

Medición de micro topografías en canales de erosión con un sensor de movimiento

Bupo, Matías, Weber Juan F.

Facultad Regional Córdoba Universidad Tecnológica Nacional. Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina,
<http://www.frc.utn.edu.ar>

E-mail: mbupo@civil.frc.utn.edu.ar

RESUMEN: Es conocido el inconveniente que presenta la medición de geometrías curvas en canales de erosión a través de los métodos tradicionales, ya que para la modelación unidimensional, los perfiles deben ser perpendiculares al eje del cauce y en las modelaciones bidimensionales la cantidad de puntos relevados suele ser insuficiente. Con el objetivo de reducir los tiempos que demanda esta tarea y de obtener un volumen de información considerablemente mayor, los sensores de movimiento parecen ser una alternativa viable y económica para el levantamiento tridimensional de micro-geometrías.

Los sensores utilizados fueron la Kinect de Microsoft y la Xtion-Pro de ASUS, ambos equipos tienen una resolución de 640 x 480 píxeles, una velocidad de captura de 30 fps y un costo de \$ 1600 aproximadamente. Las imágenes son obtenidas en formato binario y a través del desarrollo de un software escrito en Python se realiza la transformación a formato ASCII.

Se plantea como objetivo del trabajo mostrar los avances en el desarrollo de una técnica para realizar levantamientos planialtimétricos con sensores de movimiento (la cual permita obtener resultados con una precisión comparable con los métodos tradicionales de medición), una serie de consideraciones a tener en cuenta al realizar dichas mediciones y finalmente los resultados preliminares.

INTRODUCCIÓN

Es conocido el inconveniente que presenta la medición de geometrías curvas en canales de erosión a través de los métodos tradicionales, ya que los perfiles deben ser perpendiculares al eje del cauce y por lo tanto la medición de cada uno de los puntos a relevar requiere de la modificación de dos coordenadas en el sistema de montaje de los instrumentos de medición. Con el objetivo de reducir los tiempos que demanda esta tarea y de obtener un volumen de información considerablemente mayor, los sensores de movimiento parecen ser una alternativa viable y económica para el levantamiento tridimensional de micro topografías.

En el presente trabajo se expondrán una serie de consideraciones a tener en cuenta en el uso de estos instrumentos para realizar mediciones micro topográficas, se presentarán resultados relacionados a la precisión y exactitud de estos equipos y finalmente un procedimiento general a través del cual se logra obtener resultados de calidad comparable con los métodos tradicionales de medición, con un considerable aumento en el volumen de información obtenida.

OBJETIVO

Se plantea como objetivo reducir el tiempo que conlleva relevar una superficie en un canal de erosión, aumentar el volumen de información obtenida y que la calidad de los resultados sea comparable con los métodos tradicionales de medición.

En base a una serie de observaciones y análisis de resultados obtenidos a partir de ellas, se plantea la necesidad de desarrollar un método que sea independiente del sensor de movimiento utilizado y cumpla con los objetivos antes planteados.

MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD POR TRIANGULACIÓN

Estos dispositivos tienen incorporados un emisor y una cámara infrarroja. Los inventores describen la medición de la profundidad como un proceso de triangulación (Freedman, et al 2010). La fuente de laser emite un espectro patrón constante sobre la escena el cual refracta y es capturado por la cámara infrarroja, y a través de un procesamiento interno y por comparación con un patrón de referencia almacenado en la memoria, es posible obtener el valor de la profundidad a partir de una relación de triángulos (Figura 1).

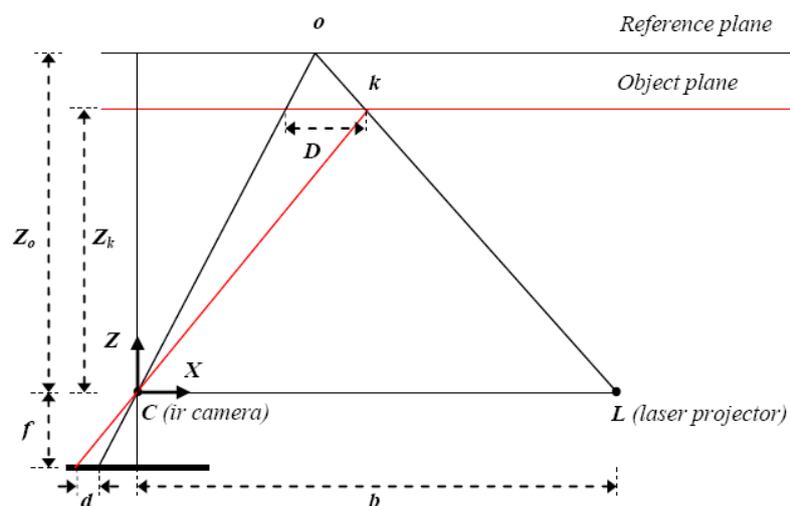


Figura 1: esquema de medición del sensor de movimiento (Khoshelham, K. 2011)

Realizando un análisis bidimensional el espectro es emitido desde el proyector (L), al interponerse un objeto, el haz es reflejado y tomado por la cámara infrarroja con un ángulo de incidencia diferente al que tuviese si la refracción se realizase en el patrón de referencia generando de esta manera lo que se conoce como disparidad (d).

Siendo c el origen del sistema de coordenadas, f la distancia focal, Z₀ la distancia al plano de referencia, Z_k la distancia que se pretende mensurar y b la distancia entre la cámara y el proyector, es posible deducir por relación de triángulos las ecuaciones 1 y 2.

$$\frac{D}{b} = \frac{Z_0 - Z_k}{Z_0} \quad (1)$$

$$\frac{d}{f} = \frac{D}{Z_k} \quad (2)$$

Trabajando algebraicamente estas ecuaciones y poniendo a Z_k en función de las demás variables se obtiene:

$$Z_k = \frac{Z_0}{1 + \frac{Z_0}{fb} d} \quad (3)$$

La ecuación (3) es básicamente el modelo matemático desde el cual se deriva la profundidad a partir de una disparidad observada.

La coordenada Z_k de un punto en forma conjunta con f, definen la escala para ese punto. Las coordenadas planimétricas de cada punto del objeto pueden ser calculadas a partir de las coordenadas de la imagen y la escala (Khoshelham y Elberink 2012):

$$X_k = \frac{Z_f}{f} (x_k - x_0 + \delta_x) \quad (4)$$

$$Y_k = \frac{Z_f}{f} (y_k - y_0 + \delta_y) \quad (5)$$

En las ecuaciones 4 y 5, x_k e y_k son las coordenadas de la imagen, las cuales se definen a partir de la ubicación del píxel en cuestión, por ejemplo las coordenadas x_k e y_k del punto P_i (Figura 4) son 3 y 479 respectivamente, x₀ e y₀ son las coordenadas del punto principal o al eje de medición, y δ_x y δ_y son las correcciones por distorsión de lente. Las coordenadas X_k, Y_k y Z_k, se conocen como coordenadas de mundo real (Figura 2).



Figura 2: coordenadas en mundo real

MATERIALES Y METODOS

Se utilizaron tres sensores de movimiento, dos Xtion Pro (ASUS, 2012) y un Microsoft Kinect (Microsoft Kinect, 2010), los cuales fueron montados sobre una base nivelante con el objetivo de horizontalizar los equipos. 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).

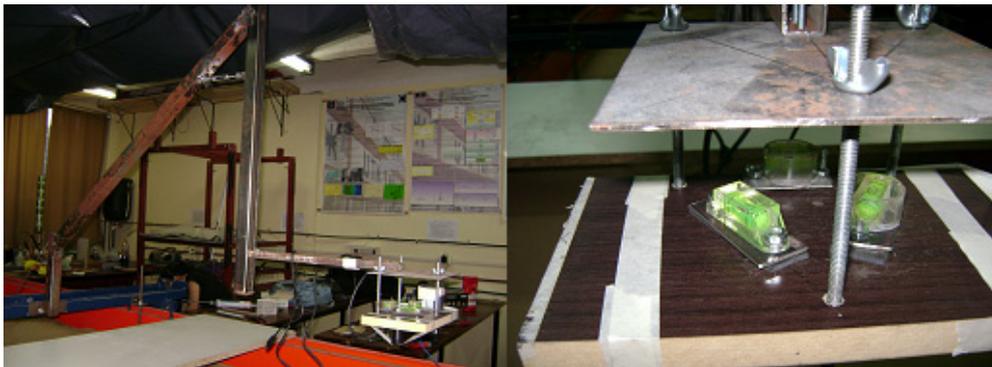


Figura 3: a la izquierda sistema de montaje de los sensores de movimiento y a la derecha base nivelante.

Para la obtención y procesamiento de datos se utilizaron las librerías PCL (Rusu y Cousins, 2011), Open Kinect libfreenect (OpenKinect 2011), el código kinect_register (Mankoff y Russo, 2012) y finalmente se escribió un código propio en Python el cual está basado en las publicaciones del mismo autor del kinect_register.

Cada imagen (captura) se encuentra en formato binario de 11 bits, su estructura varía en función de la librería que se utilice y su contenido son los valores de disparidad (DN), parámetro a partir del cual se calcula la profundidad (Freedman et al, 2010), que una vez transformados a formato ASCII se organizan en arreglos de 640 x 480 pixeles (Figura 4) y su valor varía entre 0 y 2047.

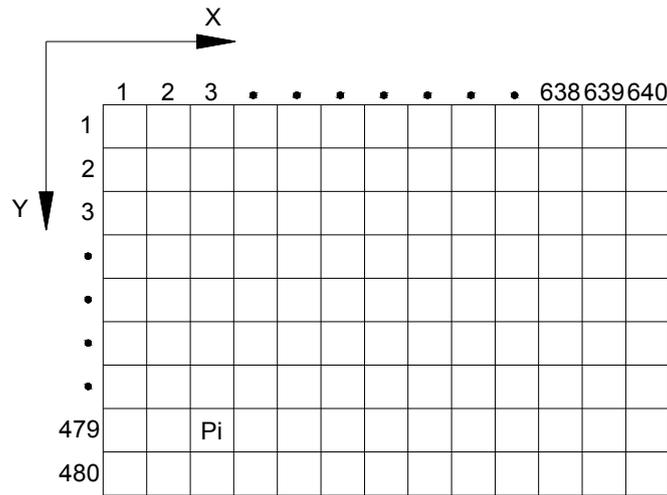


Figura 4.- Forma matricial de la imagen capturada con un sensor de movimiento

CONSIDERACIONES

A través de reiteradas mediciones sobre distintas superficies con los tres sensores de movimiento mencionados (Bupo y Weber 2013), se observó que para un mismo mensurando los valores de profundidad obtenidos variaban para cada sensor y cada librería utilizada. En todos los casos, se presenta un comportamiento escalonado de las mediciones, lo que ya fue observado por Mankoff y Russo (op. cit.) y lo definieron como Step Size, el cual es una función de la distancia de captura (Figura 5).

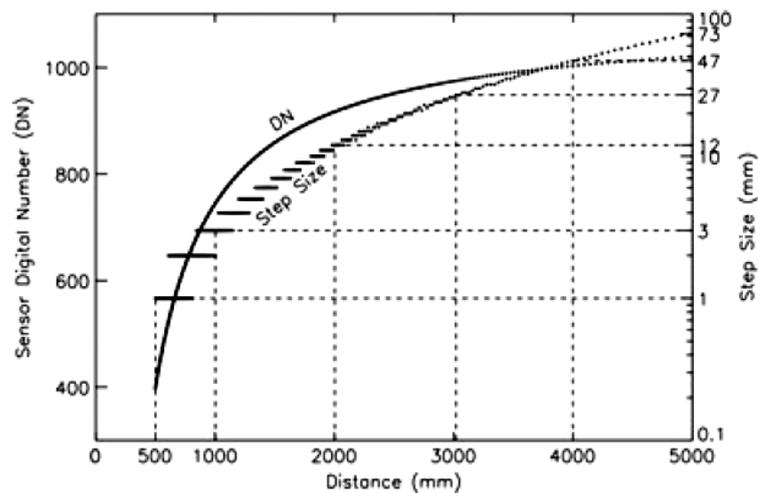


Figura 5: DN y step size vs distancia de medición (Mankoff y Russo op. cit.)

En la Figura 6 se presentan los resultados de la medición de una superficie horizontal donde se puede apreciar lo mencionado. Es evidente que si se desea obtener insertidumbres de ± 1 mm, el valor de Step Size debe ser menor o igual a dicha tolerancia, lo cual es posible de alcanzar sólo si la distancia de captura es lo suficientemente pequeña (55 cm aprox.)

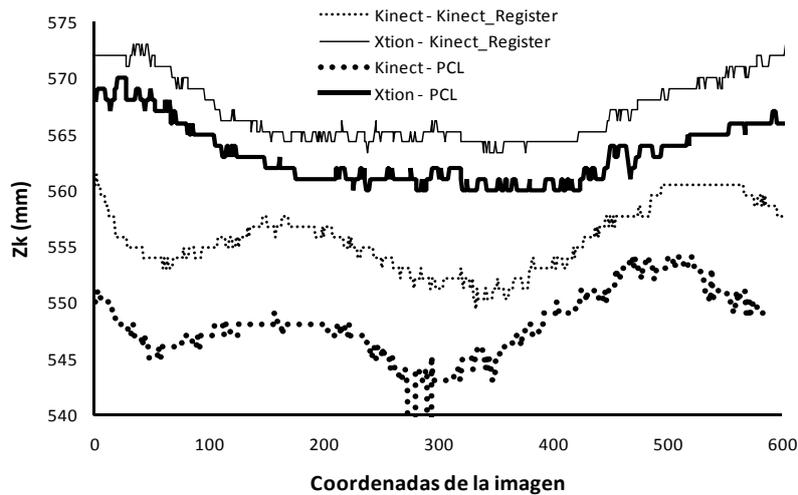


Figura 6: Mediciones sobre superficie horizontal con Xtio Pro y Microsoft Kinect

En la misma Figura se puede ver que los valores de profundidad Z_k (en teoría constantes) también varían espacialmente dentro de una misma captura, y dicho comportamiento se detectó en numerosas observaciones realizadas, viendo que, para el caso de la Xtion Pro, existía un sector donde las mediciones parecían ser más uniformes. Por esta razón, se supone que no toda la imagen tiene la misma precisión, por lo que se decide evaluar la posibilidad de tomar una sub matriz (ventana) cuyo tamaño satisfaga los requerimientos en cuanto a la calidad de las mediciones y la superficie de captura.

Se realizaron mediciones sobre superficies planas (horizontales e inclinadas) y a diferentes alturas de captura. Se comienza con una sub matriz de 3 x 4 pixeles, la cual se encuentra centrada, se calcula el plano de mejor ajuste por regresión lineal múltiple y a partir de ésta los residuos, sobre los cuales se calculan algunos parámetros estadísticos. Luego se amplía esta sub matriz, de manera que su relación siga siendo 3:4 (relación de la matriz original de 640 x 480) y se repite el procedimiento.

En la Figura 7 se observa la variación de la media de los valores absolutos (v.a.) de los residuos de la sub matriz en función del tamaño del lado menor de la misma. Cada curva corresponde a un mensurando distinto.

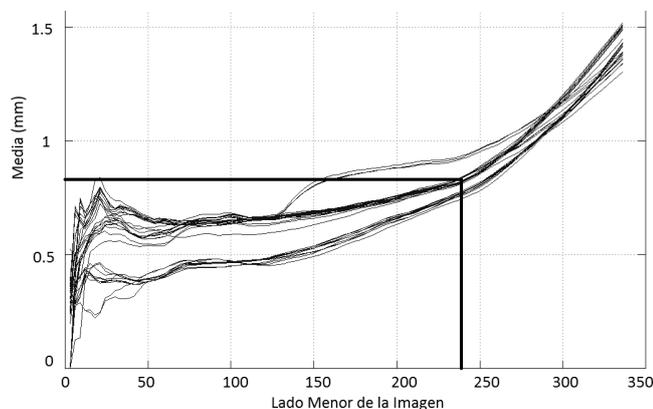


Figura 7: Media de los v.a. de los residuos para cada tamaño de ventana

En base a los estadísticos calculados a partir de los v.a. de los residuos se considera que una ventana de 240 x 320 pixeles parece ser una buena relación entre exactitud y tamaño de captura. Con el fin de verificar lo mencionado se trazaron curvas de frecuencia de los v.a. de los residuos para distintos mensurandos (Figura 8), donde se observa que en todos los casos más del 80% de los residuos se encuentra por debajo del milímetro.

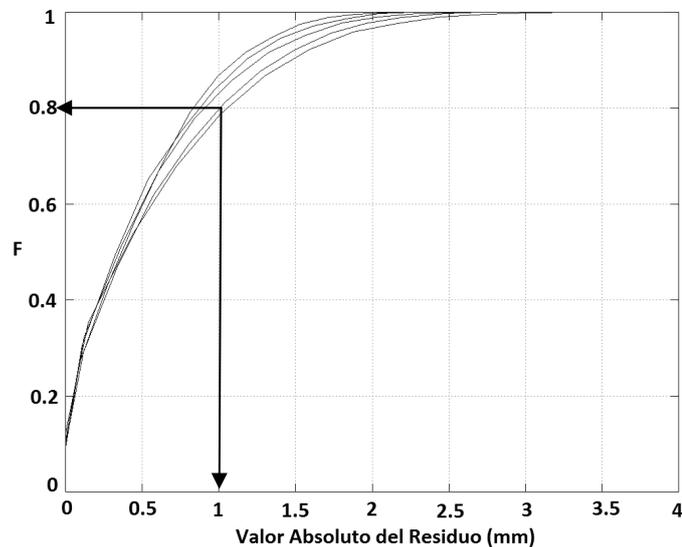


Figura 8: Frecuencia de los residuos para distintos mensurandos

Por otro lado se estudió cual es la posición más conveniente de esta sub matriz, ya que hasta el momento la misma se posicionó centrada. En la Figura 9 cada uno de los polígonos corresponde a mediciones realizadas sobre diferentes mensurandos, y son una envolvente convexa de las posiciones de la esquina superior izquierda de la sub matriz, para las cuales el 80% de los residuos fueron menores a 1 mm. Esto convalida la hipótesis de que para el sensor de movimiento utilizado, la posición centrada resultó ser adecuada.

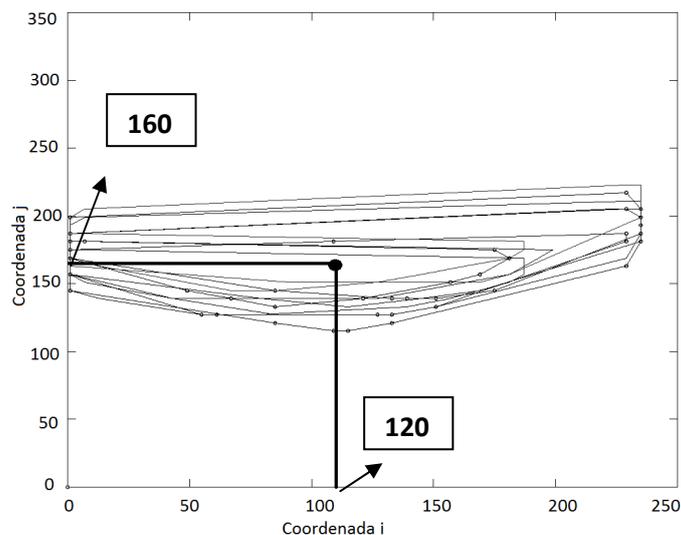


Figura 9: Coordenadas del pixel superior izquierdo de la sub matriz de 320 x 240. El punto indica la posición centrada.

Llamando “observación” al promedio de múltiples capturas consecutivas, y llamando P1 a una captura, P2 al promedio de 2 capturas, P3 al promedio de 3, etc., se observó que para un mismo mensurando al aumentar el número de capturas promediadas en una observación se mejora la calidad de los resultados.

En la Figura 10 se representa el porcentaje de puntos cuyo residuo es mayor a un valor límite en función de ese valor para observaciones con distintos números capturas promediadas. Se puede apreciar que estos porcentajes disminuyen a medida que se realizan los promedios mencionados.

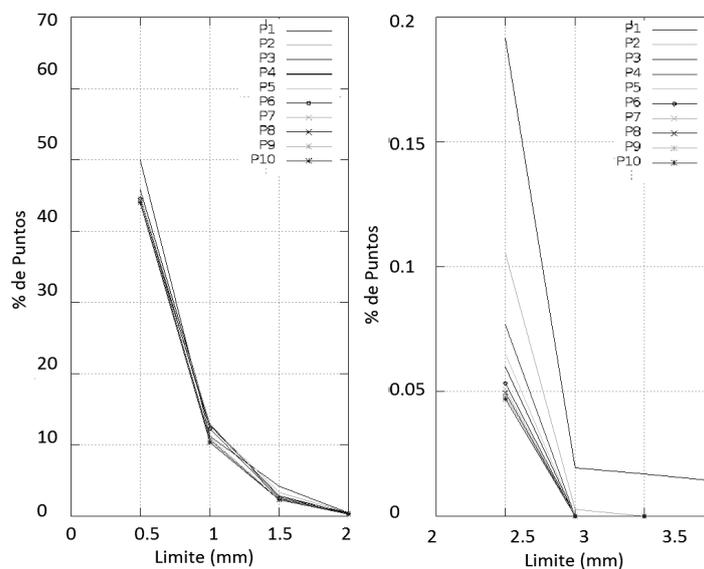


Figura 10: porcentaje de puntos cuyo residuo se encuentra por encima de un determinado valor límite para distintas observaciones, a la izquierda con un límite menor a 2 mm y a la derecha de 2 a 4 mm.

Con un valor de diez capturas promediadas, en ningún caso existen residuos por encima de los 3 mm, y en todos los casos observados casi el 90% de los mismos son menores a 1 mm.

Lo mencionado se observa claramente en la Figura 11, donde se trazaron curvas de frecuencia relativa acumulada del v.a del residuo, donde cada una representa una observación (P1, P3, etc.) y nuevamente para un promedio de 10 capturas (P10) más del 90% de los residuos están por debajo del milímetro.

PROCEDIMIENTO

En primer lugar se deben realizar capturas sobre una superficie plana (horizontal o de pendiente conocida) a la menor altura posible (entre 55 y 60 cm). Luego filtrar los valores de disparidad que se encuentren fuera del rango conocido de medición con el objetivo de evitar puntos anómalos. Con estas mediciones se debe encontrar el tamaño y posición de ventana que satisfaga las condiciones requeridas. Para ello se debe realizar un análisis estadístico de los residuos, en donde para cada combinación de tamaño y posición se calcularán

las medias, desvíos, rango y frecuencia. Los parámetros determinados a través del análisis mencionado serán particulares para cada equipo estudiado.

Con estos valores definidos, se toman 10 capturas de la geometría a mensurar o parte de ella y se promedian, obteniendo así una observación, luego se desplaza el sensor de movimiento un valor conocido (dx) de forma tal que la imagen anterior y la que se está por capturar se superpongan un 50% (Figura 12).

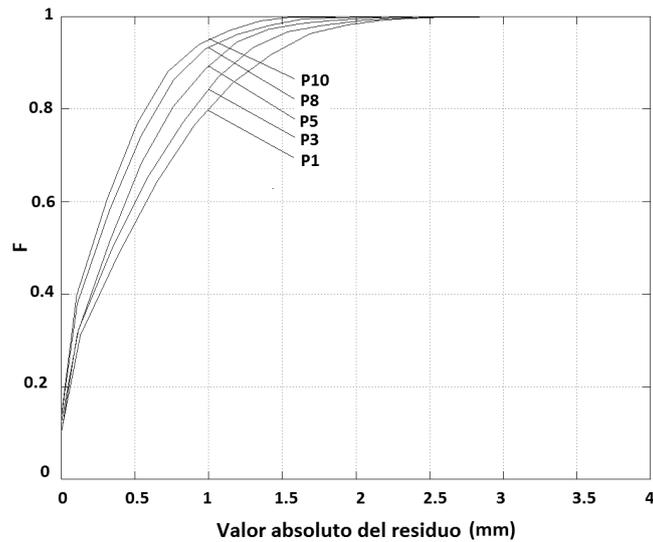


Figura 11: Curva de Frecuencia relativa acumulada de los residuos para observaciones con distinta cantidad de imágenes promediadas

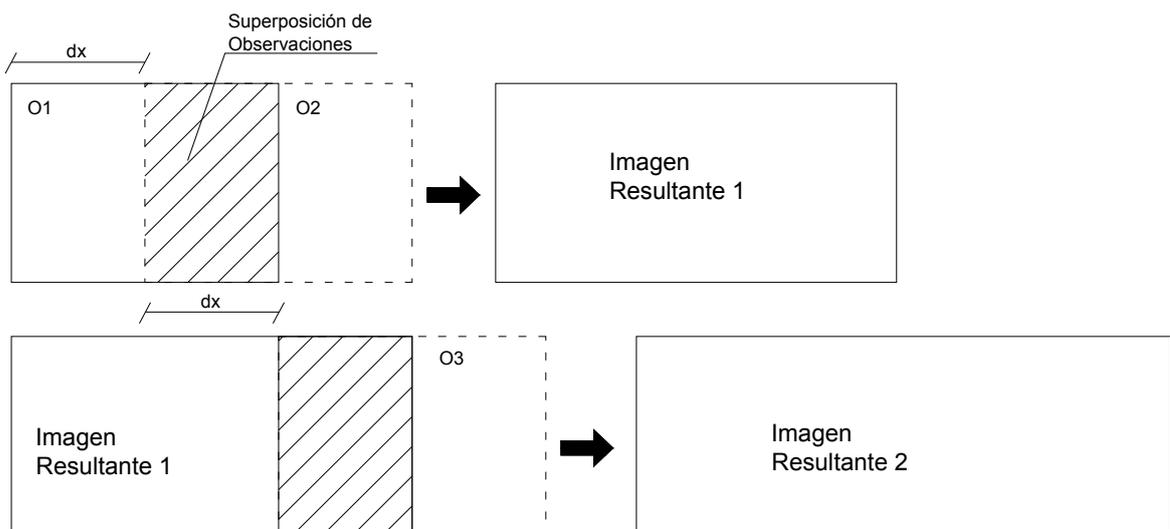


Figura 12: Proceso de superposición y concatenación de imágenes en una dirección

Una vez relevada toda la geometría y con las coordenadas de los desplazamientos conocidas, se concatenan todas las imágenes y se genera un modelo de elevación digital de la micro topografía mensurada.

APLICACIÓN Y RESULTADOS

Se realizaron 2 experimentos en el canal a fondo móvil anteriormente mencionado, en los cuales se parte de una geometría en planta inicial tal como la que se observa en la Figura 15.

En el primer experimento se utilizó una sección transversal del canal trapezoidal y en el segundo una triangular, con una pendiente de 1.2% en ambos casos.

En los experimentos se hizo circular un caudal de agua de 0.15 l/s durante un tiempo de 48 hs con recirculación de sólidos.

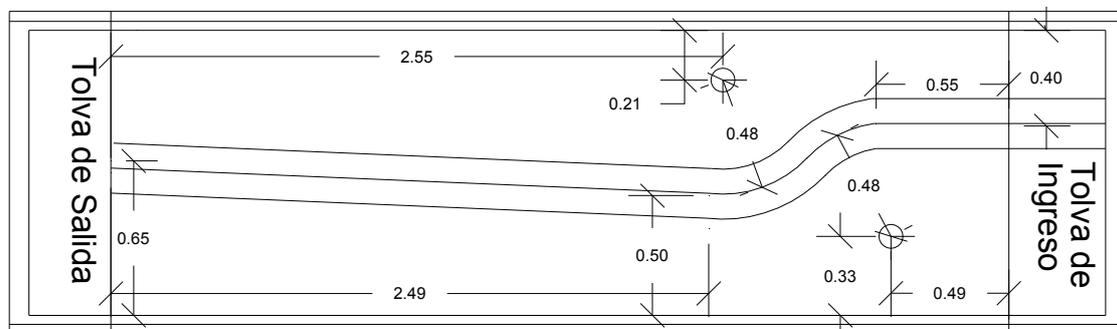


Figura 13: Geometría Inicial

En el primer caso (geometría de la sección transversal trapezoidal) se realizó un levantamiento planialtimétrico con un distanciómetro laser y con el sensor de movimiento tanto para la geometría inicial (previo al paso del agua) como en la geometría erosionada. En el primer caso (levantamiento con distanciómetro) se tomaron puntos equidistantes cada 1 cm, y en el segundo la altura de captura de la cámara fue de 60 cm, obteniendo una resolución de 1mm x 1mm aproximadamente.

En la Figura 14 se observan los resultados de los relevamientos realizados para las secciones inicial y final.

En ambos casos se calculó el perímetro y el área correspondientes con los datos obtenidos por ambas técnicas, obteniendo una diferencia del 7% en el primer caso y del 2.5% en el segundo.

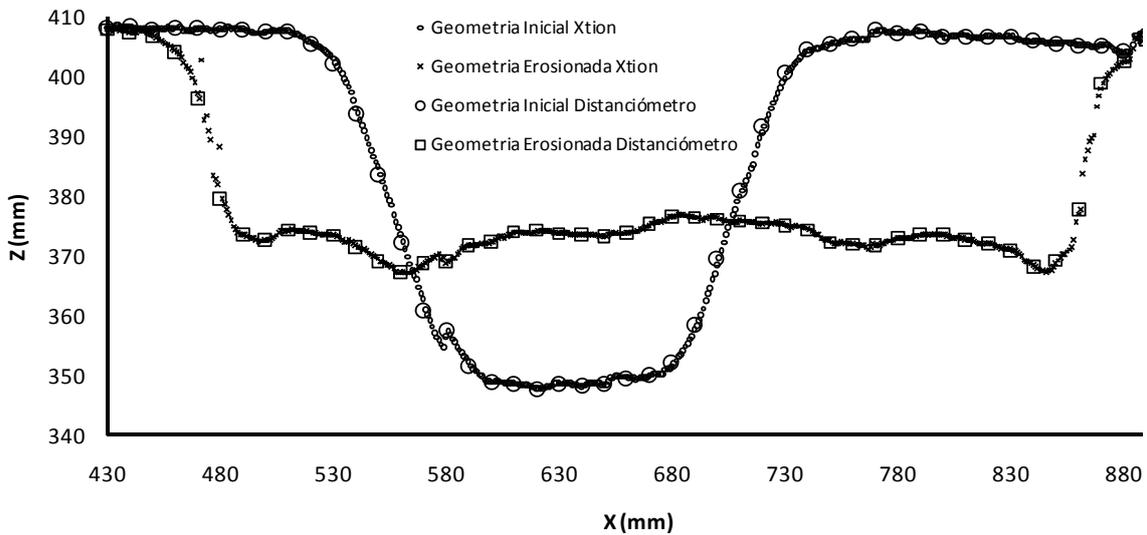


Figura 14: Sección transversal del canal relevado con sensor de movimiento y distanciómetro laser

El área relevada con el sensor de movimiento fue de 50 x 35 cm obteniendo 175000 puntos, y con el distanciómetro se relevaron 3 perfiles con un total de 50 puntos cada uno. En el primer caso el tiempo empleado para realizar las capturas y el procesamiento de datos fue de algunos minutos, mientras que en el segundo se empleó un tiempo de 2 hs aproximadamente.

En el segundo experimento (geometría de la sección transversal triangular), se realizó un relevamiento del canal completo (1.20 x 3.50 m) con el sensor de movimiento, tanto para condición inicial como para la erosionada, obteniendo un modelo digital del terreno (DEM) compuesto por 4.200.000 celdas con información de profundidad.

En la Figura 15 se observa el relevamiento realizado con la metodología propuesta del canal completo y un acercamiento del sector donde la geometría es curva.

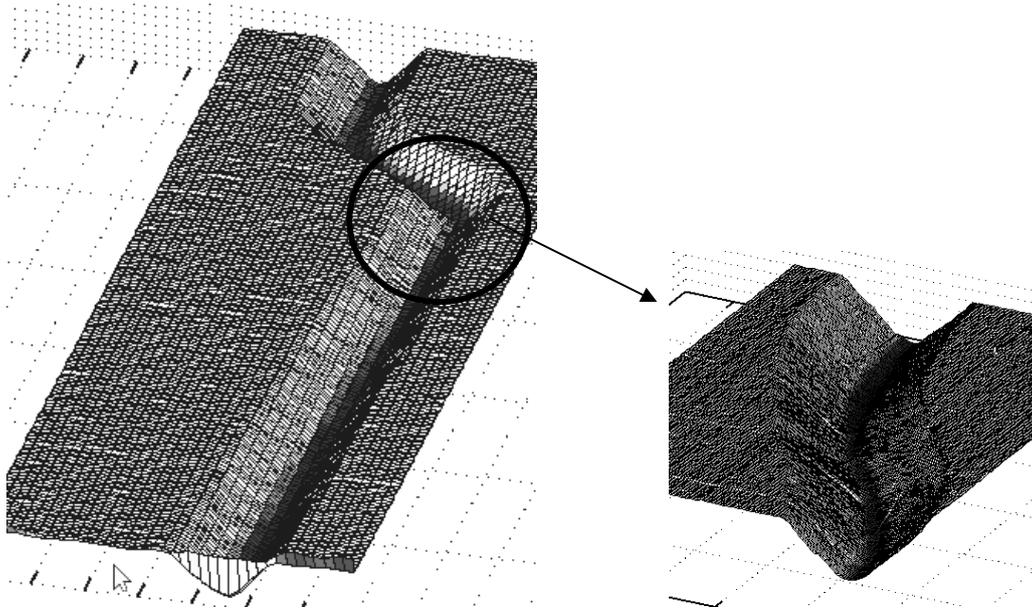


Figura 15: Relevamiento de la sección inicial, a la izquierda el canal completo y a la derecha un acercamiento de la zona de geometría curva

En la Figura 16 se utilizó el mismo procedimiento para relevar la geometría erosionada. En la misma se observa un acercamiento donde es posible apreciar en detalle las formas de fondo.

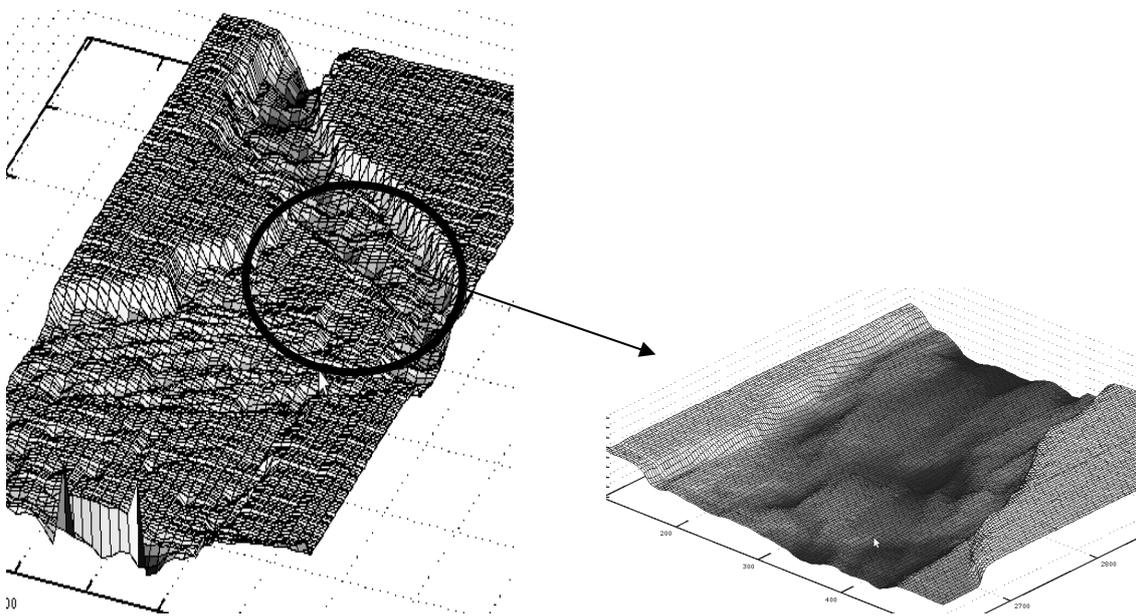


Figura 16: Relevamiento de la sección erosionada, a la izquierda el canal completo y a la derecha un acercamiento

CONCLUSIONES

A partir del estudio de los sensores de movimiento como posible alternativa para la medición de micro topografías se desarrolló un procedimiento a partir del cual se obtiene un gran volumen de información con

calidad comparable a los métodos tradicionales de medición a un bajo costo, el cual es de utilidad en las investigaciones que se están realizando sobre los procesos de erosión en curvas en cauces no cohesivos y es de aplicación a levantamientos tridimensionales en canales de laboratorio.

Esta técnica de medición permite generar modelos digitales de elevación, los cuales podrían ser la geometría de entrada en diversos modelos hidrodinámicos bidimensionales y tridimensionales, lo cual inferiría de manera directa en los resultados, debido al detalle de los modelos de elevación obtenidos, que a partir de las técnicas tradicionales tendrían un alto costo en términos de tiempo empleado para los relevamientos.

El detalle que se logra con esta técnica también permite realizar otros tipos de estudio tales como la medición de volúmenes erosionados, caracterización de formas de fondo, detección de zonas de escurrimiento principal, migración de meandros, etc.

Las diferencias encontradas tanto en el cálculo del área como en el perímetro a partir de los datos obtenidos con la técnica propuesta y el relevamiento con distanciómetro laser, pueden atribuirse a la diferencia entre el volumen de información obtenido con una y otra técnica.

REFERENCIAS

Xtion pro: <http://www.asus.com> (última visita 01/06/2013)

Bupo, M., Weber, J. F., 2013. "Consideraciones sobre el uso de sensores de movimiento para la medición de micro – topografías en canales de erosión." *VI Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos. FICH-UNL*, Santa Fe, 6 al 8 de noviembre.

Freedman, B., Shpunt, A., Machline, M., & Arieli, Y., 2010. U.S. Patent 2010/0118123. Depth Mapping Using Projected Patterns.

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*.

Microsoft Kinect: <http://www.xbox.com/en-us/kinect> (última visita 05/09/2013)

OpenKinect, 2011: <http://openkinect.org> (última visita 15/08/2013)

PrimeSense Ltd, 2011: <http://www.primesense.com> (última visita 05/09/2013)

Rusu, R. B., & Cousins, S., 2011. "3d is here: Point cloud library (pcl)." *In Robotics and Automation (ICRA)*, 2011 IEEE International Conference on (pp. 1-4). IEEE.

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.