAL DE UN CAUCE ALUVIAL EN CANALES DE LABORATORIO CON UN SENSOR DE MOVIMIENTO

MEASURING OF THE TEMPORAL EVOLUTION OF ALLUVIAL CHANNELS IN LABORATORY WITH A MOTION SENSOR

Bupo, Matías; Weber, Juan F.¹

Resumen

Desde el lanzamiento en el mercado de los sensores de movimiento se han desarrollado novedosas aplicaciones de uso en diversas ramas de la ciencia. En trabajos anteriores se ha utilizado este equipo para realizar relevamientos topográficos en un canal de laboratorio, obteniendo resultados comparables en calidad con los métodos tradicionales de medición y un considerable incremento en el volumen de información. Se plantea como objetivo del presente trabajo mostrar el desarrollo de un procedimiento para medir la evolución temporal de un cauce en un canal de laboratorio. La aplicación de esta técnica permite obtener modelos digitales de elevación (DEM) de un sector del canal a tiempo real, con una frecuencia de hasta 30 Hz y más de 76000 puntos. Lo novedoso de esta técnica es que los relevamientos no son intrusivos, y que la calidad de los resultados es similar a la obtenida cuando se miden superficies que no se encuentran sumergidas. Se mostrarán los resultados obtenidos de un experimento de 48 hs de duración, con frecuencia variable de muestro.

Palabras clave: XtionPro Live, medición a través del agua, canales aluviales, procesos evolutivos

Abstract

Since the advent of motion sensors, innovative applications for use in various branches of science have been developed. In previous work we have used this device to survey a laboratory channel, obtaining comparable results as traditional methods of measurement and a considerable increase in volume information. The objective of this study to show the development of a procedure to measure the time evolution of a erodible bed laboratory channel. The application of this technique allows us to obtain a digital elevation model (DEM) of a region of the channel in real time, with a frequency up to 30 Hz and more than 76000 points. The novelty of this technique is that the surveys are not intrusive, and the quality of the results is similar to that obtained when surfaces are not submerged. The results of an 48 hours experiment, variable sampling frequency are displayed.

Keywords: Xtionpro live, water measurement, alluvial channel, evolution process

1. INTRODUCCIÓN

Los instrumentos de medición de laboratorio, están basados mayormente en dispositivos y métodos eléctricos, mecánicos y ópticos, y en los últimos años se han sumado, con muy buenos resultados, instrumentos de base acústica y térmica (Novak, 2010). El avance tecnológico, el desarrollo de micro chips, transistores, lasers, las nuevas técnicas de procesamiento de imágenes y video, el uso de computadoras, etc, han llevado a que los procedimientos de medición sean cada vez más eficaces, con instrumentos más precisos y exactos.

Entre diversas variables que son deseables de medir en un experimento o modelo físico (ya sea cuando estos son representaciones a escala de algún prototipo o cuando simplemente se desea estudiar algún fenómeno físico), y particularmente

en los modelos fluviales a fondo móvil, la topografía de lecho es una de las más importantes y a partir de la cual se estudian diversos parámetros hidráulicos y morfológicos. Las técnicas para realizar relevamientos en modelos físicos han ido evolucionando desde la utilización de cinta, nivel óptico y teodolito (Vergara Sanchez, 1995), a el uso de estación total, GPS, y más actualmente técnicas de mapeo tridimensional a través de instrumentos como Hokuyo UXM-30 LN lasser scanner (Hokuyo, 2009) y la Mesa Imaging SwissRanger SR400 depth camera (R400, 2011). Las técnicas e instrumentos mencionados son aplicables cuando el modelo se encuentra drenado. Es de particular interés en los experimentos fluviales a lecho móvil la medición de los procesos evolutivos del fondo, lo que conduce

¹ Laboratorio de Hidráulica, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. mbupo@civil.frc.utn.edu.ar -jweber@civil.frc.utn.edu.ar, <http://www.frc.utn.edu.ar>

a realizar mediciones a través de un flujo de agua. Antiguamente, al igual que en la actualidad, uno de los métodos más utilizados para este tipo de tareas es la intrusión de algún elemento graduado (tipo regla) hasta hacer contacto con el lecho (Novak, op cit). Evidentemente esto genera una perturbación en los patrones de flujo, lo que podría generar un proceso de erosión local, y que dada la no linealidad de los procesos fluviales, podría modificar la evolución esperada del experimento.

Otra alternativa, para evitar los inconvenientes mencionados, es la de drenar el equipo experimental en el instante de tiempo donde se pretende relevar la topografía del lecho. Una vez realizadas las mediciones, se vuelve al caudal de ensayo y se repite el procedimiento en otro instante de tiempo (Pilán 2003). Si bien esta metodología sería de carácter no intrusivo, el flujo inestacionario que se genera al drenar y volver al régimen de ensayo, tampoco asegura la esperada evolución del experimento.

Una técnica no intrusiva es la propuesta por Wells et al (2013), donde a través del análisis de imágenes es posible obtener la evolución temporal del ancho superficial de un canal en laboratorio, la desventaja de este procedimiento es que no entrega información de la batimetría del cauce.

Actualmente no se conocen técnicas que permitan medir topografías en canales de laboratorio que sean no intrusivas, o al menos no a un costo razonable. Mankoff y Russo (2012) han visto que es posible medir a través del agua con un sensor de movimiento, y en su trabajo sugieren que sería posible realizar mediciones de calidad previa corrección de los resultados obtenidos. En vista de estos resultados es que se decide estudiar a los sensores de movimiento como potencial herramienta para realizar mediciones evolutivas en canales aluviales de laboratorio a través del agua.

Los sensores de movimiento son así denominados debido al origen de su desarrollo, la interacción natural en videos juegos (seguimiento y detección del cuerpo a través del análisis de imágenes RGB y de profundidad). Los dos equipos comercialmente más divulgados son el sensor Microsoft Kinect, lanzado al mercado en el año 2010 y la XtionPro Live de ASUS presentada un año más tarde. Si bien estos equipos son comercializados por dos empresas distintas, el hardware de ambos dispositivos es el mismo, y fue desarrollado por la compañía israelí PrimeSense Ltd (PrimeSense 2011). Estos sensores han capturado la atención de investigadores en diversos campos de la ciencia. Trabajos como los publicados por Andrew (2010), Chang (2011), Stowers (2011), Herbst (2011), Menna (2011), entre otros, son claros ejemplos de lo mencionado, y se encuentran entre los primeros desarrollos de aplicación de los sensores de movimiento.

Estos equipos son capaces de obtener imágenes de profundidad y de color (RGB) simultáneamente, con

una velocidad de captura de hasta 30 fps, con más de 300.000 puntos cada una de ellas. Los inventores (Freedman et al, 2010) describen la medición de la profundidad como un proceso de triangulación.

Los primeros en introducir los sensores de movimiento al estudio de la Ciencia de La Tierra, fueron Mankoff y Russo (2012) en donde presentan una serie de experimentos aplicados en el estudio de glaciares, mediciones batimétricas de corrientes naturales y geomorfología de un lecho de arena.

Dalla Mura (2012) presenta resultados preliminares en la utilización de la Microsoft Kinect aplicada a la geomorfología fluvial. El autor utiliza la información RGB y de profundidad (previamente calibradas) para la determinación de los tamaños de sedimentos y curvas granulométricas en cauces aluviales. Hammerle et al (2014) comparó las mediciones realizadas con un sensor de movimiento y un scanner laser terrestre (tecnología LIDAR) en una caverna ubicada en Alemania. Finalmente el último artículo consultado referente a la aplicación de los sensores de movimiento a la Geociencia es el publicado por Rincón et al (2015) donde utilizan el instrumento para la detección de deformaciones en modelos morfo-estructurales de volcanes.

Tal como se observa en la literatura consultada, la utilización de sensores de profundidad en investigaciones referidas a las ciencias de la tierra, ha ido tomado relevancia, y en base a los resultados obtenidos por otros autores, es posible decir que los mismos tienen un gran potencial para este tipo de aplicaciones dado su bajo costo, alta resolución 3D, velocidad de captura y facilidad de transporte, y calidad de la información recolectada.

En el presente trabajo se plantea como objetivo, exponer una novedosa técnica que permite realizar relevamientos topográficos de un cauce aluvial en un canal de laboratorio, la cual permite obtener información de la batimetría del cauce a tiempo real.

Se describirá en forma detallada el procedimiento, las consideraciones y finalmente los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica en un experimento de 48 hs. de duración.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El sensor de movimiento utilizado en este trabajo se conoce comercialmente como XtionPro Live de ASUS el cual fue montado sobre una base nivelante con el objetivo de lograr una perfecta horizontalidad del equipo. A su vez todo esto se encuentra sobre un carro capaz de deslizarse en toda la superficie del canal a fondo móvil del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional (Weber y Bupo 2013). Para la obtención y procesamiento de datos se utilizó la librería OpenCv para Python, en la cual se obtiene información de profundidad e imágenes RGB e infrarrojas. A partir de los valores de profundidad

(Zk), se obtienen las coordenadas planimétricas x e y (Khoshelham y Elberink 2012).

En vista de las potencialidades del sensor de movimiento, y de la capacidad de realizar mediciones a través del agua (Bupo y Weber 2015a), se realizaron mediciones controladas en un recipiente de una superficie plana horizontal, y para diferentes niveles de agua, equivalentes a las profundidades habitualmente utilizadas en el canal a fondo móvil.

Se realizaron mediciones con 25, 50, 100, 150, 200 y 250 mm de profundidad. En la Figura 1 se presentan a modo de ejemplo las mediciones de la superficie sin agua (de control), con 25 y 50 mm. En todos los casos ensayados se logró medir la superficie, y tal como se observa en la gráfica anterior, las mediciones sufren una distorsión que varía en función de la profundidad del flujo.

Dicha distorsión es equivalente a decir que la medición se realiza sobre un fondo aparente con lo que se infiere que también existe una profundidad de agua aparente llamada h_p (Figura 2). Para poder calibrar las mediciones que se realizan bajo el agua es necesario determinar una ecuación que ajuste el error sistemático que se genera.

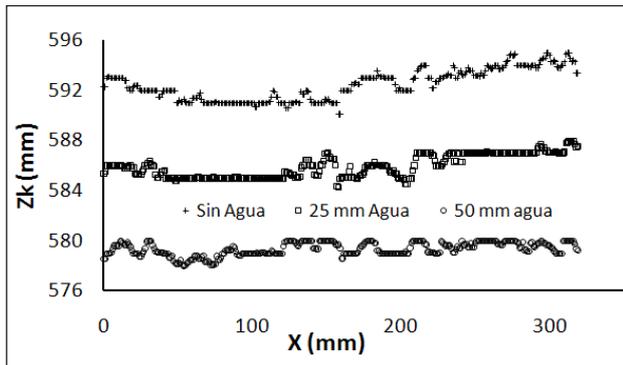


Figura 1.- Mediciones de una superficie plana horizontal con diferentes niveles de profundidad de agua

Llamando (Figura 2) Z_k a la medición de referencia (medición sin agua), Z_w a la medición con una determinada profundidad de agua, h a la profundidad del fluido y P a la distancia entre el plano del medición de la cámara infrarroja al pelo de agua, es posible determinar el error (e) de la siguiente manera:

Debido a que Z_w es función de la profundidad h , se realizaron mediciones sobre el mismo mensurando (superficie plana horizontal) con diferentes niveles de agua, y a partir de estos resultados se ajustó una curva que representa la variación del error en función de la profundidad (Figura 3).

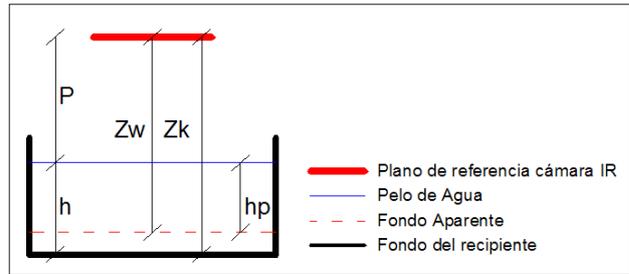


Figura 2.- Definición de las variables que intervienen en las mediciones a través del agua

También se determinó la relación que existe entre la profundidad real h y la aparente h_p (Figura 4), a partir de la cual se infiere en que es posible determinar un ajuste entre esta última profundidad y el error generado. De esta manera, conocido el valor de P , es posible independizarse de la superficie plana horizontal y calibrar mediciones realizadas en donde no se conoce la profundidad del flujo, situación que se ve reflejada cuando se pretende medir la evolución temporal del cauce.

Las mediciones en el recipiente prismático se realizaron a través de agua filtrada, situación que no se ve reflejada en el canal a fondo móvil. Por esta razón es que se decidió evaluar la capacidad de medición del equipo a través de agua con diferentes niveles de concentración de arcilla (indicador del nivel de turbidez) y profundidades.

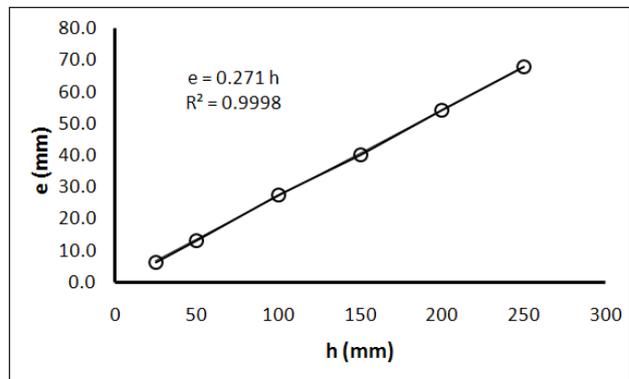


Figura 3.- Variación del error e en función de la profundidad de agua

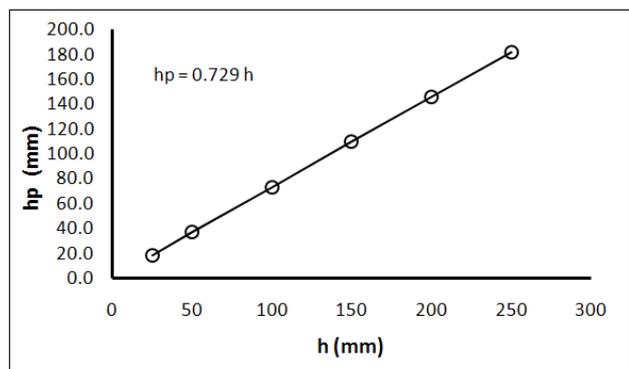


Figura 4.- Relación entre h y h_p

Para determinar el dominio de medición indicador de turbidez – profundidad del fluido, se establece un procedimiento, el cual se detalla a continuación:

- se llena el recipiente hasta una profundidad de agua conocida y se calcula el volumen.
- se coloca una cantidad conocida (en peso) de arcilla al volumen de agua conocido.
- se agita el agua con el objeto de que la distribución espacial de la concentración dentro del recipiente sea uniforme.
- se procede a realizar la medición
- se repiten los pasos b a d, hasta alcanzar una concentración a partir de la cual el sensor deja de registrar debido a la pérdida de señal.
- se aumenta la profundidad del flujo y se repiten los pasos a a e.

En el desarrollo de este procedimiento se detecta un inconveniente debido a que la turbidez del agua varía con el tiempo producto de la decantación de las partículas de arcilla. Para salvar este inconveniente se desarrolló una técnica que permite evaluar el tiempo a partir del cual la turbidez del agua se mantiene constante.

La técnica consiste en el análisis de imágenes y tiene como objetivo verificar la repetitividad del ensayo. Se coloca una caja dentro de la cual se diseña un sistema capaz de mantener constante la intensidad de luz (Figura 5) y dentro de ella se coloca un frasco con una concentración conocida de arcilla. Una vez el frasco dentro de la caja con intensidad de iluminación constante se procede a tomar fotografías cada 30 segundos durante un período de 15 minutos aproximadamente.

Se realizaron ensayos para concentraciones de 0.8, 2, 4 y 8 gr/l, en donde para cada una de ellas se tomaron 28 fotografías. La hipótesis del análisis es que al mantenerse constante el color del agua, la turbidez también lo hace.



Figura 5.- Fotografía tomada en $t = 0$ a la izquierda y en $t = 840$ seg a la derecha

En la Figura 6 se observa la variación de la intensidad de color de la imagen en función del tiempo, y puede apreciarse que a partir de los 500 segundos, este valor permanece relativamente constante.

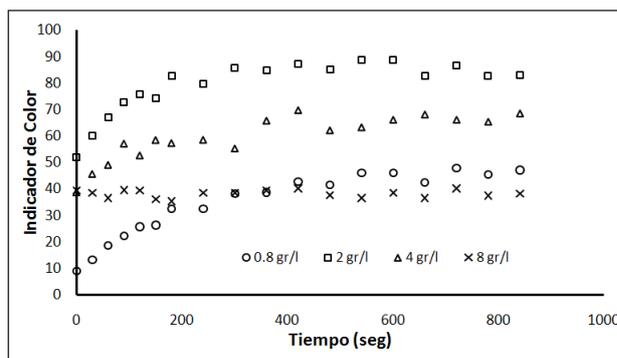


Figura 6.- Variación de la intensidad de color en función del tiempo (ensayo 1)

En base a los resultados obtenidos en estos ensayos, se infiere la necesidad de agregar un paso al procedimiento, el cual consiste en dejar transcurrir un periodo de 500 segundos para que la turbidez se mantenga constante y el ensayo sea repetible. En la Figura 7 se observa la variación de la intensidad de color en función del tiempo para una determinada concentración en dos ensayos diferentes. Este comportamiento se observa para todas las concentraciones estudiadas, concluyendo en que el experimento es repetible.

Una vez definido el intervalo de tiempo anteriormente descrito se procede a medir dentro del recipiente. Aquí se define una profundidad de flujo (25 mm por ejemplo) y se mide primero con agua filtrada (patrón), luego con una concentración de 0.04 gr/l, 0.06 gr/l, etc, hasta que finalmente se pierde la señal y no es posible seguir midiendo. Se comparan los resultados obtenidos para cada una de las concentraciones y se evalúa la calidad de la medición.

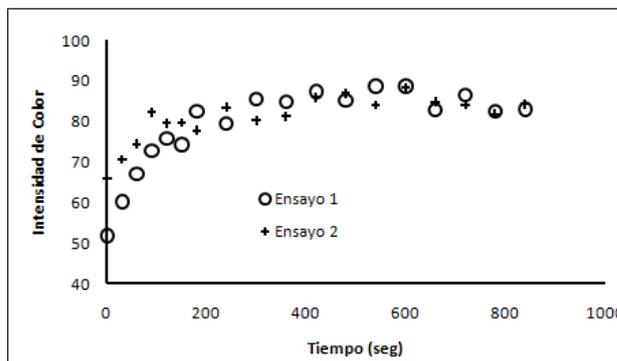


Figura 7.- Comparación de los valores obtenidos en los dos ensayos para la misma concentración de arcilla

En la Figura 8 se observa la variación del valor medio de Z_k en función de la concentración de arcilla para una profundidad de 25 mm. Tal como se esperaba, luego de un determinado valor de concentración (1.6 gr/l) la señal se pierde y el valor medido es erróneo.

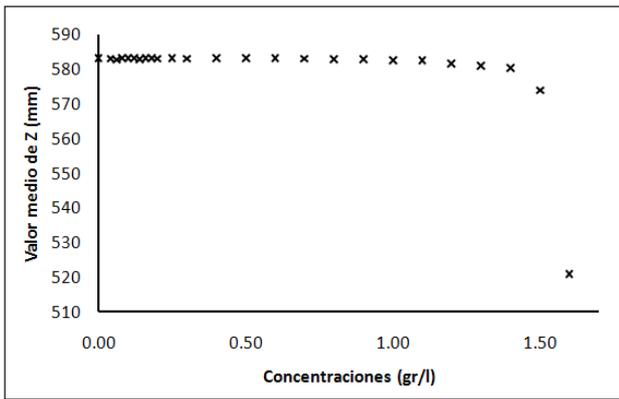


Figura 8.- Variación del valor medio de la profundidad en función de la concentración de arcilla

Lo mismo se repitió para diferentes profundidades, y en todos los casos se estableció el valor límite a partir del cual el instrumento deja de medir. Se realizaron 80 ensayos, en donde finalmente lo que se logró es definir el dominio de combinaciones profundidad – concentración a partir del cual el sensor de movimiento logra medir (Figura 9).

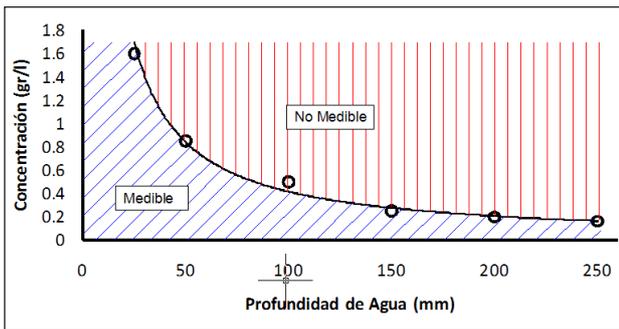


Figura 9.- Combinaciones límites de profundidad – concentración a partir de las cuales el sensor deja de medir

3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Para realizar las mediciones a tiempo real es necesario poder realizar capturas cada un intervalo de tiempo determinado durante toda la duración del ensayo. Para ello se escribió un código en Python que permite capturar la profundidad, imágenes infrarrojas (IR) e imágenes RGB, con una frecuencia prefijada por el laboratorista (Figura 10). Como se demostró anteriormente, los valores de Z_w deben ser corregidos debido a la distorsión que se genera al medir a través del agua. Debido a que en los ensayos realizados en canales a fondo móvil no es conocida la profundidad del flujo, el valor de Z_w debe ser corregido a través de la siguiente expresión (Figura 2):

El valor de Z_w es conocido, y para determinar el valor de h_p , basta con conocer P , el cual no es más que el valor de profundidad correspondiente a

la intersección del pelo del agua con el borde del canal (supuesta una superficie libre plana), cuyas coordenadas planimétricas pueden determinarse a través del análisis de las imágenes infrarroja y RGB. Determinado P , se calcula h_p (ecuación 3) y con la relación de la Figura 4 se infiere el valor de h , calculando el valor de la profundidad real Z_k a través de la ecuación 2.

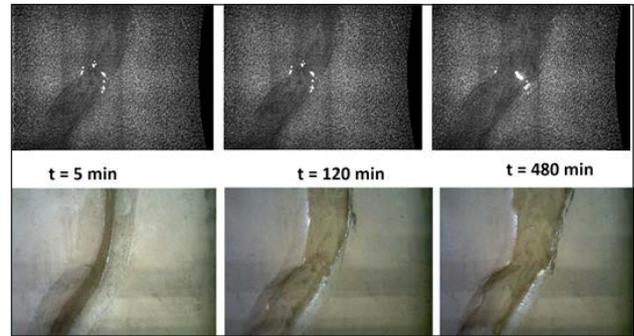


Figura 10.- Arriba imágenes capturadas con la cámara infrarroja, abajo con la cámara rgb

Dado que la cámara infrarroja (en conjunto con el emisor infrarrojo) es la que se utiliza para determinar la disparidad y a partir de allí los valores de profundidad (Freedman et al, 2010), el MDE se corresponde pixel a pixel con la imagen. Conforme a lo mencionado, es posible inferir el valor de P , determinando las coordenadas $i-j$ de la IR correspondientes a la intersección del pelo de agua con el canal. El inconveniente que esto presenta, es que la IR no es lo suficientemente clara por lo que podría generarse un error en la determinación de mencionadas coordenadas, y por lo tanto en el valor de P . Para solucionar el problema mencionado se utilizará la imagen RGB, en la cual es posible hacer una detección más precisa. La utilización de esta información genera un nuevo inconveniente, ya que las cámaras RGB e IR se encuentran separadas por aproximadamente 2.5 cm, razón por la cual los píxeles no se corresponden.

Para salvar esta diferencia, lo que se debe realizar es una transformación geométrica en la imagen RGB, y de esta forma lograr correspondencia pixel a pixel con la IR, y por ende con el MDE. Para lograr la transformación mencionada, es necesario generar una matriz de traslación y otra de rotación, de manera que aplicada a la imagen RGB, genere una nueva que se corresponda con la IR. Conociendo las coordenadas de 4 puntos que se correspondan en las dos imágenes es posible generar las matrices mencionadas (Figura 11).

Se escribió un código en Python que permite realizar esta transformación en forma automática, y a su vez, en forma interactiva es posible determinar los puntos correspondientes al borde del pelo de agua (Figura 12). El programa entrega como salida una imagen

RGB rectificada y una lista donde se encuentran las coordenadas $i-j$ de los puntos que se definieron (P_{ij}) para determinar el valor de P .

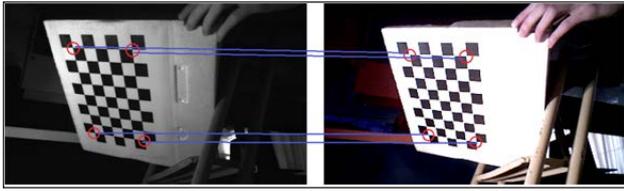


Figura 11.- Transformación geométrica. A la izquierda imagen IR en escala de grises, a la derecha la RGB.

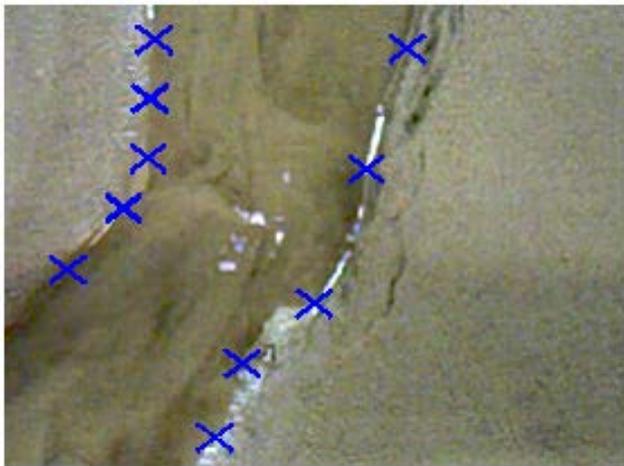


Figura 12.- Imagen RGB rectificada con los puntos para determinar P

En el presente trabajo se determinaron 10 P_{ij} por cada imagen. Con estas coordenadas y la correspondencia existente con el MDE, se buscan los valores de Z_k de la intersección del pelo de agua con el borde del canal (para esta situación Z_k es igual a P), y asumiendo que esta superficie es plana (lo cual es válido en el dominio de trabajo), se ajusta un plano por regresión lineal múltiple, que modela la superficie del cuerpo de agua (Figura 13).

Cabe mencionar que la determinación de los 10 puntos en forma interactiva, para realizar el ajuste del plano que modela el cuerpo de agua, demandó para las 152 imágenes un tiempo de 45 minutos aproximadamente.

De esta manera, lo que hasta aquí era un valor P , ahora se transforma en un plano. Si a cada celda $i-j$ del MDE se le resta el valor correspondiente de P_{ij} , tres resultados son posibles, el primero es que el valor sea negativo, lo que indica que esa celda no se encuentra sumergida, por lo que el valor de Z_w es igual a Z_k ; que esa diferencia sea igual a cero, en cuyo caso es la intersección del pelo de agua con el borde y el valor no debe ser corregido; y finalmente que el valor sea positivo, en tal caso el punto se encuentra sumergido y se debe corregir aplicando las ecuaciones 2, 3 y el gráfico de la Figura 4.

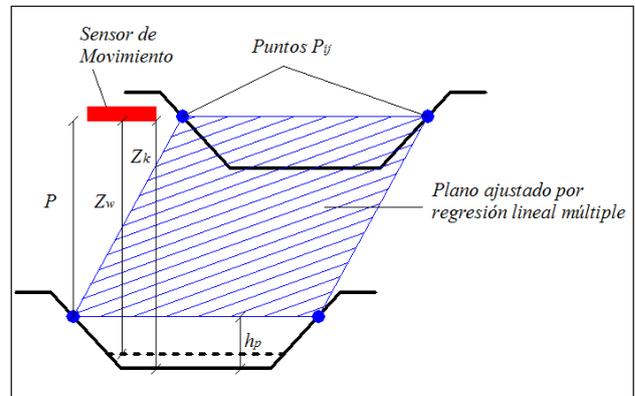


Figura 13.- Modelo de un plano que representa la superficie del cuerpo de agua

4. RESULTADOS: APLICACIÓN A UN MODELO FÍSICO

Se mostrarán los resultados obtenidos producto de la aplicación de la técnica en un ensayo de 40 hs de duración, donde la geometría inicial trazada es la que se observa en la Figura 14, con un caudal de 0.15 l/s y una pendiente de 0.6 %.

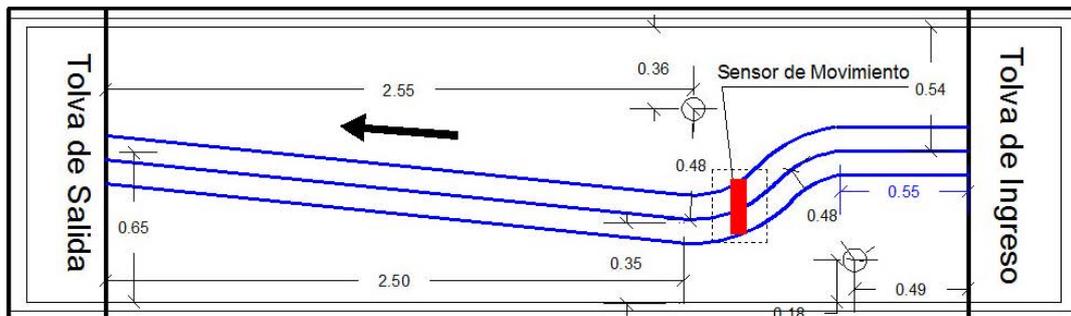


Figura 14.- Geometría de la sección inicial ensayada, las dimensiones se encuentran en metros. En línea de trazo el sector de captura

El sensor de movimiento se ubicó en la zona donde se trazó la curva (Figura 14) y se capturaron más de 1500 imágenes RGB, IR y MDE, ya que cada imagen resultante se conforma como promedio de 10. Durante la primer hora, las capturas se realizaron cada 5 minutos, en las siguientes 5 horas, cada 10 minutos y de ahí en más cada 20 minutos. De esta manera se logró obtener una historia evolutiva del MDE. En la Figura 15, se graficó la variación temporal de la coordenada Zk de tres puntos, y en la misma es posible observar que luego de los 1500 minutos (40 hs aprox.) los valores se mantienen relativamente constantes, lo que sería un indicativo de que se ha llegado a un equilibrio hidrosedimentológico.

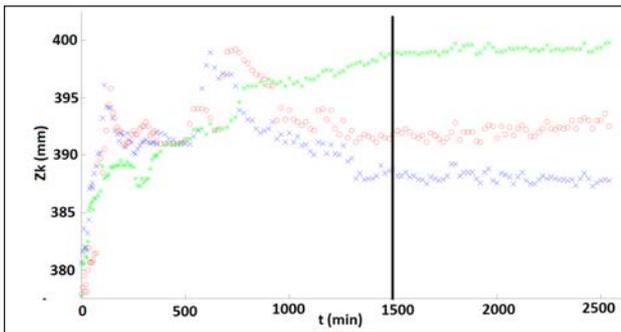


Figura 15.- Evolución temporal de la coordenada Zk, de tres puntos que se encuentran dentro del canal

En la Figura 16 se observa la evolución del MDE para $t = 5 \text{ min.}$, $t = 6 \text{ hs}$ y $t = 40 \text{ hs}$. En cada una de las gráficas se ha trazado las curvas hipsométricas de la topografía relevada con la técnica propuesta.

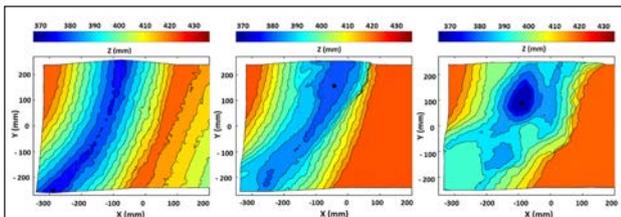


Figura 16.- En la columna de la izquierda, la imagen RGB y los perfiles señalados a los 5 minutos de ensayo, en la central a las 6 hs y a la derecha a las 40 hs. En todos los casos los puntos azules son sin corregir y los rojos corregidos

En la Figura 17, se muestran las curvas de nivel correspondientes de la batimetría relevada a 6 hs de comenzado el ensayo. En la columna de la izquierda, el MDE producto de las mediciones sin corregir, en la central el corregido, y a la derecha se encuentran las isocurvas de las correcciones realizadas. Como era de esperar, en las zonas donde se producen las hoyas de erosión las correcciones alcanzan los máximos valores, de hasta 8 mm, para una profundidad de flujo de 30 mm aproximadamente.

En todos los casos, y según la pendiente de las rectas de la Figura 3, el error es el 27.1 % de la profundidad del flujo

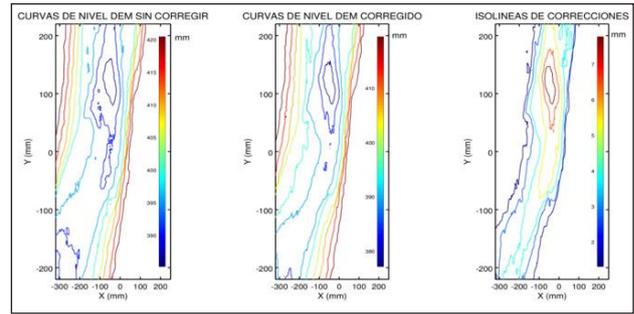


Figura 17.- Valores medidos a las 6 hs y de ensayo

5. DISCUSIÓN

En las mediciones que se realizaron a tiempo real, es posible definir dos conjuntos de puntos, el primero compuesto por todos aquellos pixeles que no fueron corregidos (que no se encuentran bajo el agua) y el segundo por aquellos sumergidos.

Asumiendo la hipótesis de que se alcanzó el equilibrio hidrosedimentológico, es posible realizar una medición mientras fluye agua en el canal, drenarlo, volver a medir (ahora sin agua) y comparar los resultados.

En trabajos anteriores, se evaluó la calidad de las mediciones (Bupo y Weber 2015b), realizando un análisis estadístico detallado sobre los datos obtenidos en mediciones realizadas sobre una superficie de control (superficie plana horizontal). En aquel trabajo, se determinó que en mas del 80% de los puntos relevados el error de medición se encontraba por debajo de 1 mm. Con los resultados del trabajo mencionado, se calculó la curva de frecuencias acumuladas del valor absoluto del error relativo (ecuación 4), con lo que se logró describir el comportamiento del mismo en las mediciones de control o referencia (superficie plana horizontal)

Donde:

Z_r : es el valor de referencia

Z_k : valor medido

Lo mismo se realizó para los dos conjuntos de puntos definidos anteriormente, con la salvedad que aquí el valor de referencia es el medido cuando se ha drenado el canal.

En la Figura 18, se observan las tres gráficas de frecuencias acumuladas. En la misma se puede observar que el comportamiento del error relativo es muy similar en el caso de las mediciones sobre la superficie de referencia y en arena seca, y que existe una diferencia en aquellos puntos que se midieron bajo el agua y posteriormente fueron corregidos.

Asimismo se aprecia que en todos los casos el 80 % de los puntos se encuentran por debajo de un 0.4 % de error relativo. Cabe destacar que el 0.4 % de error relativo se corresponde en las mediciones corregidas a un error absoluto de 1.5 mm aproximadamente.

En la Figura 19 se observa una grafica de correlación en donde se representan los valores de Z_k medidos vs los valores de Z_w corregidos forzada a pasar por cero. Tal como se observa, la pendiente de la recta es prácticamente 1.0, y el R^2 es de 0.97 redondeado a la segunda cifra decimal.

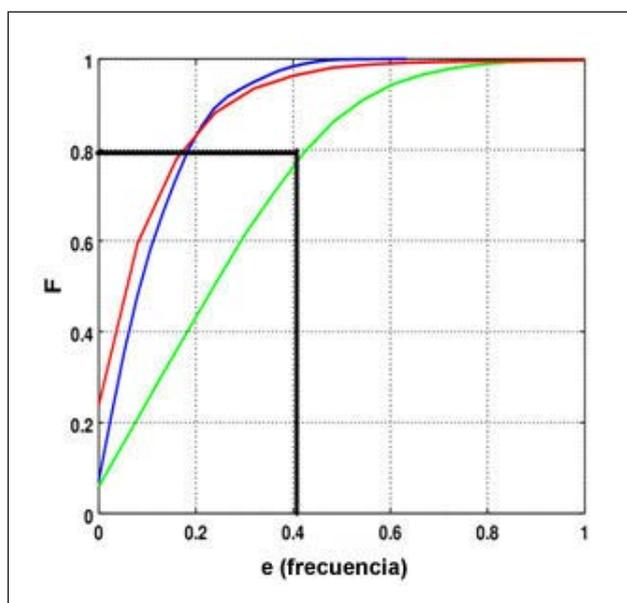


Figura 18.- Curva de frecuencias acumuladas del error relativo para una superficie plana horizontal en azul, para las mediciones realizadas sobre arena seca en rojo y en verde la correspondiente a los puntos que fueron corregidos

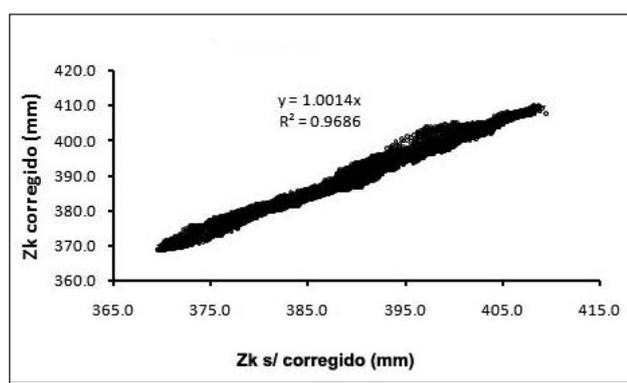


Figura 19.- Grafica de correlación

6. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió en detalle la capacidad de medir a través del agua que poseen los sensores de movimiento. En base a los resultados satisfactorios obtenidos, se desarrolló una novedosa técnica que permite realizar mediciones a tiempo

real de la evolución temporal de un cauce aluvial en canales de laboratorio.

Este procedimiento permite obtener modelos digitales de elevación con una alta resolución temporal (capturas cada 1 segundo aproximadamente) durante el tiempo que el laboratorista defina. Cada MDE obtenido contiene más de 76000 puntos, lo que permite realizar estudios detallados de diferentes parámetros de interés en la hidráulica fluvial.

La gran ventaja de esta técnica, es el hecho de no ser intrusiva, característica que, según el estado actual del conocimiento, no se ha logrado hasta el momento, o no al menos con los costos aquí planteados (US\$ 250 aproximadamente).

Los MDE así obtenidos pueden ser el dato geométrico de entrada a modelos numéricos 1D, 2D o 3D, lo que permitiría realizar simulaciones y comparar resultados, todo sin interrumpir el experimento.

La aplicación del procedimiento planteado en canales de laboratorio, permite realizar estudios evolutivos de diferentes parámetros, tales como la pendiente general del cauce, el ancho superficial, la variación de profundidad de un sector, determinar volúmenes de sedimento erosionado o depositado, migración de márgenes, etc.

Por último, se concluye que la calidad de los resultados obtenidos es muy satisfactoria, siendo el comportamiento del error relativo de las mediciones bajo el agua del mismo orden de magnitud que para la superficie de referencia propuesta y compatible con la calidad requerida en estudios de hidráulica fluvial en laboratorio.

BIBLIOGRAFÍA

Andrew, D.W. 2010. Using a depth camera as a touch sensor. Proceedings of the ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces, Saarbrücken, Germany, 7–10.

Bradski, G., & Kaehler, A. 2008. *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library*. O'Reilly Media, Inc.

Bupo, M., Weber, J. F., 2015 a. "Avances en el desarrollo de una técnica para medir la evolución del lecho en canales de laboratorio con un sensor de movimiento" *XXV Congreso Nacional del Agua*. XXV CONAGUA, Paraná, 15 al 19 de Junio.

Bupo M., Weber J.F., 2015 b. "Metodología para la medición de Microtopografías en canales de laboratorio con un sensor de movimiento", *IV Simposio de Métodos Experimentales en Hidráulica*, Buenos Aires, 18 al 20 de marzo 2015

Chang, Y. J., Chen, S. F., & Huang, J. D. 2011. A Kinect-based system for physical rehabilitation: A pilot study for young adults with motor disabilities. *Research in developmental disabilities*, 32(6), 2566-2570.

- Dalla Mura, M., Aravecchia, M., & Zanin, M. 2012. Outdoor 3D with Kinect: preliminary results in the granulometry of fluvial sediments. [Online]. Available: http://3dom.fbk.eu/files/lc3d/DallaMura_et_al_lowcost3d-2012-Trento.pdf. (última visita: 19-02-2014)
- Freedman, B., Shpunt, A., Machline, M., & Arieli, Y. 2010. U.S. Patent 2010/0118123. Depth Mapping Using Projected Patterns.
- Hammerle, M., Hofle, B., Fuchs, J., Schroder-Ritzrau, A., Vollweiler, N., & Frank, N. 2014. Comparison of kinect and terrestrial LiDAR capturing natural karst Cave 3-D objects. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 11(11), 1896-1900.
- Herbst, E., Henry, P., Ren, X., & Fox, D. 2011. Toward object discovery and modeling via 3-d scene comparison. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 2623-2629). IEEE.
- Hokuyo UXM-30LN Scanning Laser Rangefinder Datasheet, Hokuyo, 2009. [Online]. Available: http://www.hokuyo-aut.jp/02sensor/07scanner/uxm_30ln_p.html (ultima visita 24/02/2012).
- Khoshelham, K., & Elberink, S. O. 2012. "Accuracy and resolution of kinect depth data for indoor mapping applications". *Sensors*, 12(2), 1437-1454.
- Mankoff, K. D., & Russo, T.A. 2012. "The Kinect: a low-cost, high-resolution, short-range 3D camera." *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(9), 926-936.
- Menna, F., Remondino, F., Battisti, R., & Nocerino, E. 2011. Geometric investigation of a gaming active device. In *SPIE Optical Metrology* (pp. 80850G-80850G). International Society for Optics and Photonics.
- Novak, P., Guinot, V., Jeffrey, A., & Reeve, D. E. 2010. *Hydraulic Modelling—An Introduction: Principles, Methods and Applications*. CRC Press.
- Pilán, M. T., Azar, F. J. P., & Farias, H. D. 2003. "Estudio Experimental de la evolución y estabilidad de cauces fluviales con lecho de arena". *Memorias del Primer Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, RIOS 2003*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina, Noviembre de 2003. [ISBN N° 987-20109-2-7, Libro + CD-ROM].
- PrimeSense Ltd 2011. <http://www.primesense.com> (última visita 05/09/2014)
- Rincón, M., Márquez, Á., de Vries, B. V. W., Espada, R. H., Bruña, J. L. G., & Estrada, P. L. 2015. Aplicación del sensor Kinect en modelos análogos para la identificación morfo-estructural de procesos de deformación en volcanes. *Geogaceta*, (57), 107-110.
- R400 Datasheet Rev. 5.1, Mesa Imaging, 2011. [Online]. Available: http://www.mesa-imaging.ch/dlm.php?fname=pdf/SR4000_Data_Sheet.pdf (última visita febrero 2012)
- Stowers, J., Hayes, M., & Bainbridge-Smith, A. 2011, April. Altitude control of a quadrotor helicopter using depth map from Microsoft Kinect sensor. In *Mechatronics (ICM), 2011 IEEE International Conference on* (pp. 358-362). IEEE.
- Vergara Sanchez, M. (1995). *Técnicas de modelación en Hidráulica*. Ed. Alfaomega Grupo. México, D.F. ISBN 970-15-0114-4.
- Weber, J. F., Bupo, M. 2013. "Canal a Fondo Móvil de pendiente variable en el Laboratorio de Hidráulica." *UTN-FRC. III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, MEHIII*. FICH-UNL, Santa Fe, 20 al 22 de marzo.
- Wells, R. R., Momm, H. G., Rigby, J. R., Bennett, S. J., Bingner, R. L., & Dabney, S. M. 2013. "An empirical investigation of gully widening rates in upland concentrated flows." *Catena*, 101, 114-121.
- Xtion pro: <http://www.asus.com> (última visita 01/06/2013)