

Técnica Digital para Medición de Erosión en Modelos Físicos

Mariana Pagot¹, Emanuel Sánchez Aimar², Pablo Vaca¹, Nicolás Bellino¹, Nicolás Guillen¹, Gerardo Hillman¹ y Andrés Rodríguez¹

¹Laboratorio de Hidráulica, FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

²Facultad de Astronomía, Física y Matemática, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 26/12/2013

Fecha de aceptación del manuscrito: 19/05/2014

Fecha de publicación: 10/09/2014

Resumen—Se presenta una técnica digital experimental para medir la erosión en modelos físicos a escala reducida. Esta técnica permite generar en detalle mapeos tridimensionales de la superficie de interés, registrando las escenas resultantes de un ensayo hidráulico. En este trabajo se utilizó una cámara Kinect de Microsoft la cual genera una imagen óptica y otra imagen de profundidades. Los datos de profundidades medidos y sus ubicaciones, permiten reconstruir digitalmente la superficie erosionada con mayor resolución espacial respecto de la técnica utilizada tradicionalmente (que consiste en un relevamiento manual de puntos, utilizando un nivel óptico y una mira milimétrica). La técnica digital propuesta no modifica la condición del modelo, es una técnica no intrusiva. Esta técnica mejora significativamente la resolución y la cobertura espacial del área medida, mediante solapamiento de imágenes, además disminuye, en forma importante, el tiempo empleado en realizar la medición topobatómetrica de cada ensayo.

Palabras clave—Relevamiento digital, erosión, modelo físico, cámara, mapeo tridimensional.

Abstract—An experimental digital technique is presented to measure erosion in physical scale models. This technique allows generating detailed 3D mapping of the surface, resulting in recorded scenes of a hydraulic test. In this paper, a Microsoft Kinect camera was used. This camera allows generating an optical image and another image of depths. The data measured depths and their locations allow digitally reconstructing the surface with higher spatial resolution than the technique traditionally used (which is a manual survey of points, using an optical level and a millimeter scale). The proposed digital technique does not modify the condition of the model, it is a non-intrusive technique. This technique significantly improves the spatial resolution and density of points of the coverage area by overlap of images, and reduces the time spent in each topographic measurement.

Keywords—Digital survey, erosion, physical model, camera, three-dimensional mapping.

INTRODUCCIÓN

La medición de las erosiones en modelos físicos a fondo móvil y escala reducida se realiza tradicionalmente utilizando un nivel óptico y una mira milimétrica. Esta técnica consiste en el relevamiento manual de puntos, generalmente distribuidos sobre una grilla equidistante. Los aspectos negativos de esta metodología son: la forma de medición, en la cual es necesario apoyarse sobre la superficie a relevar para medir el dato de interés y el tiempo que demanda relevar en detalle el área en estudio, maximizándose dichos aspectos cuando la superficie es extensa y cuando la cantidad de ensayos hidrosedimentológicos son numerosos. La metodología tradicional, además de tener un carácter intrusivo, presenta errores intrínsecos generados por la intervención humana y restricciones relativas a los instrumentos de medición, estos errores pueden superar el centímetro. Algunas fuentes de error están relacionadas con la incorrecta verticalidad de la

mira, el apoyo de la mira sobre el modelo (lo que puede alterar la superficie a medir), errores en las lecturas y/o transcripción de las mismas, entre otros.

Por otro lado, la generación de los productos derivados (curvas de nivel, modelos tridimensionales (3D), perfiles transversales, etc.) y los análisis de dichos productos, se verán afectados por la densidad de puntos relevados y la elección de los mismos.

Para salvar estos problemas, se desarrolló una nueva técnica digital que propone el registro de datos medidos en forma remota. Esta técnica brinda un mayor detalle del área en estudio, ya que se incrementa la resolución espacial del área relevada, y además, involucra menor tiempo de medición, respecto de la técnica tradicional. Esta condición se alcanza drenando adecuadamente la superficie, tal que no presente áreas con acumulación de agua en superficie.

La aplicación que se presenta, consistió en las mediciones de erosión realizadas sobre el modelo físico tridimensional del Dique Los Molinos sobre el río Grande, emplazado en la provincia de Jujuy. Este modelo fue construido con similitud de Froude, a escala 1:65 con fondo mixto, en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias

Dirección de contacto:

Mariana Pagot, Av. Filloy s/n Ciudad Universitaria, X5016 CGA, Tel: 0351-4334446, E-mail. mpagot@efn.uncor.edu

Exactas Físicas y Naturales, de la Universidad Nacional de Córdoba. (Laboratorio de Hidráulica, 2012 y Eder, 2012)

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Cámara RGB-D

El sensor Microsoft Kinect (Microsoft, 2010), inicialmente diseñado para la consola de juegos Microsoft Xbox 360, está compuesto por una cámara RGB (siglas en inglés de Rojo, Verde, Azul), un sensor de profundidad (D), un conjunto de micrófonos y un mecanismo de inclinación motorizado. (Fig. 1)



Fig. 1: Microsoft Kinect. (Adaptado de Wikipedia, 2012).

La cámara RGB (R: Red, G: Green, B: Blue) produce un conjunto de datos de 24 bits por píxel. Su resolución estándar es 640x480 píxeles con una frecuencia de muestreo máxima de 30 capturas (o *frame*) por segundo. El sensor de profundidad (D: Depth) está compuesto por un emisor láser infrarrojo (IR) con una definición de 2048 datos por píxel (11 bits). Posee igual resolución y frecuencia de muestreo máxima que la cámara RGB. El campo de visión es de 57° horizontal y 43° vertical.

Procedimiento implementado

Para generar un mapeo 3D o modelo digital de elevaciones (MDE) de la condición de erosión resultante sobre un modelo físico utilizando una cámara RGB-D, se consideraron las etapas presentadas en la Fig. 2.

Estas implicaron la captura de cada toma (*frame*) y sus respectivos datos de profundidad utilizando el sensor RGB-D. Las tomas fueron registradas en un mismo sistema de coordenadas de referencia (sistema modelo) generando un mosaico digital con el conjunto de imágenes capturadas.

La registración global de las imágenes obtenidas con la cámara RGB-D se obtuvo aplicando una transformación rígida que alinea los conjuntos de datos generados basados en una descomposición de valores singulares (Besl y MacKay, 1992) y en un filtrado de correspondencias erróneas con eliminación de inconsistencias (Fischler y Bolles, 1981).

Se realizó una conversión desde el sistema de escala modelo al sistema de escala prototipo, a fin de trabajar con niveles de profundidades reales. En este sentido, utilizando la información de profundidad provista por la cámara RGB-D se pudo establecer un mapeo (x,y,z) asignando un valor de profundidad en prototipo (Z) a cada punto en prototipo

en una correspondencia 2D (X,Y), lo que derivó en correspondencias 3D.

El método se implementó y probó sobre el sistema operativo Ubuntu y requiere de las librerías *Open Source*. Para simplificar la implementación, se utilizó una interfaz de líneas de comandos estándar en sistemas GNU/Linux.

La resolución espacial, calibrada particularmente para la cámara RGB-D utilizada, resultó entre 1.67 y 2.5 mm de tamaño de píxel (menor área registrada) a distancias focales entre 1 y 1.5 m respectivamente. Las exactitudes de las mediciones asociadas a las mencionadas distancias encontraron entre 0.67 y 1 mm respectivamente.

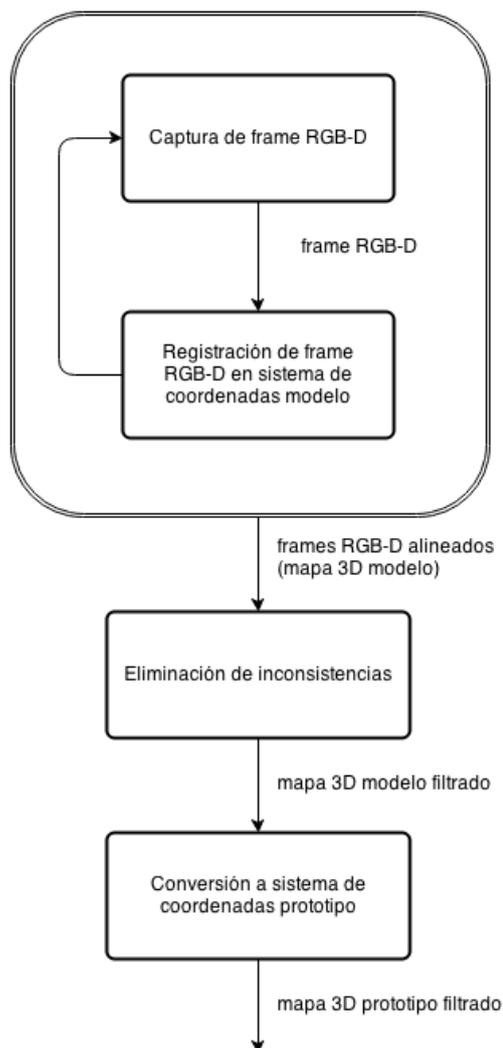


Fig. 2: Etapas en la generación del mapeo 3D con cámara RGB-D.

APLICACIONES

Los ensayos se realizaron en el modelo físico construido en el Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). En la Fig. 3, se presenta una vista general de este modelo físico donde las flechas indican el sentido de escurrimiento de cada río modelado.

Como se mencionó, este modelo físico es una representación del Dique Los Molinos sobre el río Grande, ubicado en la provincia de Jujuy luego de la confluencia con el río Reyes. Cubre un tramo del curso fluvial de aproximadamente 1520 m (1000 m aguas arriba y 520

maguas abajo del dique), y un ancho efectivo variable entre los 250 m a 700 m en prototipo.

El dique está constituido por un terraplén de materiales sueltos y dos vertederos, un tramo a nivel fijo (dique fijo), y otro regulado por 4 compuertas, conocido como dique móvil. Sobre la margen derecha, se encuentra el canal moderador. Se construyó con fondo fijo la planicie de inundación y con fondo móvil el cauce del río aguas arriba y abajo del dique.



Fig. 3: Vista general del modelo físico construido en el LH-UNC.

Se modelaron las obras de regulación, con todos sus componentes y elementos auxiliares de relevancia hidrosedimentológica presentados en la Fig. 4. Estas características permiten analizar adecuadamente la morfodinámica del flujo en cercanías de las obras. Se realizaron 10 ensayos con diferentes configuraciones de caudales.

Como se describe en la Fig. 4, aguas abajo del dique móvil se analizó la erosión máxima resultante de cada ensayo. Aguas arriba del dique móvil se realizó el relevamiento de canalizaciones (áreas preferenciales del flujo) y el estudio de formas de fondo resultantes ante diferentes procedimientos de maniobra de las compuertas del dique móvil.

En el modelo físico sobre la zona de interés, se construyó una plataforma deslizable (Fig. 5) que posibilita realizarlas mediciones de erosión, entre otras variables. Sus componentes principales fueron:

- Una plataforma que puede ser trasladada para observar distintas áreas del modelo.
- Una guía-riel y un carro-soporte para trasladar, específicamente la cámara Kinect. (Bellino, 2013)

En la Fig. 5, las flechas indican el sentido de desplazamiento posible de la plataforma y de la cámara RGB-D sobre la guía soporte.

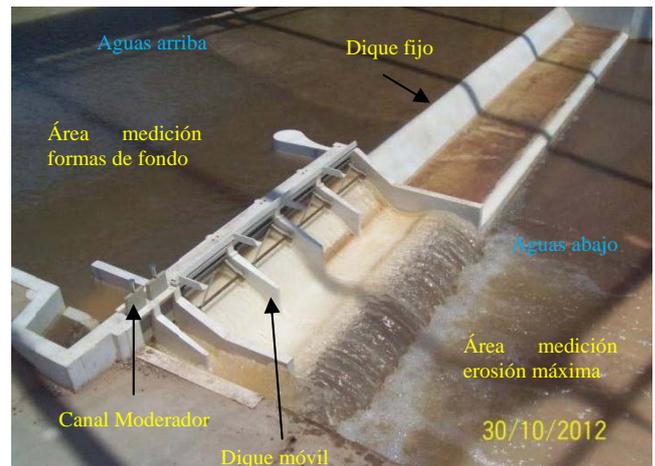


Fig. 4: Modelo físico del Dique Los Molinos. Obras de regulación. Ensayo para medición de erosión. Caudal prototipo = 900 m³/s.

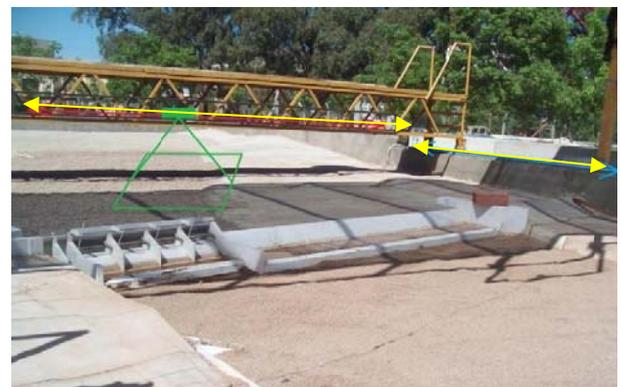


Fig. 5: Guía soporte para la cámara RGB-D (LH, 2012).

Resultados: Erosión máxima

Se presentan los resultados para el escenario correspondiente a un caudal de 900 m³/s en prototipo, el cual permitió evaluar la erosión generada por el paso del mayor caudal posible por el canal moderador y por el dique móvil en conjunto. (Fig. 6)



Fig. 6: Foso de erosión aguas abajo del dique móvil. Caudal prototipo: 900 m³/s

En la Fig. 7 se muestra la imagen resultante RGB con la cámara ubicada a un altura de 1.25 m sobre el lecho sin erosión. En la Fig. 8 se presenta la imagen del modelo digital de elevaciones generado en escala prototipo a partir de los datos medidos con la cámara RGB-D. Los valores máximos de erosión corresponden a los valores mínimos en la escala de color.



Fig. 7: Foso de erosión aguas abajo del dique móvil. Imagen RGB.

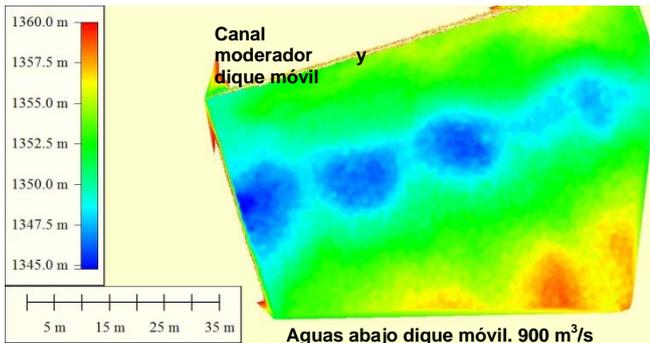


Fig. 8: Foso de erosión aguas abajo del dique móvil. MDE generado.

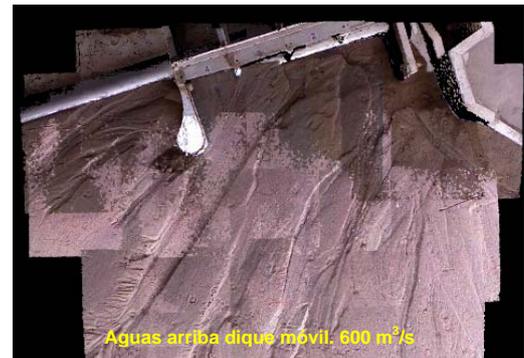


Fig. 9: Área relevada aguas arriba del dique móvil. Mosaico con imágenes RGB.

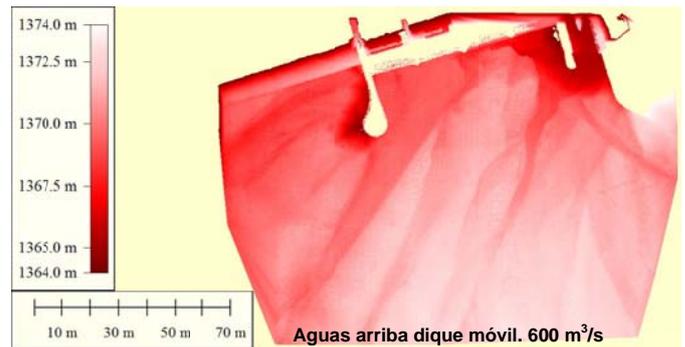


Fig. 10: Área relevada aguas arriba del dique móvil. MDE generado.

Resultados: Formas de fondo

En este ensayo se relevaron las canalizaciones formadas por la influencia de las aberturas de compuertas del dique móvil y del canal moderador para un caudal en prototipo de 600 m³/s. El análisis de los canales que se formaron sobre la superficie del modelo, debido a las llamadas que se realizó con la operación de las estructuras de control, requirió relevar una elevada densidad de puntos y a la vez cubrir grandes superficies, como se muestra en la Fig.9. La técnica digital propuesta permitió realizar esta medición de forma mucho más eficiente y precisa que la metodología tradicional. En la Fig.10, se muestra el mapeo de elevaciones en escala prototipo, generado a partir del área relevada aguas arriba del dique móvil con la cámara RGB-D.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores de máxima erosión medidos aguas abajo del canal moderador y del dique móvil, respectivamente, relevando los datos tanto con nivel y mira (datos en la segunda columna) como con la cámara RGB-D (datos en la tercera columna).

Se relevaron los valores máximos obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, considerando las variaciones de caudales, según se indica en la primera columna de ambas tablas. En la cuarta columna de ambas tablas, se presenta el error absoluto estimado como las diferencias entre los valores medidos con ambas técnicas. En la quinta columna se presentan los errores relativos, que corresponde al cociente entre el error absoluto y el valor medido con la técnica tradicional.

TABLA 1: EROSIONES MÁXIMAS MEDIDAS EN CADA ENSAYO HIDRÁULICO REALIZADO CON VARIACIÓN DE CAUDAL. CANAL MODELADOR MEDIANTE TÉCNICA TRADICIONAL (COTA MEDIDA CON NIVEL) Y DIGITAL (CON LA CÁMARA KINECT) (VALORES EN PROTOTIPO).

Caudal (m ³ /s)	Cota medida con nivel (m s.n.m.)	Cota medida con Kinect (m s.n.m.)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
90	1350.96	1350.37	-0.59	-0.044
600	1346.5	1346.16	-0.34	-0.025
900	1344.8	1345.75	0.95	0.071
1600	1345.7	1345.38	-0.32	-0.024
4200	1345.2	1345.59	0.39	0.029
4200bis	1344.6	1344.18	-0.42	-0.031
Promedio			-0.05	-0.004
Desv. Estándar			0.60	0.040

TABLA 2: EROSIONES MÁXIMAS MEDIDAS EN CADA ENSAYO HIDRÁULICO REALIZADO CON VARIACIÓN DE CAUDAL. DIQUE MÓVIL MEDIANTE TÉCNICA TRADICIONAL (COTA MEDIDA CON NIVEL) Y DIGITAL (CON LA CÁMARA KINECT) (VALORES EN PROTOTIPO)

Caudal (m ³ /s)	Cota medida con nivel (m s.n.m.)	Cota medida con Kinect (m s.n.m.)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
220	1354.2	1354.89	0.69	0.051
600	1350.1	1349.67	-0.43	-0.032
900	1346.1	1345.86	-0.24	-0.018
4200	1342.3	1343.20	0.90	0.067
4200bis	1343.2	1343.41	0.21	0.016
Promedio			0.26	0.017
Desv. Estándar			0.57	0.040

Analizando los errores absolutos entre las mediciones, se estimó un valor promedio de 0.08 m, la desviación estándar

resultó próxima a 0.60 my la discrepancia máxima resultó de 0.95 m para el conjunto de datos referidos al sistema en prototipo. Con relación al error relativo, se alcanzó una desviación estándar de 0.04 %, indicando una baja variabilidad entre las diferencias estimadas con ambas técnicas (<0.1%). En el sistema modelo, se obtuvo un error absoluto de 1.3 mm promedio y una discrepancia máxima de 14.6 mm. Al analizar los valores absolutos de cada diferencia entre mediciones con tradicional y digital, se alcanzó un valor promedio de 7.7 mm. Este valor corresponde a 3.85 veces el tamaño del pixel de la técnica tradicional (=2 mm).

Con el conjunto de datos, se realizó un análisis de regresión lineal simple (correlación) entre las mediciones realizadas con ambas técnicas (en escala prototipo) y se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.976.

Con respecto al relevamiento de las formas de fondo generadas aguas arriba del dique móvil, se analizaron modelos tridimensionales de la superficie relevada con ambas técnicas para el ensayo hidráulico realizado para un caudal en prototipo de $600\text{m}^3/\text{s}$.

La problemática asociada a este tipo de estudios radica en la necesidad de relevar áreas extensas con una alta densidad de puntos. Con la técnica tradicional se relevaron puntos equidistantes sobre varios perfiles transversales y se añade la medición de puntos extras que se consideran representativos en la definición de las canalizaciones. Para obtener una aproximación global de las formas de fondo, se debe generar un modelo 3D utilizando métodos de interpolación. Por un lado, en la Fig.11 se presentan los resultados obtenidos con la técnica tradicional. Este modelo digital de elevaciones generado con los puntos que se visualizan en la Fig. 11, se superpuso sobre el modelo generado con la técnica digital propuesta.

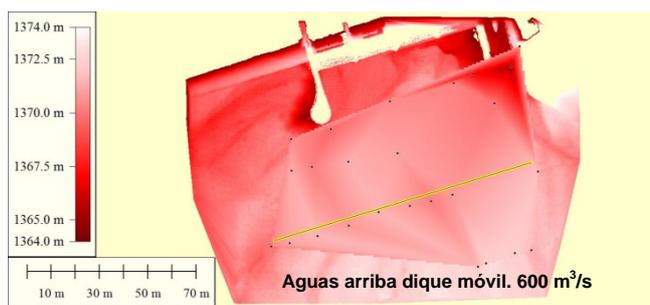


Fig. 11: Área aguas arriba del dique móvil. MDE generado con puntos relevados con técnica tradicional.

En base a un primer análisis visual, entre las figuras 10 y 11, se observa que con la técnica digital se obtuvo mayor representatividad de las canalizaciones resultantes del ensayo que con la técnica tradicional.

Con el objetivo de analizar las diferencias entre ambos MDE, se realizó la sustracción de los respectivos valores de las superficies generadas con la técnica digital y con la técnica tradicional. Sobre esta superficie resultante se trazó un perfil transversal (línea continua en la Fig.11), el cual se presenta en la Fig.12. En este gráfico se distinguen zonas con diferencias de elevación (con respecto a los valores en prototipo) dentro del intervalo 0.5 a 2 m. Este rango de valores representa en el modelo un intervalo de 7.7

a 30 mm. Las pequeñas fluctuaciones en la superficie se corresponden al ruido de la señal de la cámara Kinect.

Este análisis muestra que existen, dentro de las áreas estudiadas, zonas donde las canalizaciones relevadas con la técnica tradicional han sido excluidas por la interpolación realizada en base a las mediciones de cada punto relevado.

Cabe recalcar, que es posible disminuir el error presente en la superficie interpolada, incrementando la cantidad de puntos relevados con la técnica tradicional pero a costo de elevar el tiempo de medición. El tiempo de medición que aquí se menciona contempla, en ambas técnicas, el intervalo desde el inicio al final de cada medición, sin considerar el tiempo de drenaje del modelo.

El método tradicional es laborioso cuando se deben realizar ensayos consecutivos y secuenciales asociados a aspectos complementarios de un estudio global.

Por este motivo, la técnica digital permite obtener una representación más realista del lecho erosionado con bajo costo-tiempo de medición, sin alterar la superficie ensayada.

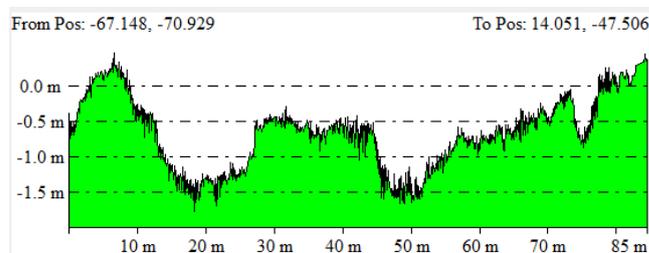


Fig. 12: Diferencias de elevaciones en prototipo sobre el perfil transversal. Eje vertical: Diferencias de elevación y Eje horizontal: Distancias desde margen derecha.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un sistema que permite medir la erosión en modelos físicos a fondo móvil en escala reducida, utilizando una cámara RGB-D Microsoft Kinect. El resultado es una medición con alta resolución espacial de la topografía de un ensayo hidráulico a fondo móvil. Se obtiene una imagen con tamaño de pixel entre 0.9 y 2.5 mm para un rango de distancias entre sensor y superficie de 0.5 a 1.5 m respectivamente, asociados a precisiones entre 0.9 a 1.1 mm.

Es importante destacar que esta moderna técnica digital exhibe una serie de ventajas frente a la técnica tradicional. Se resaltan aspectos que mejoran utilizando esta técnica digital, los que se asocian a la interacción con el medio y a las facilidades tecnológicas que esta técnica aporta. El primero se debe a la capacidad que presenta la técnica digital propuesta para realizar mediciones no intrusivas, es decir, que no altera la condición resultante del ensayo hidráulico. Por otro lado, el sistema propuesto presenta beneficios en la adquisición de datos porque mejora significativamente la resolución espacial del área relevada, a la vez que permite registrar áreas extensas y disminuir el tiempo empleado específicamente en las mediciones para cada escenario ensayado.

Esto permite posicionar la técnica digital como una alternativa viable para realizar mediciones de erosión en laboratorio. Para continuar esta línea de desarrollo, se abordarán los temas relacionados con las fuentes de error

posibles, como por ejemplo: el ruido debido a la rugosidad, la condición de humedad superficial y el ruido propio de la cámara RGB-D, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Oscar Bustos de FAMAFA-UNC y a la UTE Roggio-Cartellone por el apoyo brindado en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Bellino, N. (2013), Nuevo método de medición de erosión aplicado al modelo físico del Dique Los Molinos (Jujuy). Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. Abril.
- [2] Besl, P. J. y McKay, N. D. (1992), “A method for registration of 3-d shapes”. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 14 (2): 239-256.
- [3] Eder, M. (2012), Diseño, construcción y calibración del modelo físico – Dique Los Molinos (Jujuy). Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba, Argentina. Diciembre.
- [4] Fischler, M. A. y Bolles, R. C. (1981), “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”. *ACM Digital Library, Association for Computing Machinery Commun. ACM*, 24 (6): 381-395.
- [5] Laboratorio de Hidráulica (2012), Modelación física tridimensional del Dique Los Molinos, provincia de Jujuy. Segundo Informe Técnico a UTE Roggio-Cartellone. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Diciembre.
- [6] MICROSOFT (2010), “KINECT” tomado de <http://www.xbox.com/en-us/kinect/> (08 junio 2012).
- [7] Sánchez Aimar E. (2013), Software para medición de erosión y sedimentación en modelos físicos por medio de relevamiento digital de superficies. Trabajo final de la carrera de Licenciatura en Ciencias de la Computación – Facultad de Astronomía, Matemática y Física – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba, Argentina. Diciembre.
- [8] WIKIPEDIA (2012), MICROSOFT KINECT, tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Kinect> (08 junio 2012).